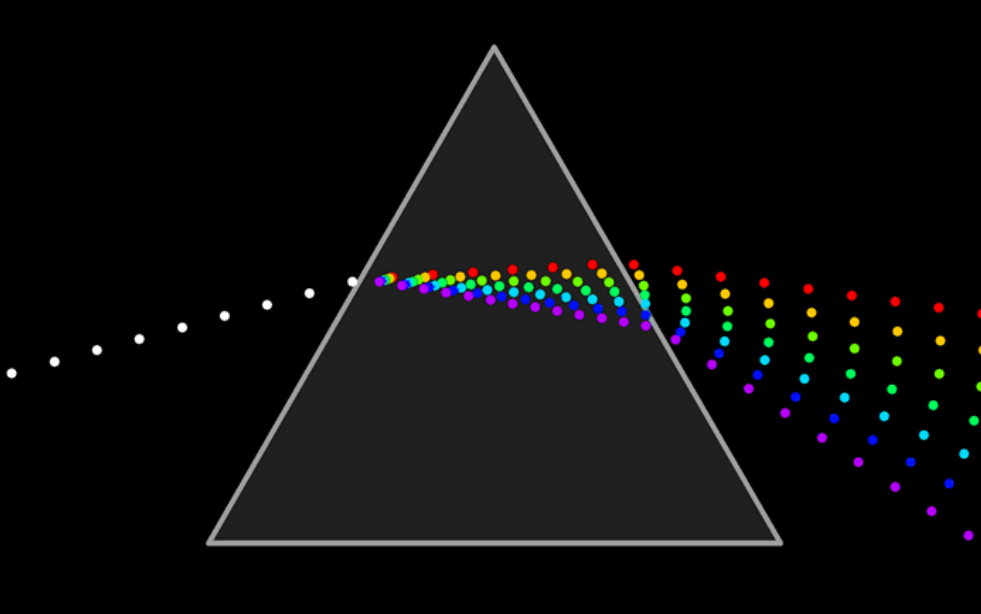


Spektroskopie a fotometrie

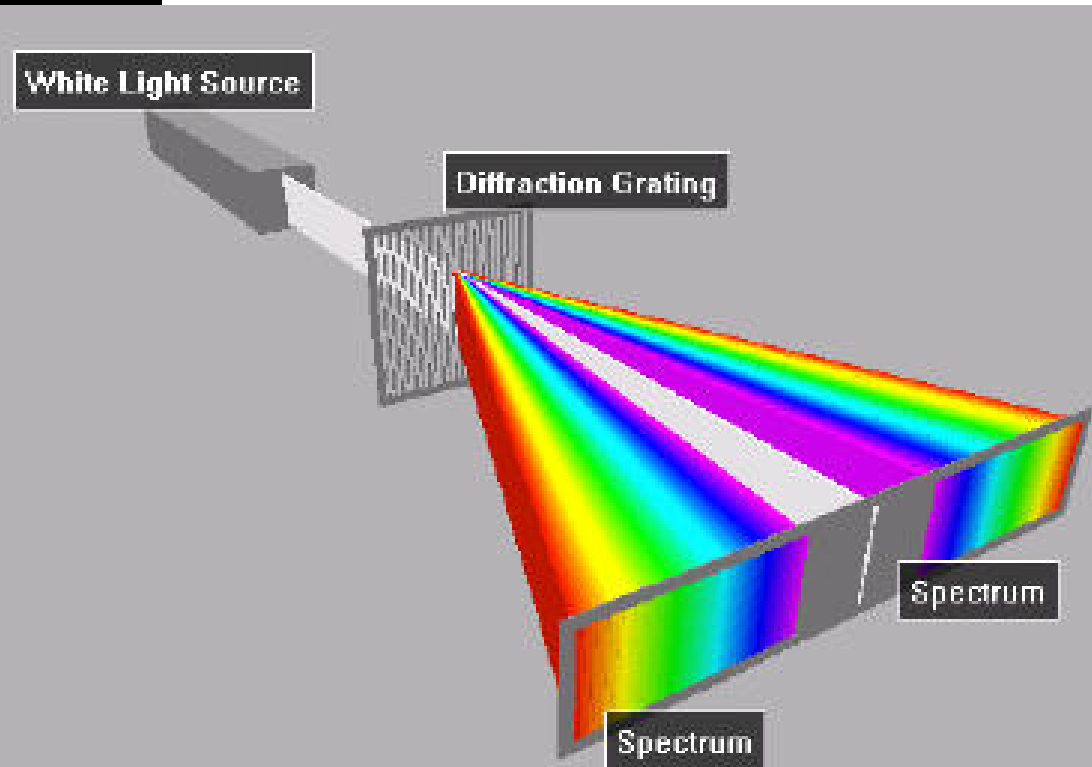




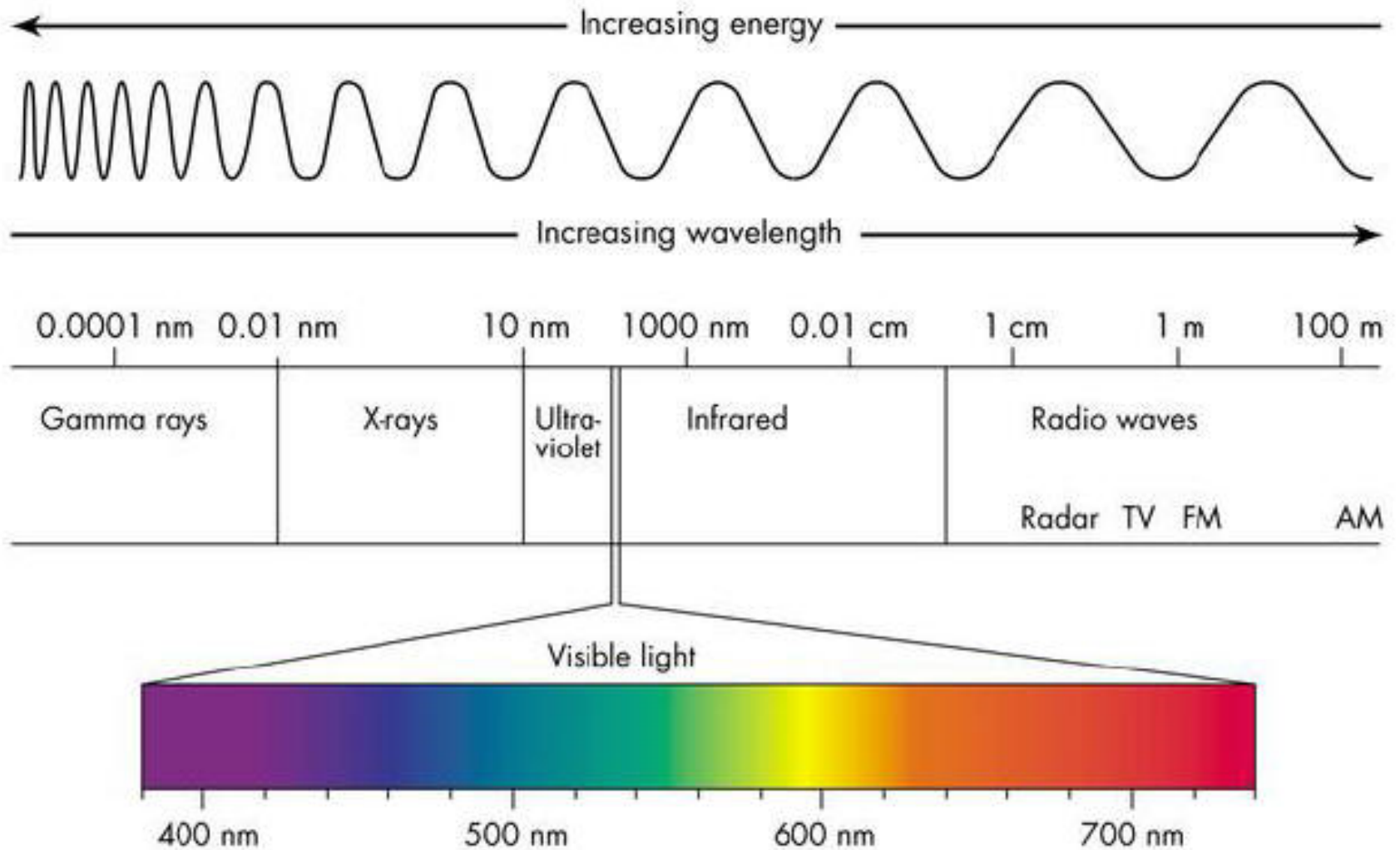
rozklad bílého světla pomocí hranolu

Spektrum

rozklad bílého světla pomocí mřížky



Spektrum

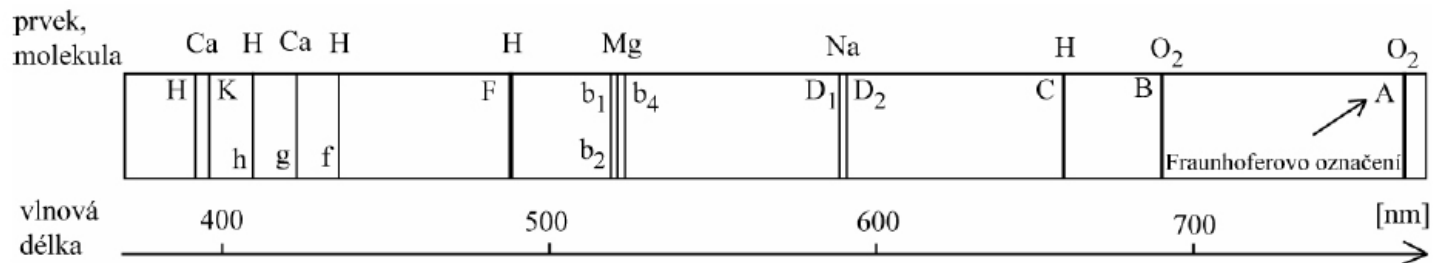


Spektrum – dějiny v kostce

- 1665 Isaac Newton - rozklad slunečního světla pomocí skleněného hranolu
- 1802 William Wollaston - ve spektru Slunce 7 tmavých čar
- 1814 Joseph Fraunhofer - zhotovil spektroskop – pozoroval tisíce tmavých čar (dnes Fraunhoferovy čáry).



Joseph von Fraunhofer
(1787-1826)

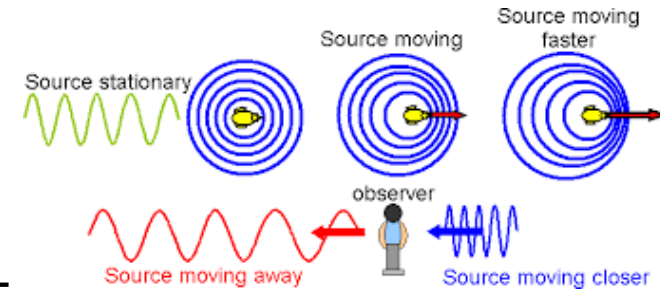


Dopplerův jev

1842 Christian Doppler - profesor matematiky na pražské technické univerzitě



světlo vysílané zdrojem – řada kulových vlnoploch
zdroj v klidu => doba mezi příchody vrcholů vln k pozorovateli = doba mezi jejich odchody ze zdroje
zdroj se vzdaluje - doba mezi příchody po sobě následujících vrcholů vlny > doba mezi odchody ze zdroje (2. vrchol musí urazit delší dráhu) => z hlediska pozorovatele delší vlnová délka
zdroj se přibližuje – kratší vlnová délka



<https://www.bbc.com/news/av/science-environment-40890856/brass-band-on-train-demonstrates-doppler-effect>

- vysílání vlnoploch s periodou T , radiální rychlost zdroje v_r ($v_r > 0$, vzdalování)
 - => mezi vysláním dvou následujících vlnoploch (vrcholů) – posun zdroje o $v_r T$
 - => čas potřebný k dosažení pozorovatele vzroste o $v_r T/c$
 - => čas T' mezi příchody po sobě jdoucích vrcholů vlny k pozorovateli $T' = T + v_r T/c$
 - => λ vyslaného světla je $\lambda = cT$, λ' světla přicházejícího k pozorovateli $\lambda' = cT'$
 - => poměr vlnových délek $\lambda'/\lambda = T'/T = 1 + v_r/c$
- (totéž pro přibližování zdroje k pozorovateli, $v_r < 0$)

Spektrum – dějiny v kostce

1859 **Kirchhoff a Bunsen** – 2 zákony spektrální analýzy:

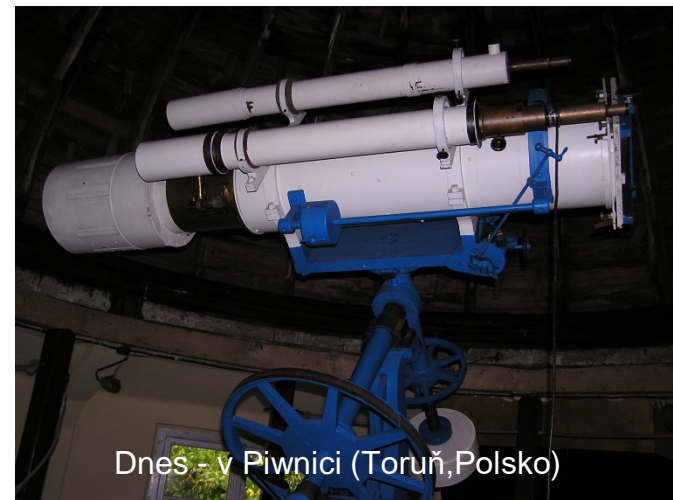
1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech fyzikálních podmínek (teplota, hustota, tlak) vždy stejné, mění se jen výraznost čar.
2. Spektrální čáry plynu umístěného mezi zdrojem spojitého záření a pozorovatelem se jeví jako absorpční, jestliže je plyn chladnější než zdroj, nebo jako emisní, je-li plyn teplejší než zdroj.



Kirchhoff (stojící) a Bunsen

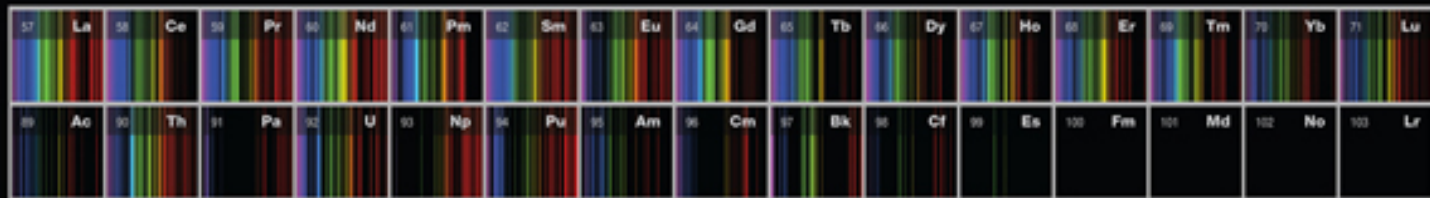
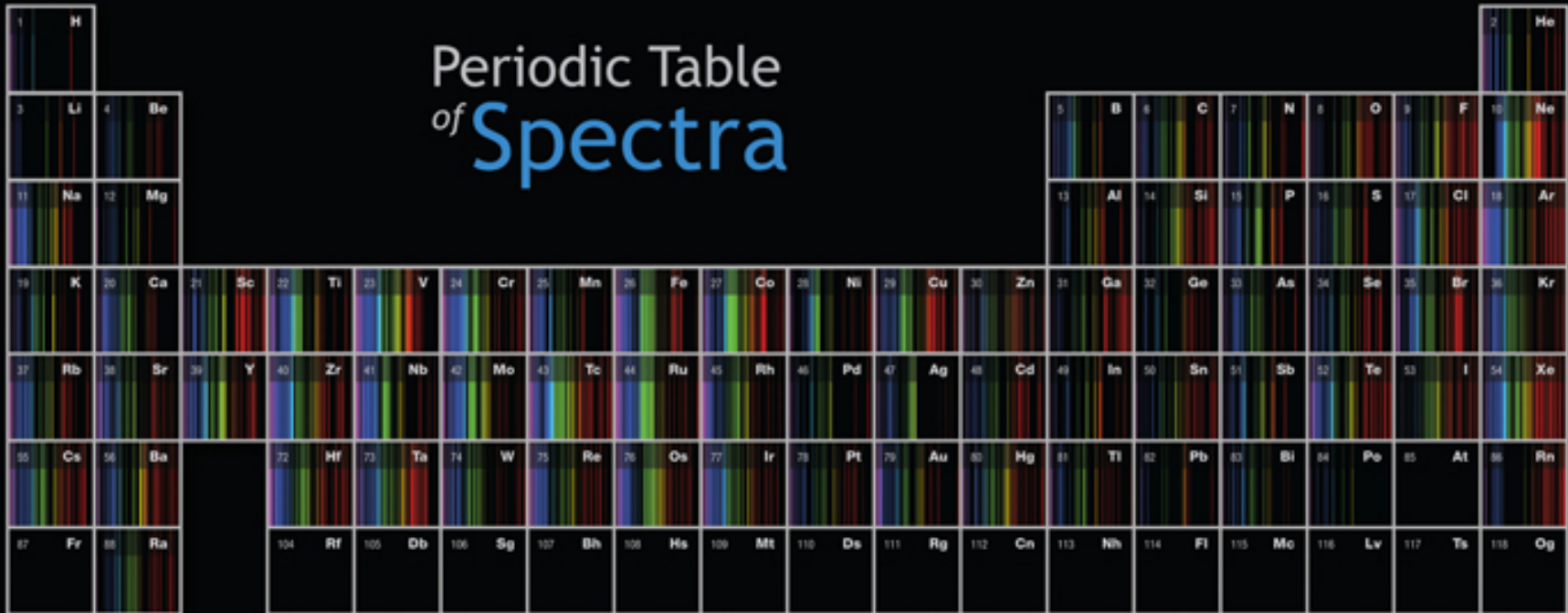
1868 – potvrzení Dopplerova jevu ve spektru hvězdy

1872 – 1. fotografický záznam spektra (spektrogram) hvězdy Vegy - **Henry Draper**



Dnes - v Pivnici (Toruń, Polsko)

Periodic Table of Spectra



Data is from the NIST Atomic Spectra Database.
 All data lines were synthesized as ~ 2.5 nm wide and equal in brightness for a given element.
 The wider lines that appear are a composite of multiple thin lines.
 Not all lines will be visible or of equal brightness or width in all laboratory settings.
 For more information, see fieldtestedsystems.com/table.

Spektrum hvězdy

- význam – rozdělení energie vyzařované hvězdou v závislosti na λ nebo ν

**Popis funkce rozdělení energie ve spektru
= základní úkol astrofyziky!**

Spektrum - informace o:

- zdroji záření,
- prostředí, kterým se záření šířilo od zdroje k pozorovateli.

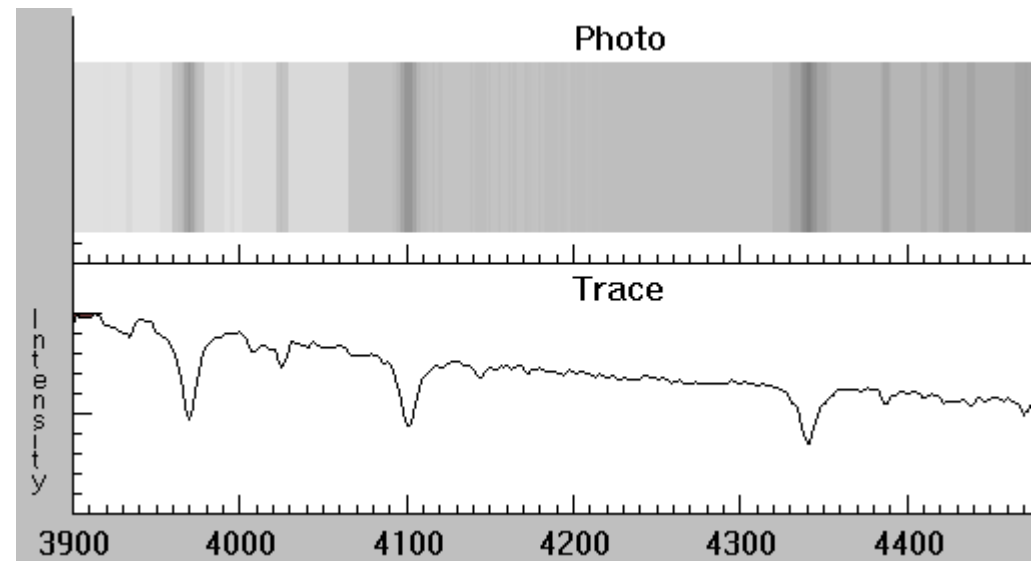
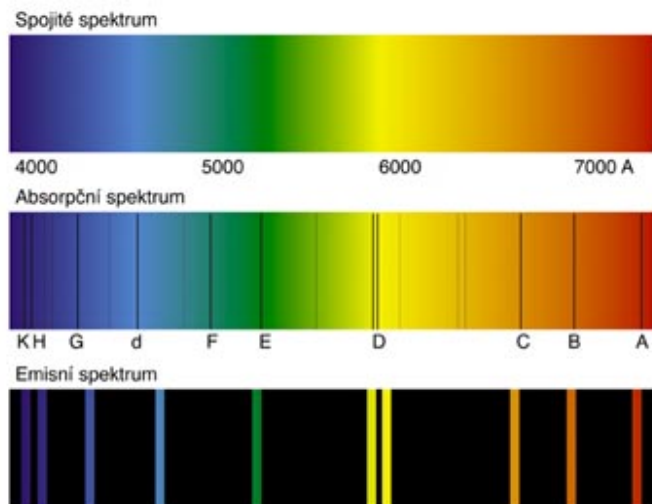
Každý prvek, atom, molekula – charakteristické skupiny spektrálních čar
nejjednodušší – vodík

Třídění spekter

Vzhled spektra:

- **spojité (kontinuum)** - světlý pásek od jednoho okraje spektra k druhému,
- **čárové** - množina čar či pruhů v místech s určitou vlnovou délkou.

spektrální čáry - *absorpční*
- *emisní*



Počátky spektroskopie hvězd

spektroskop

1862 - Angelo Secchi – počátek éry soustavného průzkumu hvězdných spekter – první pokus o spektrální klasifikaci

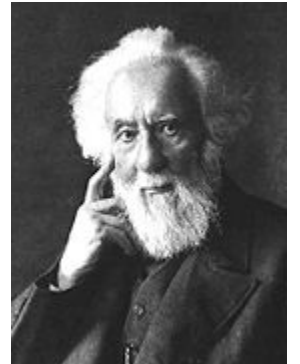
1862 - William Huggins - detailní studie vybraných hvězdných spekter



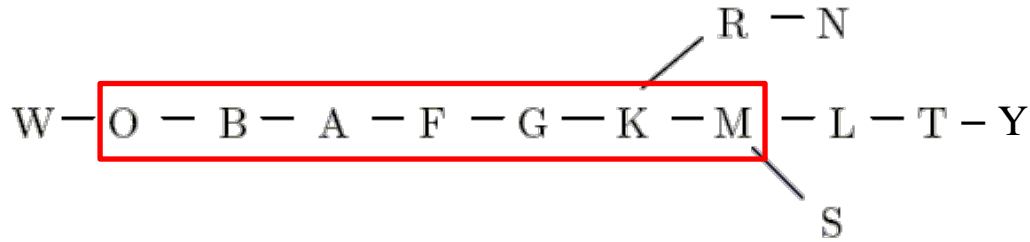
spektrograf - použití fotografie

19./20. st. - Edward Pickering a „jeho ženy“ – klasifikace spekter

- Anthonia Mauryová a Annie Cannonová – klasifikace půl milionu hvězdných spekter! => HD katalog



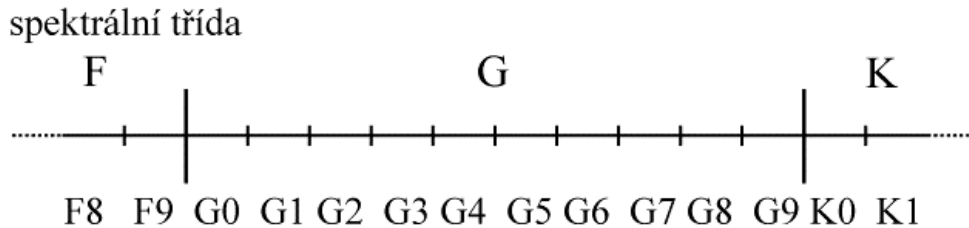
Harvardská spektrální klasifikace (spektrální třídy)



Posloupnost sp. tříd = teplotní posloupnost!

(nalevo jsou vyšší povrchové teploty)

Každá třída – 10 podskupin 0, 1, ..., 9

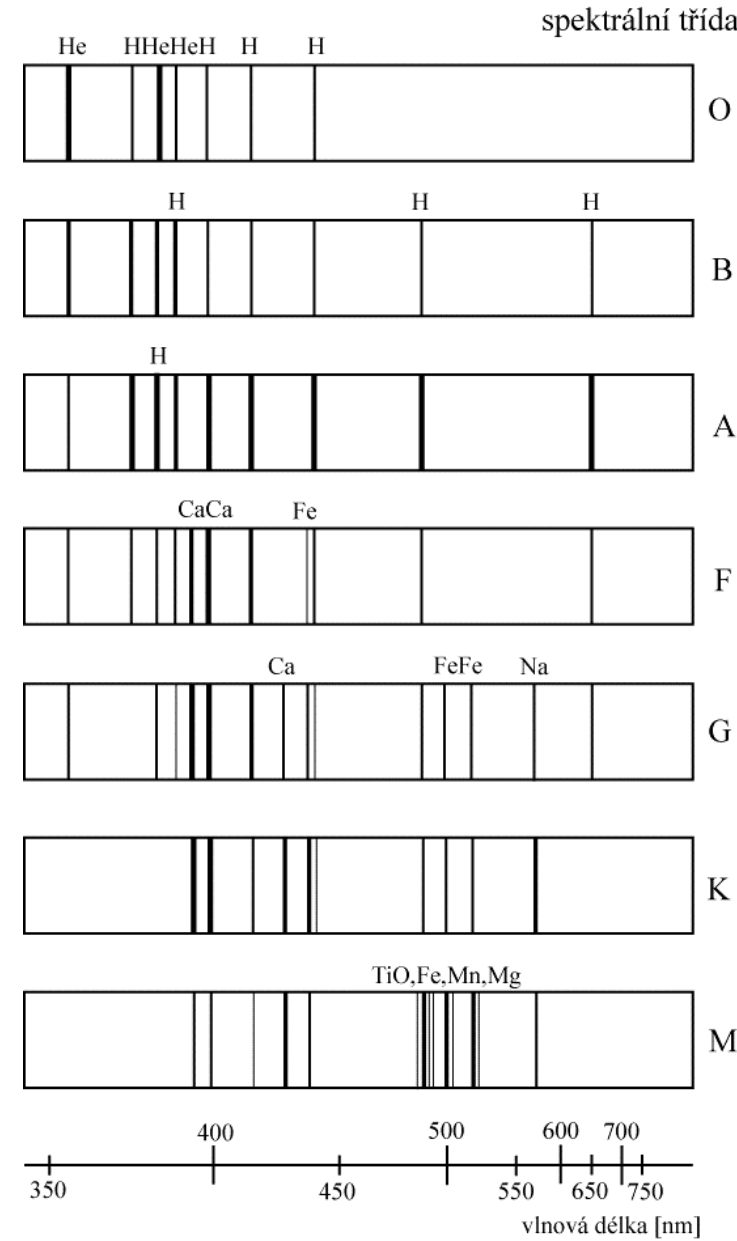


Doplňující označení:

e – emisní čáry (B4e),

p – pekuliární (tj. osobitý, zvláštní)

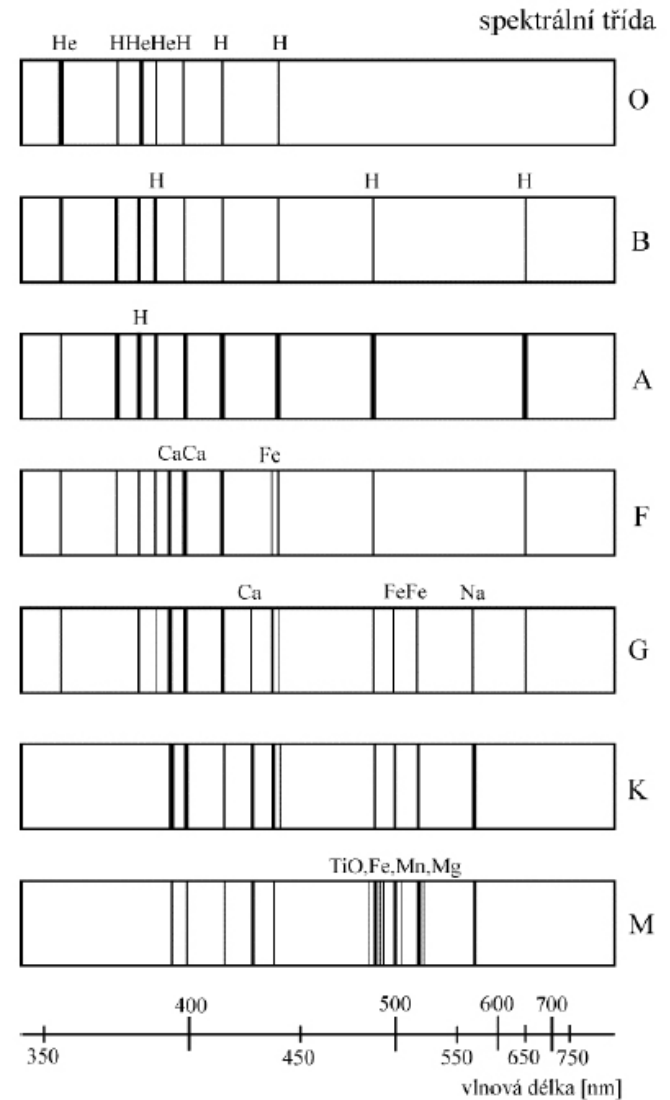
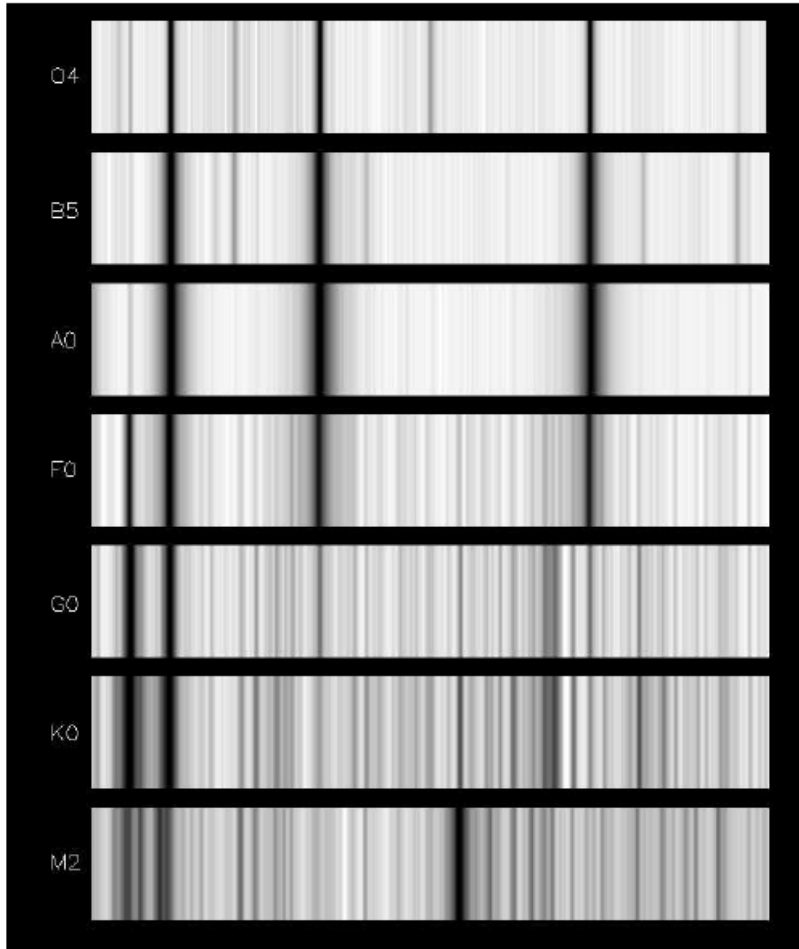
(A3p)

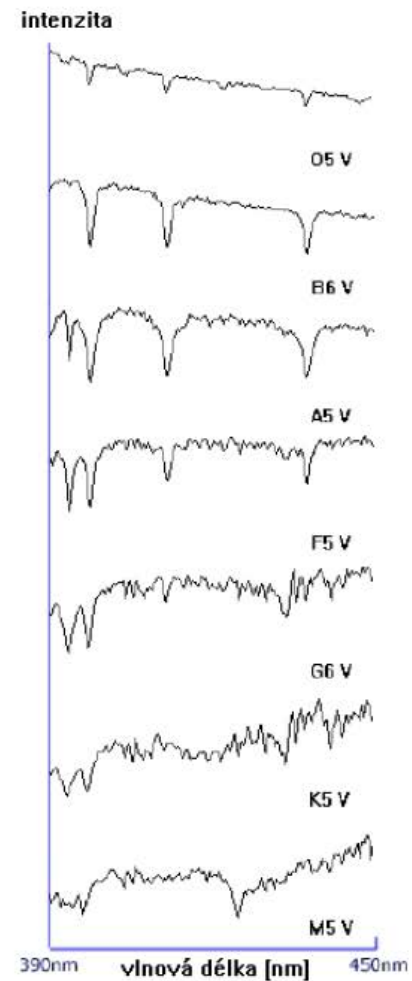
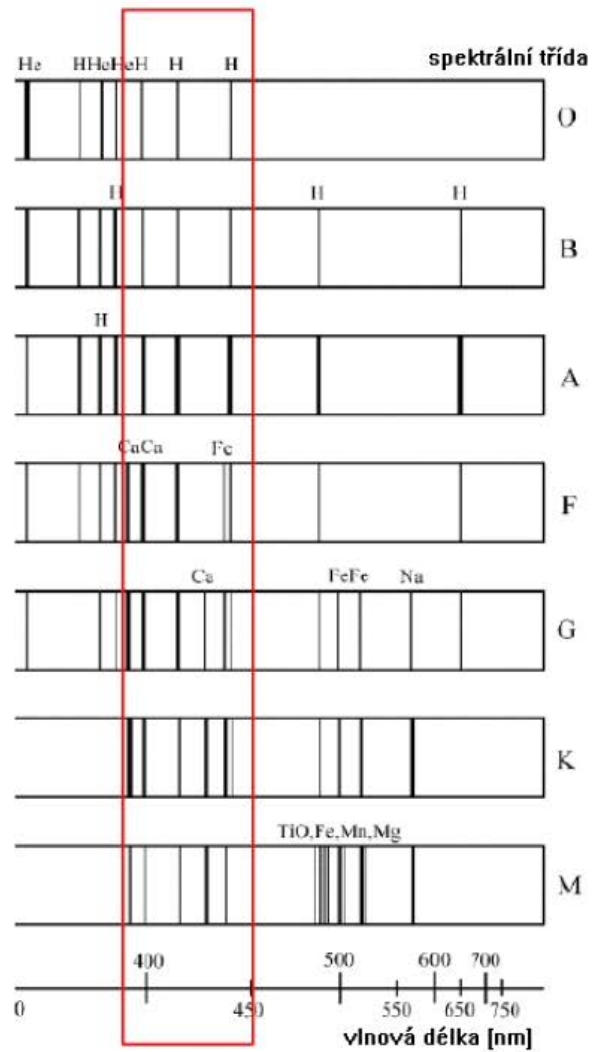
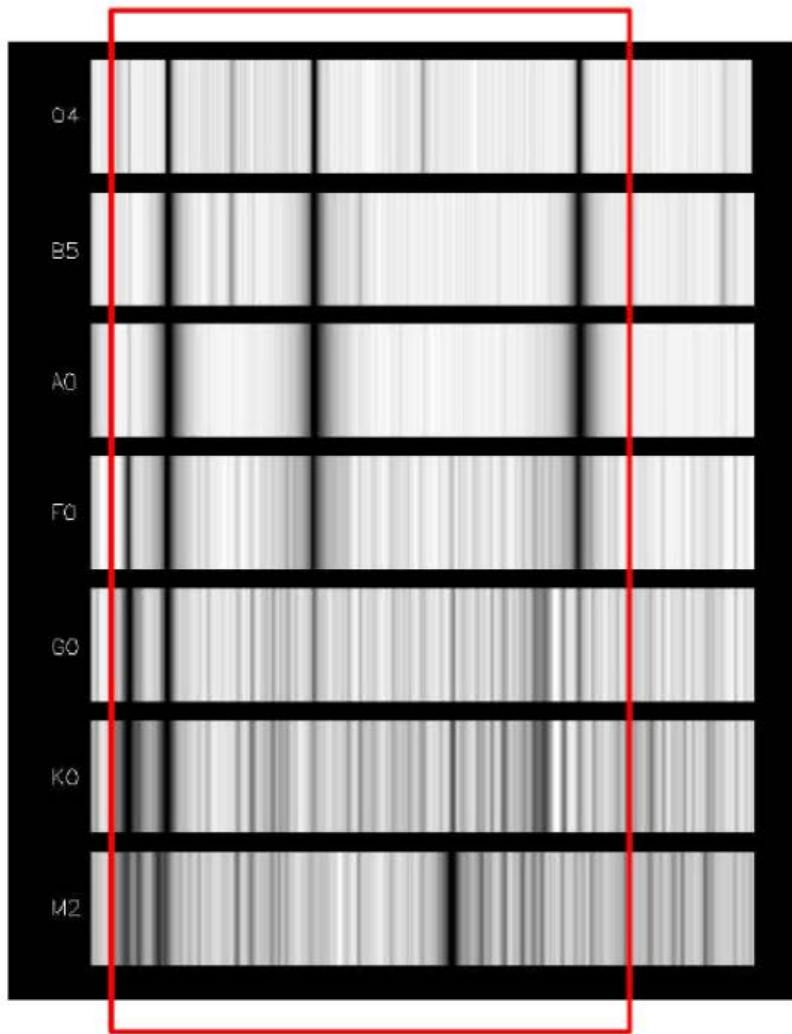


Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me
Olga Breci A Fnuka, Gustav Kraji Mrkev

Charakteristické čáry:

- O a B čáry helia, uhlíku a kyslíku,
- A čáry vodíku
- F a G čáry kovů, zejména železa
- K a M molekulární pásy





Spektrální třídy a povrchové teploty hvězd

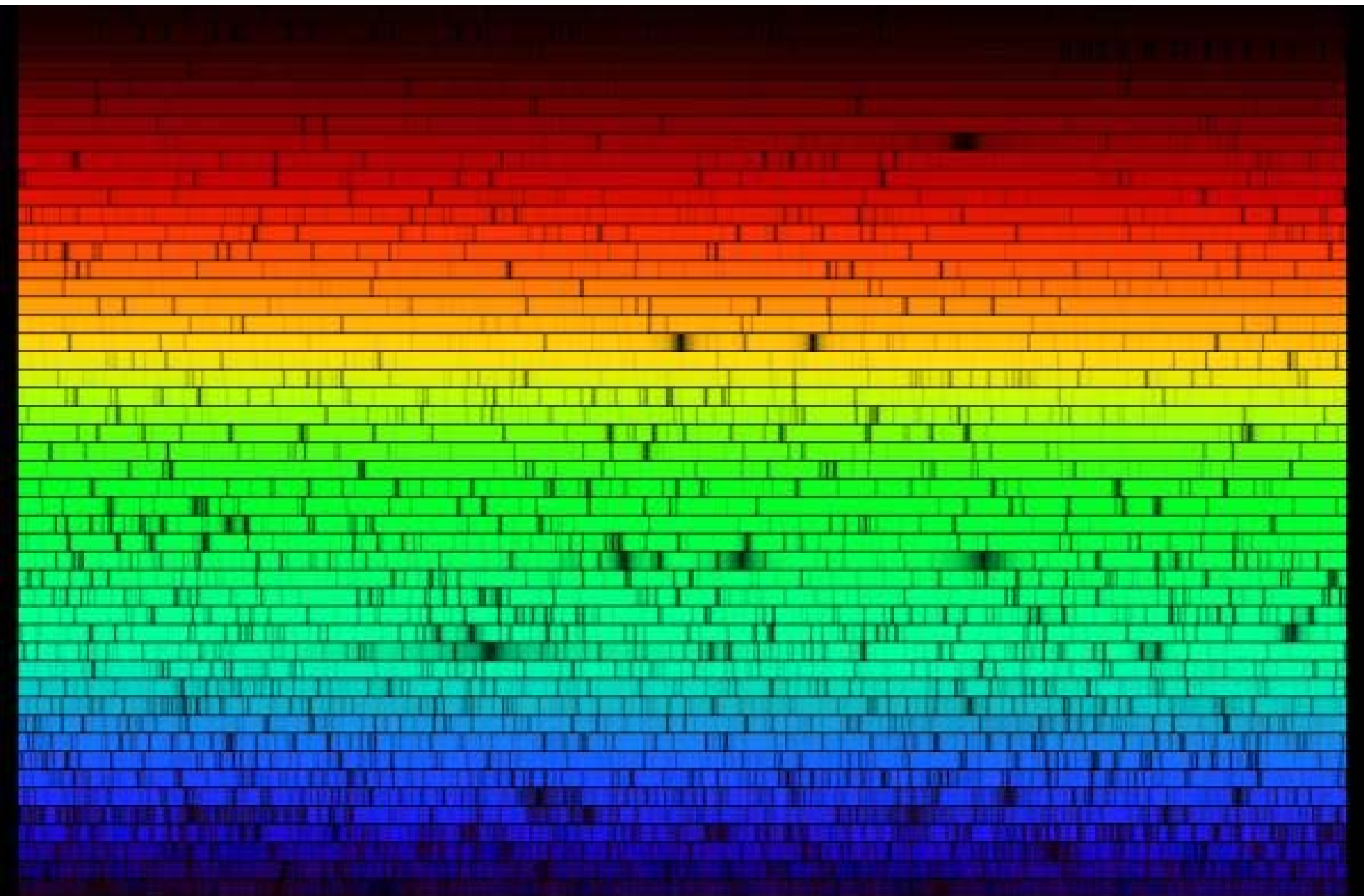
<i>Spektrální třída</i>	<i>Povrchová teplota hvězdy (přibližně)</i>	<i>Typičtí představitelé</i>
O	28 000 – 40 000 K	ζ Pup, λ Ori, ξ Per, λ Cep
B	10 000 – 28 000 K	ε Ori, α Vir, γ Per, γ Ori
A	7000 – 10 000 K	α CMa, α Lyr, γ Gem
F	6000 – 7000 K	δ Gem, α CMi, α Per, α Pup
G	5000 – 6000 K	Slunce, α Aur, β Hyi
K	3500 – 5000 K	α Boo, β Gem, α Tau
M	2500 – 3500 K	α Ori, α Sco, o Cet

Hvězdy rané a pozdní

původní úvaha: teplotní posloupnost je i posloupností vývoje => hvězda vzniká jako žhavé a zářivé těleso, postupně chladne, zahušťuje se a vyhasíná => spektrální třídy O, B a A **rané** x třídy K a M (někdy i F a G) **pozdní**.

ÚVAHA NEPLATÍ ale označení se používá!

Sluneční spektrum s vysokým rozlišením



Zlomyslnosti spekter

1. výběrové efekty

např. jaká jsou nejčetnější spektr. třídy?
mezi nejjasnějšími hvězdami – nejvíce
spektrální třídy A až K.

X

mezi všemi hvězdami v okolí Slunce –
- nejvíce spektrální třídy M!

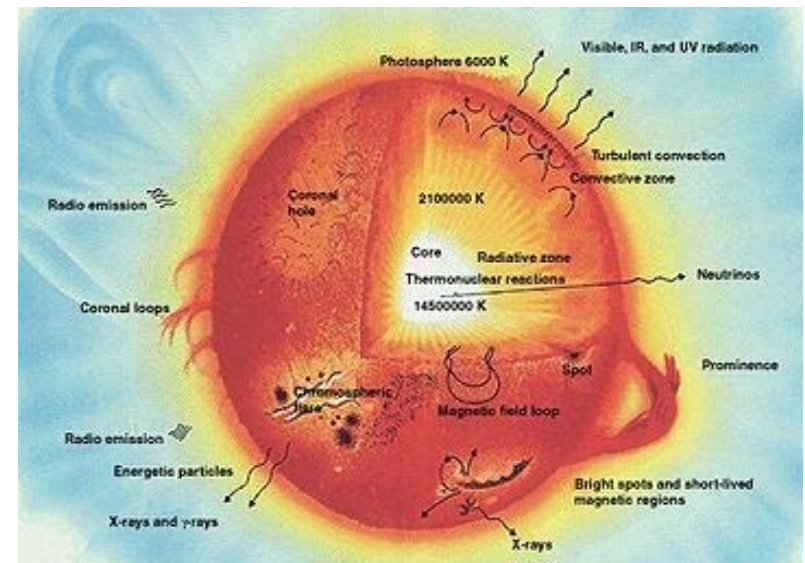
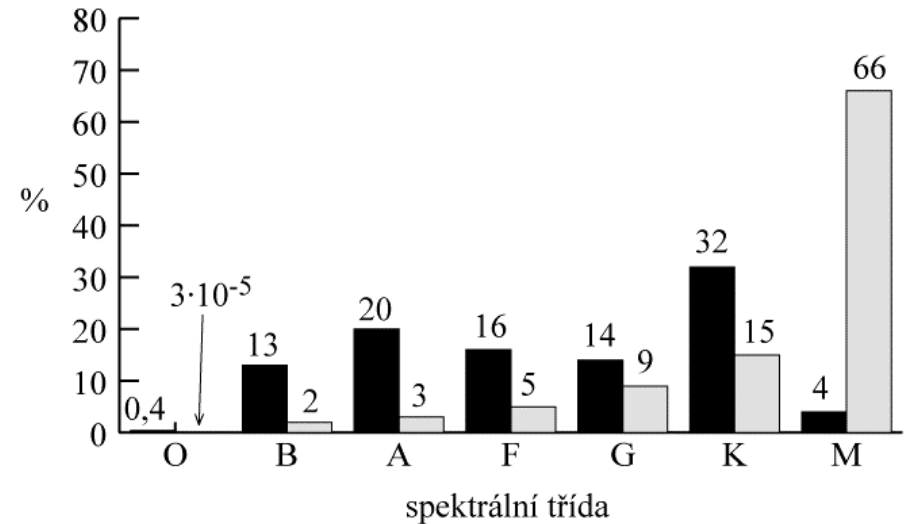
2. složení hvězdy

čáry ve spektru ukazují chemické
složení hvězdy

NEPLATÍ!

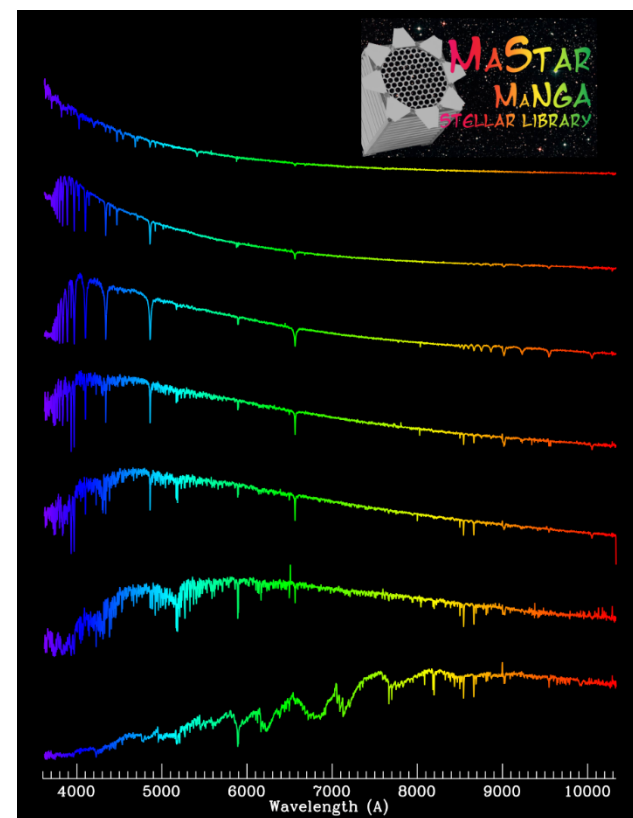
ukazují fyz. podmínky a chemické
složení látky v místě vzniku záření
(tenká fotosféra)

■ pozorované četnosti (hvězdy jasnější než $m = 8,0$ mag)
□ skutečné četnosti (hvězdy jasnější než $M = 14,5$ mag)

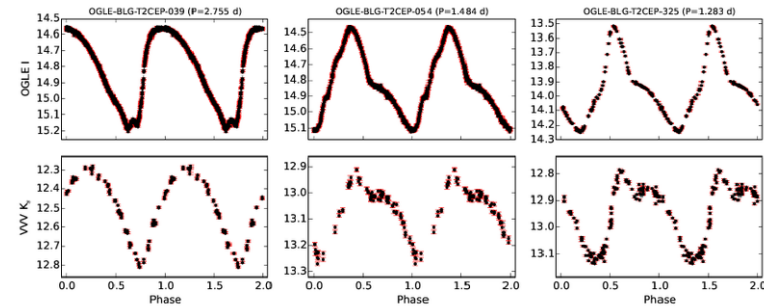
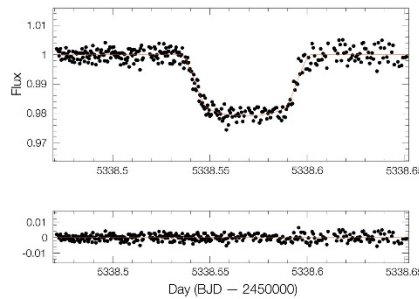


Proč studujeme spektra hvězd?

- Složení atmosfér hvězd
- Rotace hvězd, určení rychlosti rotace
- Studium skvrn na povrchu hvězd
- Určení vzájemné rychlosti hvězda – pozorovatel
- Studium hvězdného větru
- Detekce dvojhvězd ve spektru, určování radiálních rychlostí složek
- Detekce exoplanet z měření radiálních rychlostí, zkoumání atmosfér exoplanet



Fotometrie



fotometrie = *fotos* (světlo) + *metron* (míra, měřit) - část fyziky zabývající se měřením světla; zkoumáním hustoty světelného toku

radiometrie – obecnější, zkoumání hustoty toku záření

fotometrická měření – jedna z nejstarších měření vůbec!

nejstarší katalog fotometrických dat – 129 př.n.l. – Hipparchos

(asi 190 – asi 125 př. n. l.) - více než 850 hvězd (1080?),

originál se nedochoval





Schaefer (2005)

Farneseův atlas



zhotoven podle
ztraceného
Hipparchova katalogu!

Fotometrie



kolem r. 150 n.l. – Klaudios Ptolemaios – Almagest, součástí aktualizovaný Hipparchův katalog - nejstarší soubor fotometrických dat; 1022 hvězd v 6 skupinách – *velikostech*

základ stupnice jasností hvězd odpovídající Weberovu-Fechnerovu psychofyzickému zákonu (podněty se mění exponenciálně, ale pocity lineárně)

$$dS = k \cdot \frac{dI}{I}$$

$$S = k \cdot \ln \frac{I}{I_0}$$

S – intenzita subjektivního vjemu;

k – konstanta;

I – fyzikální intenzita podnětu působícího na receptor;

I_0 – prahová intenzita, tedy absolutně nejnižší možná intenzita, jakou je schopný jedinec vnímat.

Pogsonova rovnice

hvězdné velikosti - *rozdíly pocitů* při pozorováních hvězd lišících se o jednu třídu jsou stejné => např. jasnosti hvězd 1. a 2. velikosti se od sebe liší stejně jako hvězdy 5. a 6. velikosti.

$$j_1/j_2 = j_2/j_3 = \dots = j_5/j_6 = \rho,$$

j_i - jasnosti hvězd i -té velikosti a ρ kvocient geometrické řady

18. a 19. století – různé katalogy hvězd $\rho = 2,3$ až $2,8$

1856 - Norman Pogson – návrh $\log \rho = 0,4$ (přesně), tedy $\rho = 2,512\dots$

Obecně:

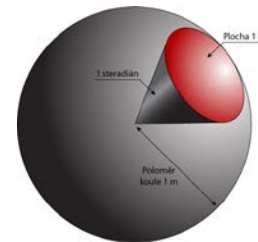
$$j_m = j_n \rho^{(n-m)}, \text{ resp. } n - m = 2,5 \log (j_m/j_n) \quad \textbf{Pogsonova rovnice}$$

(m, n jsou hvězdné velikosti v mag)

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{j_1}{j_2}$$



Astronomie – historický přístup k fotometrickým veličinám - ale - znalost současných pojmů nutná!



Slovníček pojmů z fotometrie

steradián (srad) – prostorový úhel, který s vrcholem ve středu koule vytíná na povrchu této koule plochu s obsahem rovným druhé mocnině poloměru koule.

zářivý tok – výkon přenášený zářením, které prochází v určitém místě prostoru danou plochou [1 W]

hustota zářivého toku – zářivý tok plochou/průmět té plochy do směru kolmého na směr šíření záření [W/m^2]

zářivost (bodového zdroje světla v daném směru) – část zářivého toku vycházející ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu dělený velikostí tohoto prostorového úhlu [1 W/srad]

svítivost (bodového zdroje světla v daném směru) – část svět. toku ze zdroje v daném směru do malého prostorového úhlu dělený velikostí tohoto prostorového úhlu; **kandela (1 cd)**

Nová definice: Kandela, značka „cd“, je jednotka svítivosti v SI. Je definována fixováním číselné hodnoty světelné účinnosti monochromatického záření o frekvenci 540×10^{12} Hz, K_{Cd} , rovné 683, je-li vyjádřena v jednotkách $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, což se rovná $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$ nebo $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány ve smyslu h , c a $\Delta\nu_{\text{CS}}$.

jas – svítivost plošky povrchu zdroje ve směru pozorování/kolmý průmět této plošky do tohoto směru [$1 \text{ cd}/\text{m}^2$]

světelný tok – charakterizuje intenzitu zrakového vjemu lidského oka, který je vyvolán zářivým tokem; **lumen [1 lm]** – jednotka světelného toku; bodový světelný zdroj vysílá do prostorového úhlu 1 srad světelný tok 1 lumenu, je-li svítivost tohoto zdroje (ve všech směrech) rovna 1 cd.

hustota světelného toku – světelný tok plochou/průmět této plochy do směru kolmého na směr šíření světla [lm/m^2]

osvětlení (intenzita) – svět. tok dopadající na sledovanou plošku povrchu/velikost této plošky;

1 lux [lx] – jednotka osvětlení; 1 lux je osvětlení plochy, na jejíž každý m^2 dopadá rovnoměrně rozložený svět. tok 1 lm

Jasnost a hvězdná velikost

Jasnost hvězdy = osvětlení, které tato hvězda vyvolává v místě, kde je pozorovatel (vliv ovzduší se neuvažuje!); fyzikální jednotka jasnosti – lm/m^2 (lx)
v astronomii – *hvězdná velikost*

definice: $m = -2,5 \log (j/j_0)$

jednotka - *magnituda* (mag)

j jasnost, j_0 jasnost objektu s nulovou hvězdnou velikostí (osvětlení $2,54 \cdot 10^{-6}$ lx);

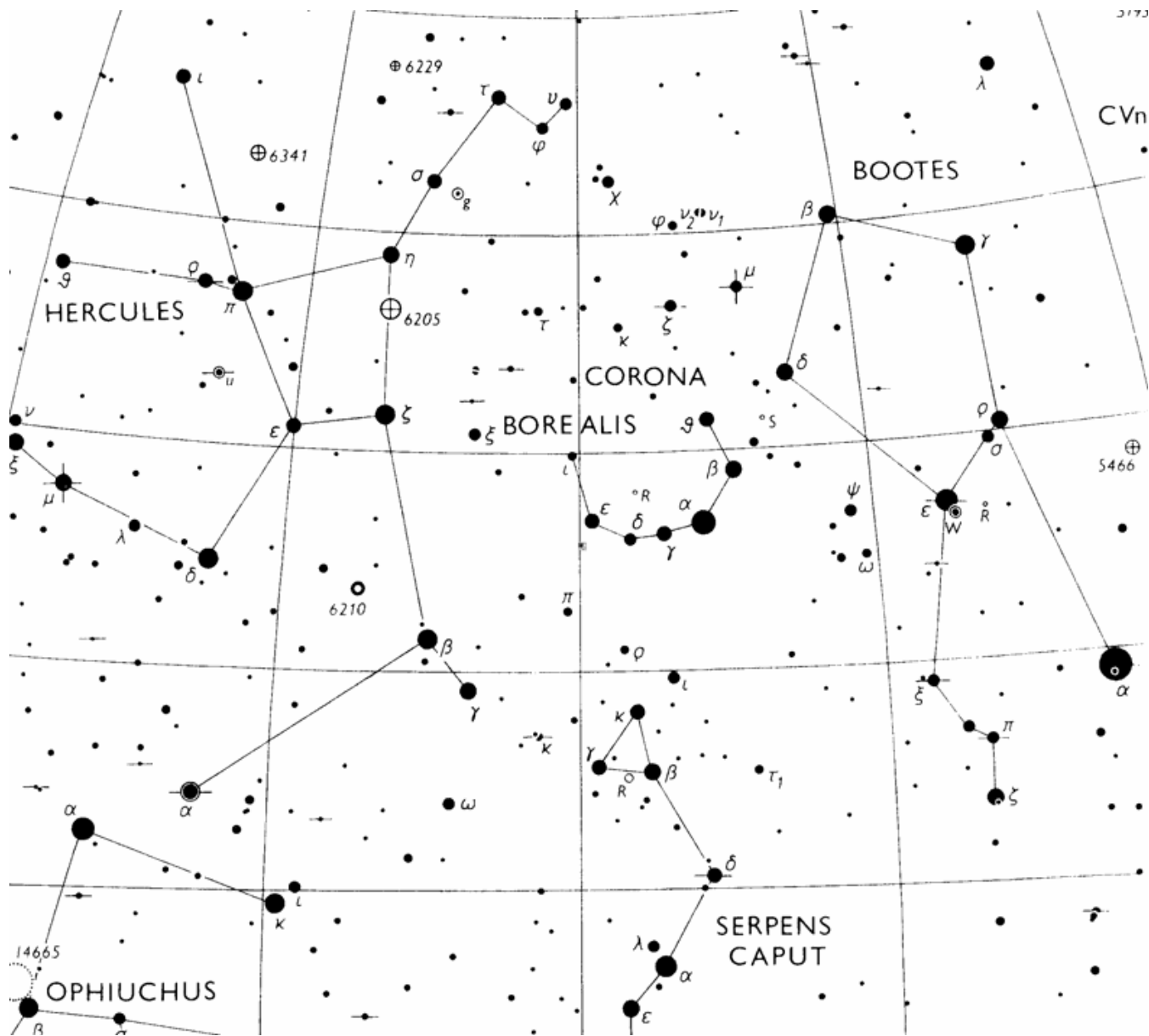
- POZOR: 1. *zmenšuje-li* se hodnota hvězdné velikosti, jasnost objektu *roste!*;
2. nezaměňujte název veličiny (hvězdná velikost) a jednotky (magnituda);
3. z definice hv. velikosti => je-li jasnost hvězdy *100krát* menší než jasnost jiného objektu, je rozdíl hvězdných velikostí *přesně 5 magnitud!*
(rozdíl jasností 2 objektů lišících se o 1 mag je 5. odmocnina ze sta ...2,512..).

Hvězdné velikosti některých objektů

<u>Kosmický objekt</u>	<u>Hvězdná velikost</u>
Slunce	−26,7 mag
Měsíc v úplňku	−12,7 mag
Venuše při největší jasnosti	−4,7 mag
Sirius	−1,5 mag
Vega	0,0 mag
nejslabší hvězdy viditelné pouhýma očima	6 mag
nejslabší hvězdy pozorovatelné triedrem	asi 10 mag
nejslabší objekty pozorovatelné dalekohledem na Zemi	asi 28 mag, 36 mag (E-ELT)
nejslabší objekty pozorovatelné kosmickým dalekohledem	31.5 mag

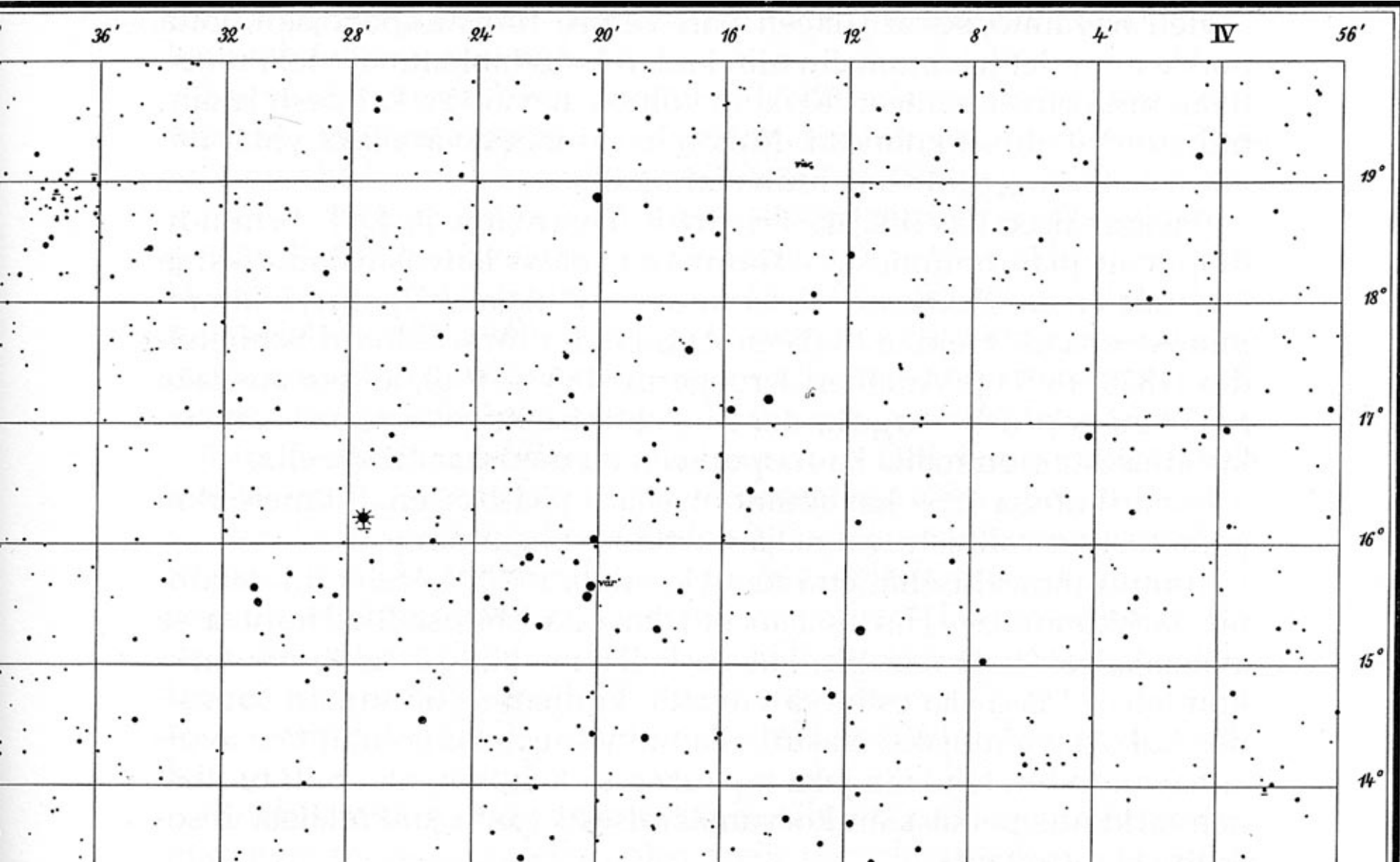
Viditelné prostým okem bez dalekohledu	Pozorovaná hvězdná velikost [mag]	Relativní jasnost vzhledem k hvězdě Vega	Počet hvězd jasnějších než udaná hvězdná velikost
Ano	-1	250%	2
	0	100%	4
	1	40%	15
	2	16%	48
	3	6.3%	171
	4	2.5%	513
	5	1.0%	1 602
	6	0.40%	4 800
Ne	7	0.16%	14 000
	8	0.063%	42 000
	9	0.025%	121 000
	10	0.010%	340 000

Záznam hvězdných velikostí v atlasech

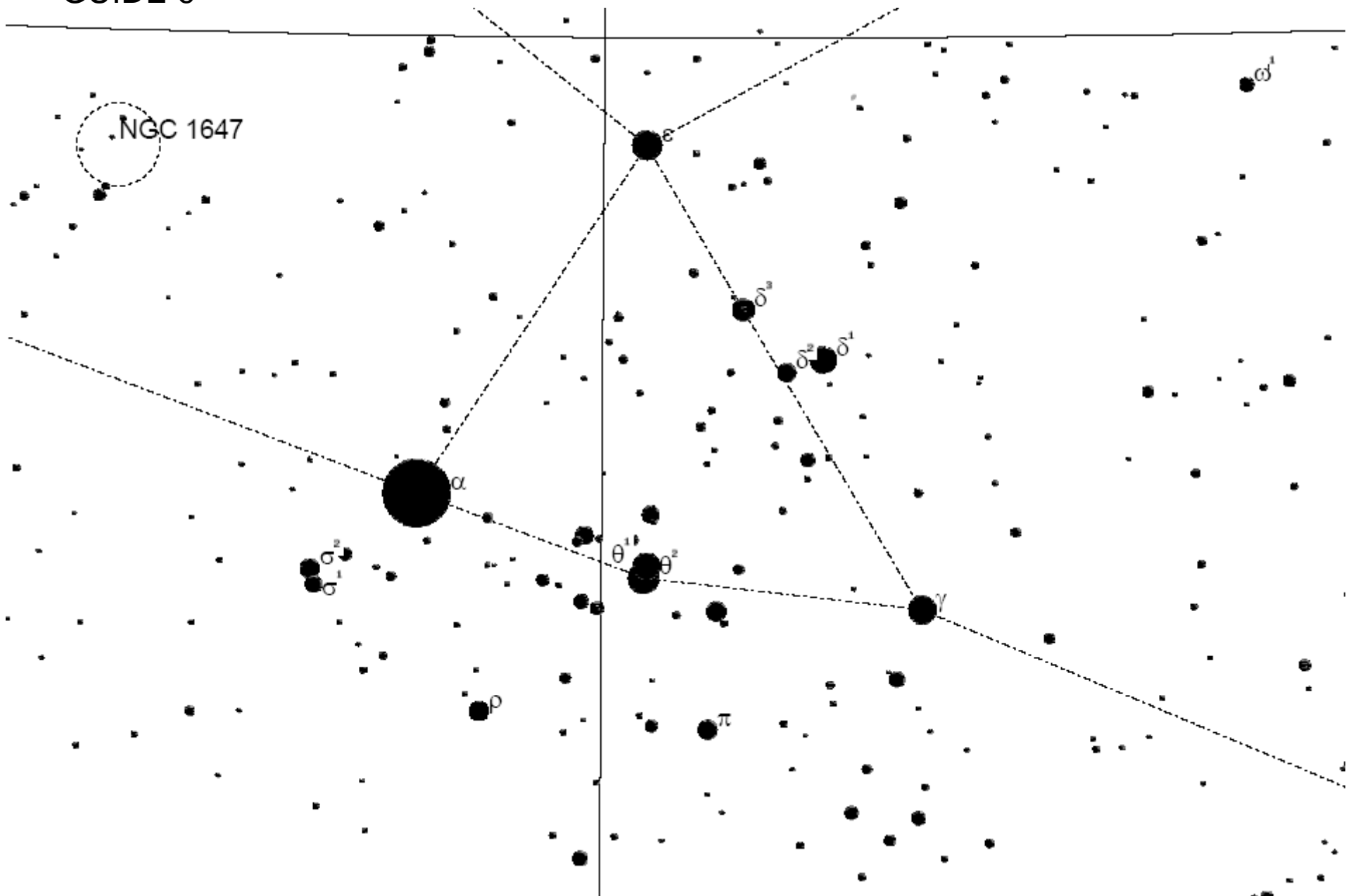


průměr kotoučku hvězdy odpovídá intervalu hvězdných velikostí

Bonner Durchmusterung



GUIDE 9



Vizuální a jiné ...

Pogsonova rovnice platí obecně, nejen ve vizuální oblasti spektra

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2} \quad \text{resp.} \quad \frac{F_1}{F_2} = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

F_1, F_2 – hustoty toku záření

měření hustoty toku záření F v celém spektru = *bolometrické* $\Rightarrow F_{\text{bol}}$

zářivý výkon zdroje L (=množství energie vyzářené zdrojem za 1 s)

$$L = 4\pi r^2 F_{\text{bol}}$$

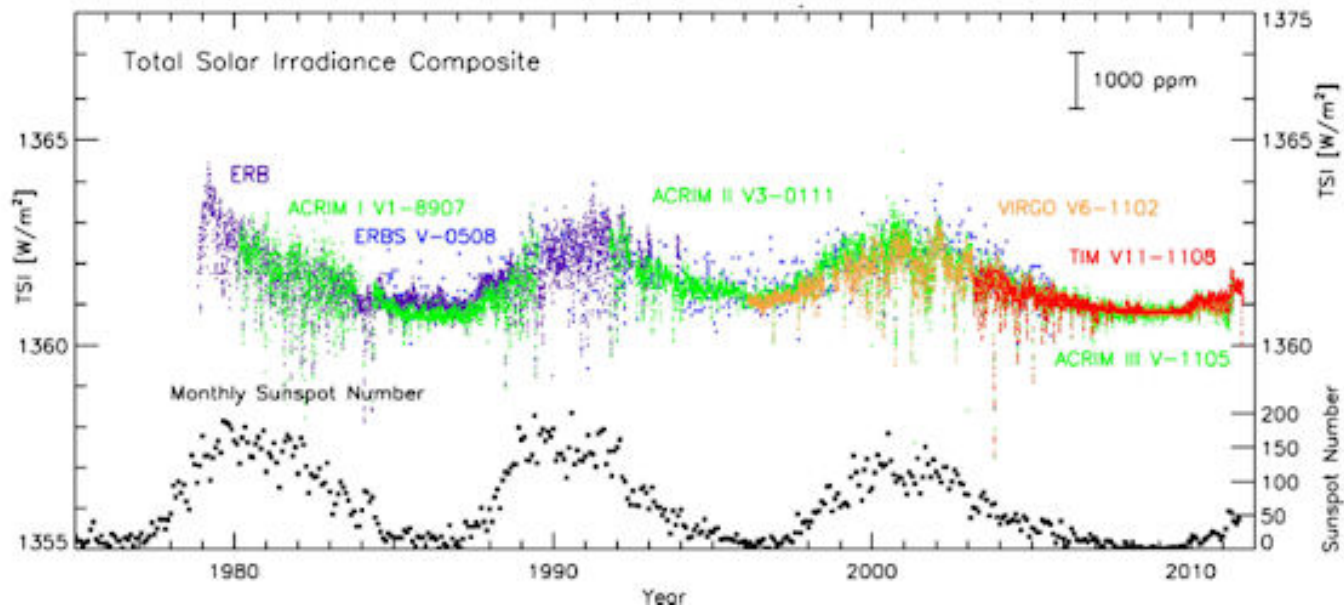
$$L = 4\pi r^2 F$$

Stefanův-Boltzmannův zákon

bolometr – přístroj pro měření slabého záření v celém rozsahu elmg. spektra
– měření mimo zemskou atmosféru, na Zemi zkreslené;
princip měření – změna vodivosti zlatého nebo platinového proužku; záření pohlcené proužkem zvýší jeho teplotu, změní se odpor a tím i naměřený proud...;
dnes - termistory

1. bolometr – Samuel Pierpont Langley (kolem 1880)

ale pro Slunce – 1. bolometrická měření - Claude Pouillet 1837-8 (pyrheliometr)
tok slunečního záření, procházející plochou 1 m^2 za 1 s
= hustota toku slunečního záření
= bolometrická jasnost Slunce



Absolutní jasnost, absolutní hvězdná velikost

jasnost závisí na vzdálenosti hvězd => pro poměrování hvězd je třeba přesunout hvězdy do stejné nominální vzdálenosti – 10 pc

absolutní jasnost hvězdy = jasnost, kterou by měla hvězda sledovaná ze vzdálenosti 10 pc

absolutní hvězdná velikost = hvězdná velikost, kterou by měla hvězda sledovaná z 10 pc

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{F_1}{F_2} \Rightarrow m_1 - m_2 = -2.5 \log \frac{\frac{L}{4\pi r_1^2}}{\frac{L}{4\pi r_2^2}} \Rightarrow m - M = -5 \log \frac{r_2}{r_1} \Rightarrow$$

$(m - M)$ – modul vzdálenosti $m - M = -5 + 5 \log r$

vztah mezi pozorovanou hvězdnou velikostí m a absolutní hvězdnou velikostí M

$$M = m + 5 + 5 \log \pi = m + 5 - 5 \log r$$

π - paralaxa hvězdy (v úhlových vteřinách), r - vzdálenost (v parsecích)

$$m - M = 5 \log r - 5$$

modul vzdálenosti

$(m - M)$ -5 0 5 10 15 20 25 30 35 40 [mag]

vzdálenost r 1 10 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 [pc]

1 kpc

1 Mpc

1 Gpc

Barvy v astronomii

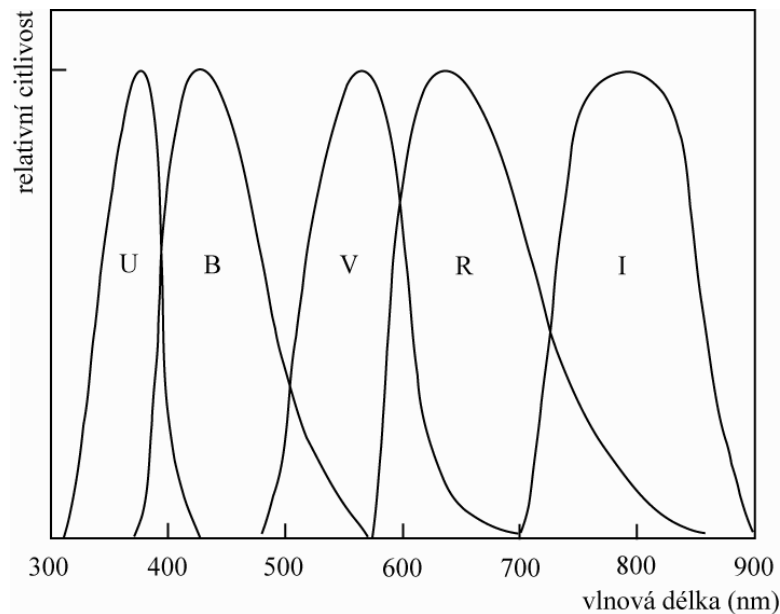
odvození hvězdných velikostí - ve vizuální části spektra, ale lze využít i v jiných vymezených částech spektra v tzv. *barvách*

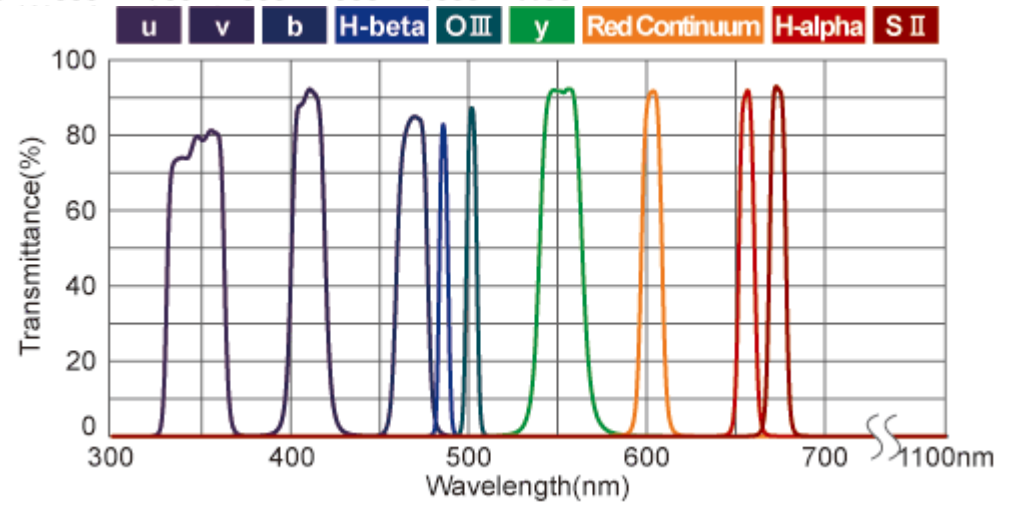
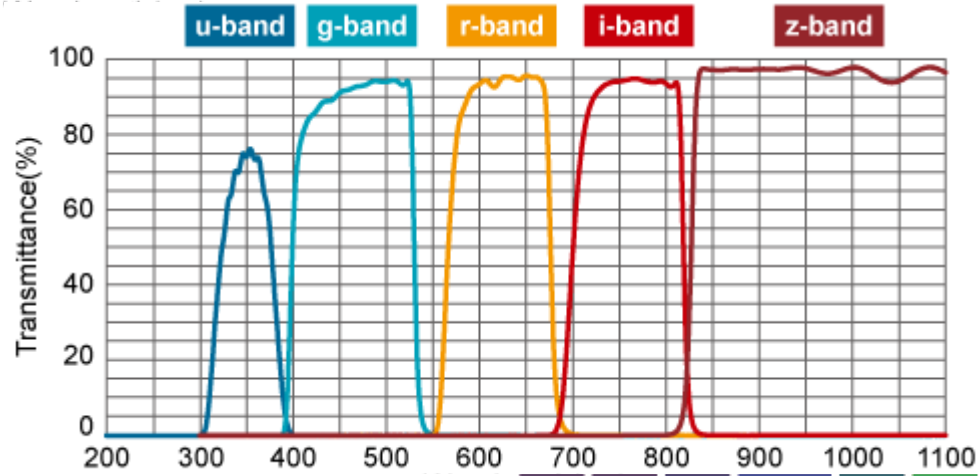
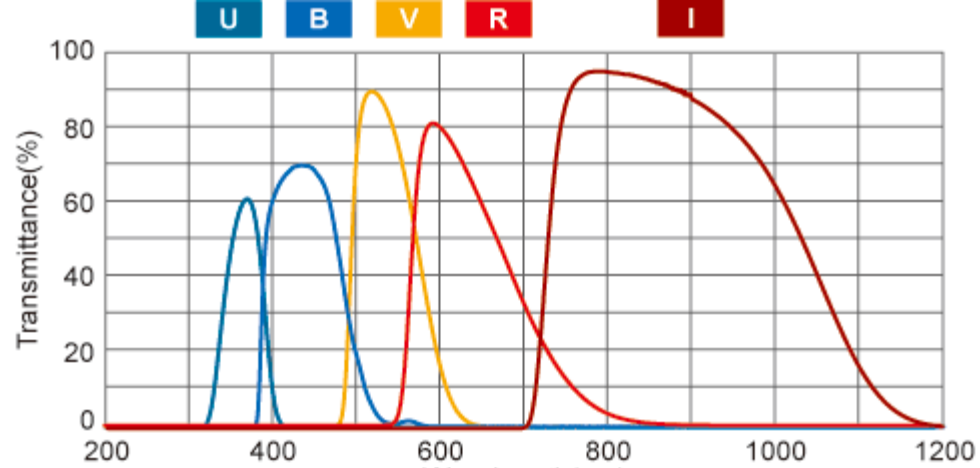
více „barev“ => *barevný systém* – existuje více než 200 barevných systémů,

nejrozšířenější Johnsonův *UBV* systém, dnes *UBVRI*

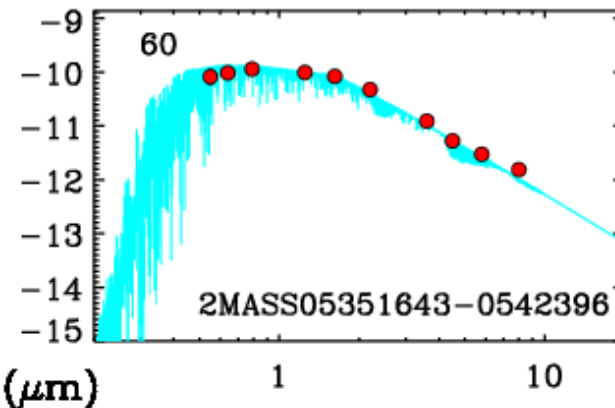
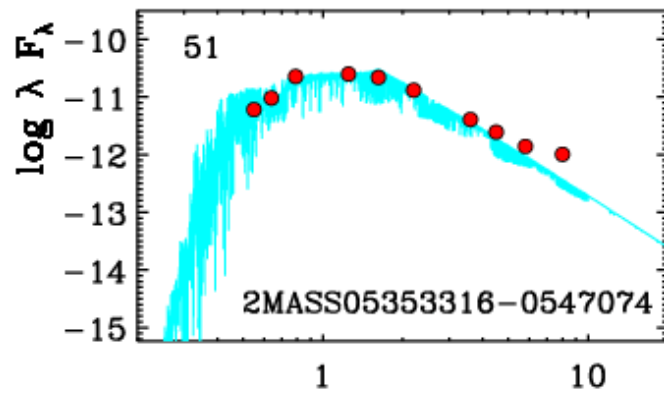
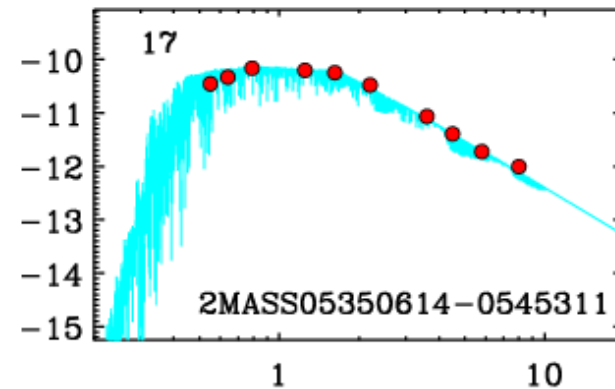
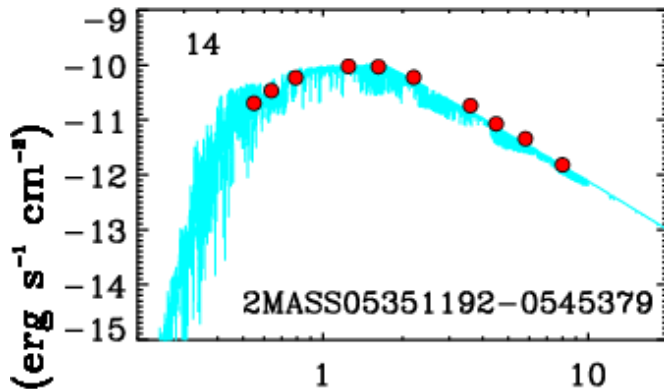
U (ultraviolet), *B* (blue), *V* (visual), *R* (red), *I* (infrared)

široko-, středně-, úzkopásmové systémy





Proč odmítáme některé fotony?



fotometrie v několika oborech spektra = náhrada spektroskopie

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$$

barevný index – rozdíl hvězdných velikostí ve dvou barvách,
 např. $(B-V) = m_B - m_V = M_B - M_V$

K čemu je měření barevných indexů dobré?

charakteristiky hvězd – povrchová teplota, metalicita ...

Barevný index hvězdy $(B-V) \sim +1 \text{ mag} \Rightarrow$ chladná nebo žhavá hvězda???

vliv mezihvězdného prostředí \Rightarrow mezihvězdná extinkce A

objekty se jeví červenější než stejné objekty v malé vzdálenosti od nás; velikost

zčervenání – **barevný exces** $E_{B-V} = (B - V)_{\text{pozorovaný}} - (B - V)_{\text{skutečný}}$

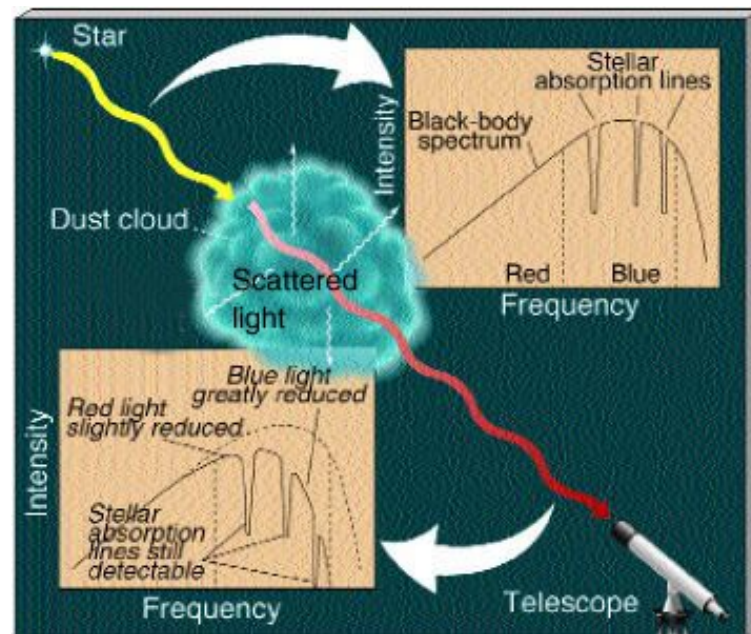
Mezihvězdná extinkce A_V v barvě V [mag]

$$A_V = -2.5 \log \frac{\text{zeslabený tok}}{\text{původní tok}} =$$

= hvězdná velikost zeslabená – hv.v. původní

Typicky v naší Galaxii $A_V = 3.1 E(B-V)$,

ale koeficient může být mezi 2.5 až 6



Bolometrické veličiny

bolometrická jasnost (hvězdná velikost) = jasnost (hv. velikost) v *celém* spektru
měří se bolometrem

bolometrická korekce $BC = m_{\text{bol}} - m_{\text{viz}} = M_{\text{bol}} - M_{\text{viz}}$

Bolometrická korekce BC není zanedbatelná!,

absolutní *bolometrická* hvězdná velikost M_{bol} je mírou zářivého výkonu hvězdy

