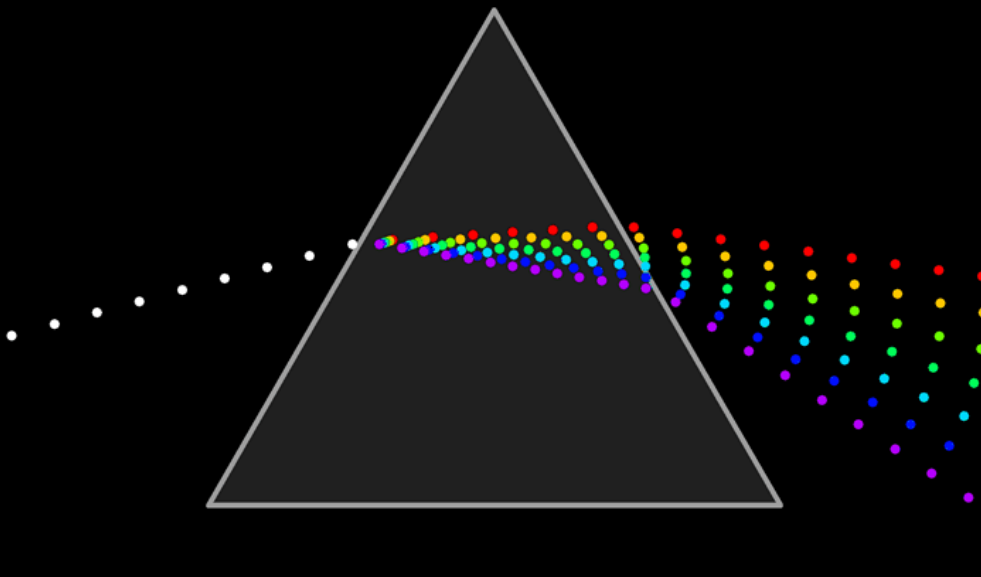


Spektroskopie a fotometrie

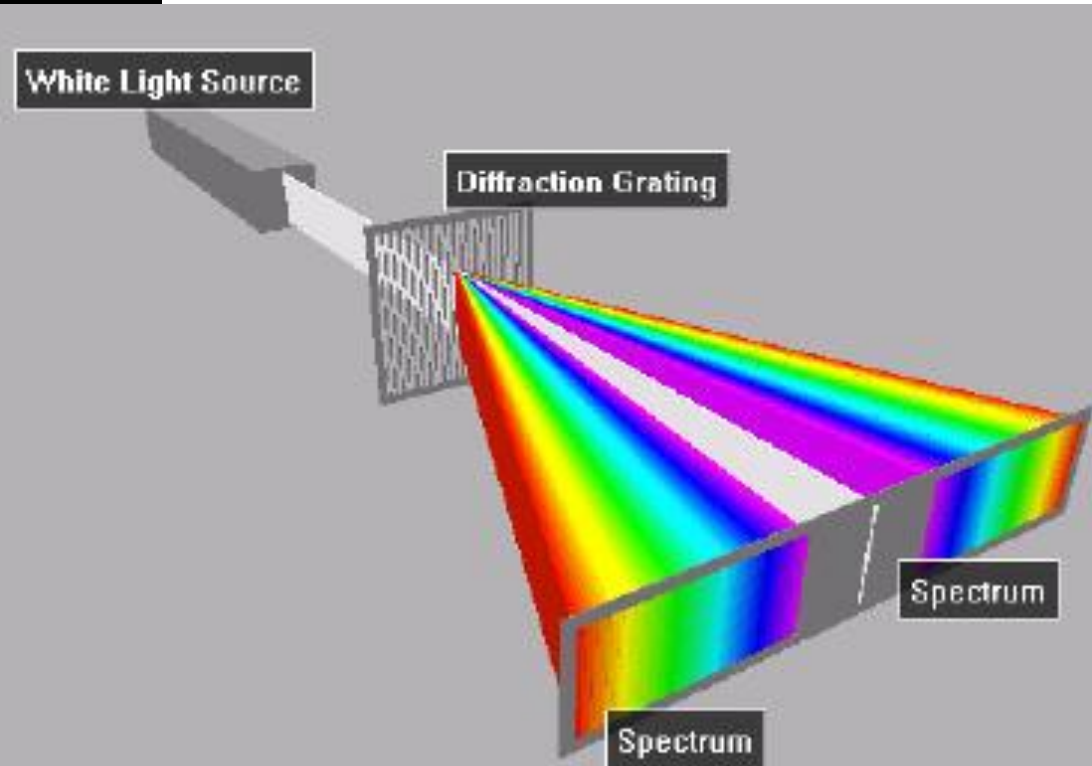




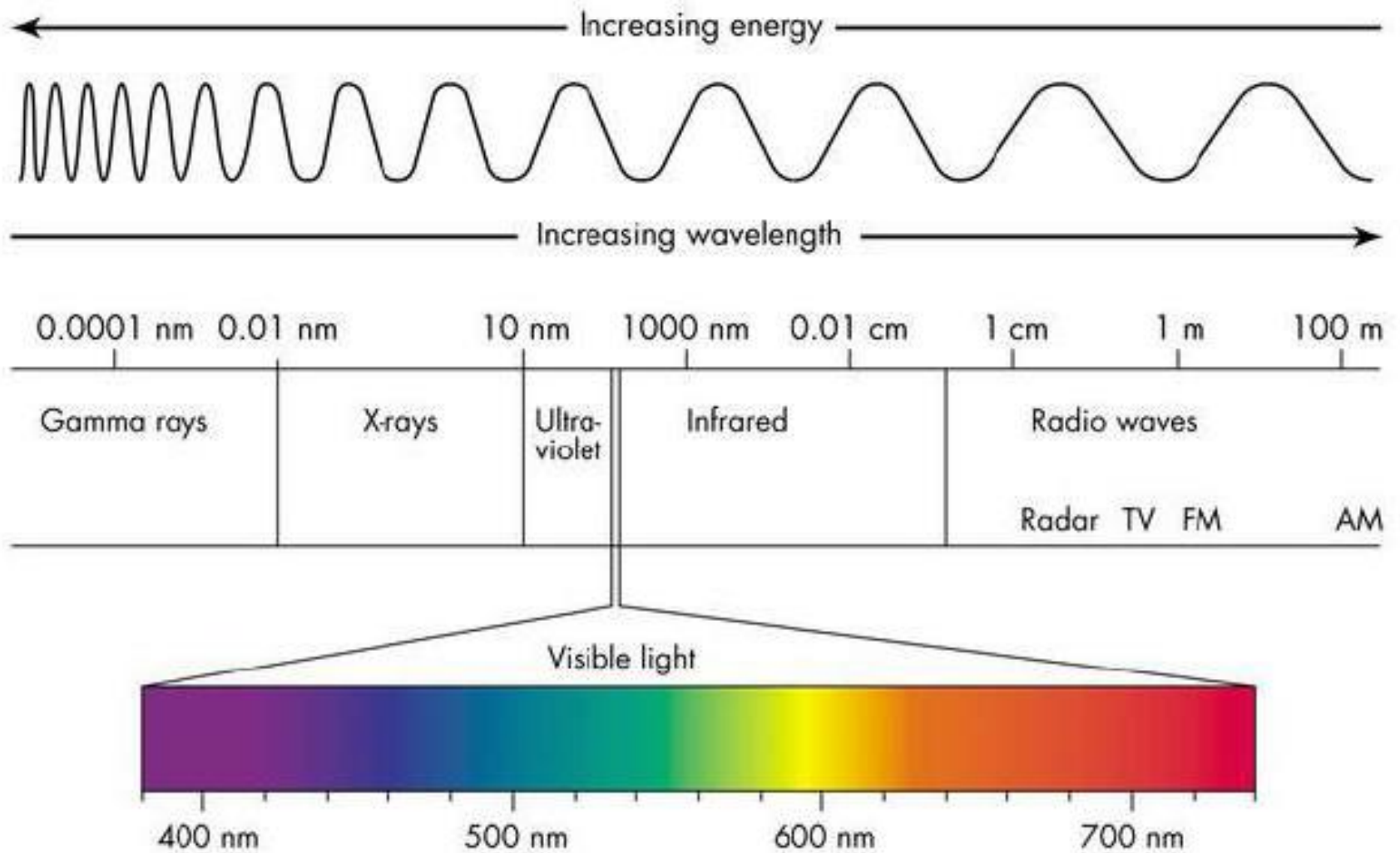
rozklad bílého světla pomocí hranolu

Spektrum

rozklad bílého světla pomocí mřížky



Spektrum



Spektrum – dějiny v kostce

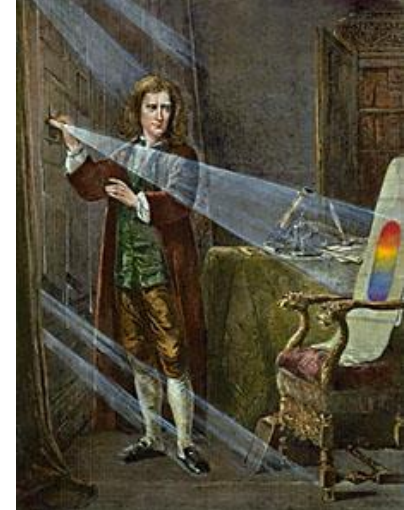
1665 Isaac Newton - rozklad slunečního světla pomocí skleněného hranolu

(1648 Jan Marek Marci z Kronlandu – teorie duhy)

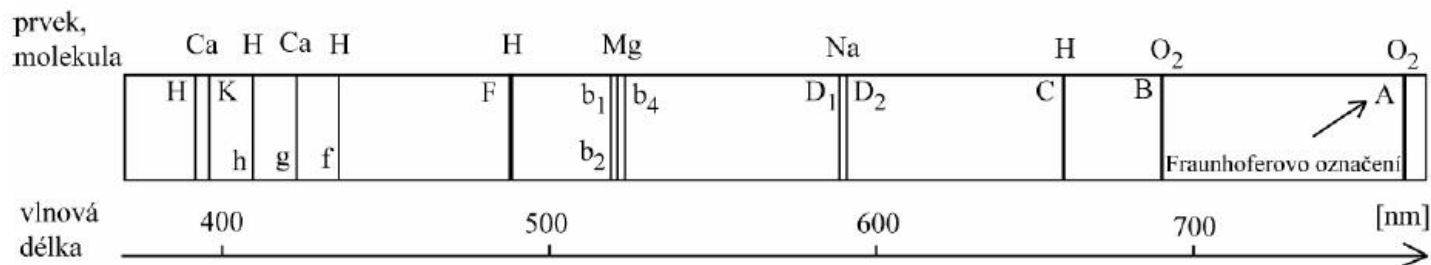


1802 William Wollaston - ve spektru Slunce 7 tmavých čar

1814 Joseph Fraunhofer - zhotovil spektroskop – pozoroval tisíce tmavých čar (dnes Fraunhoferovy čáry).



Joseph von Fraunhofer
(1787-1826)

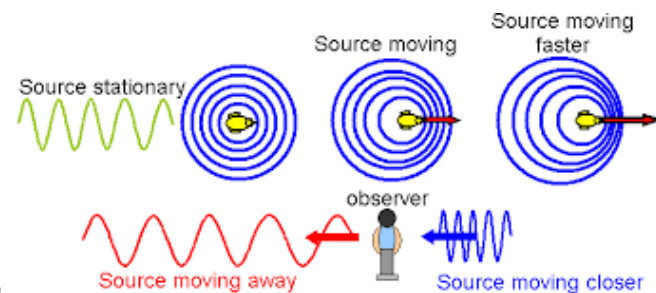


Dopplerův jev

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

1868 – objev He ve spektru Slunce, v laboratoři až 1895

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



Dnes - v Piwnici (Toruń, Polsko)

Periodic Table of Spectra

1	H																	2	He																
3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne				
11	Na	12	Mg																	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar				
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba			72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra			104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Nh	114	Fl	115	Mc	116	Lv	117	Ts	118	Og

57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No	103	Lr

Data is from the NIST Atomic Spectra Database.
 All data lines were synthesized at a 1.5 nm scale and equal in brightness for a given element.
 The order lines that appear are a composite of multiple data files.
 Not all lines will be visible or of equal brightness or width in all laboratory settings.
 For more information, see fieldtestedsystems.com/ptable.

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.

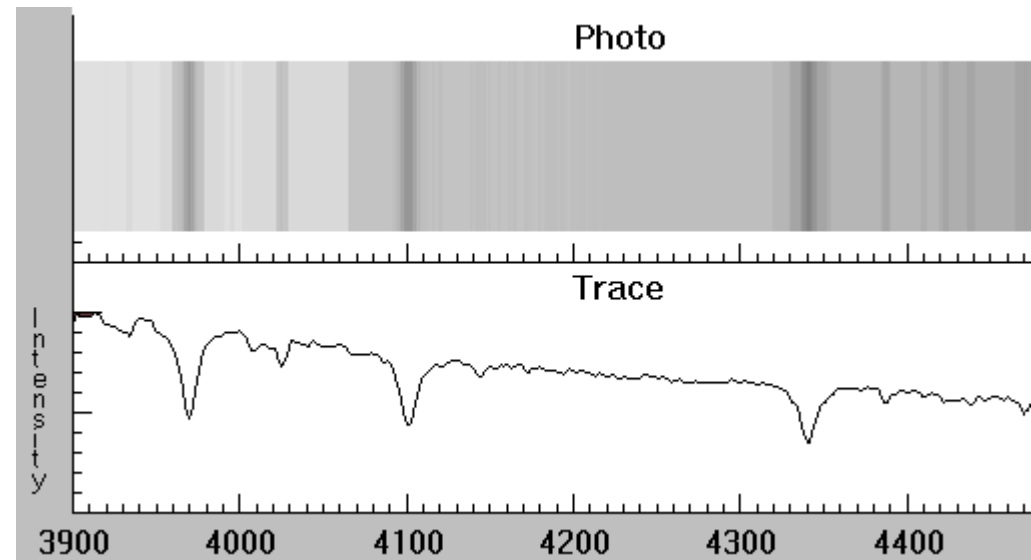
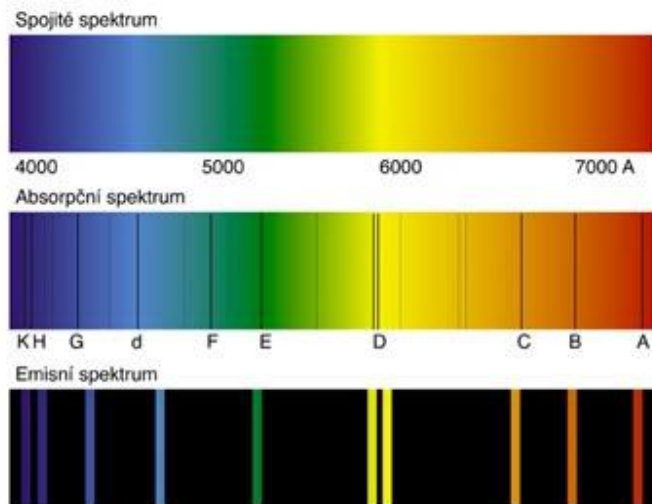
Každý prvek, atom, molekula – charakteristické skupiny spektrálních čar
nejjednodušší – vodík

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

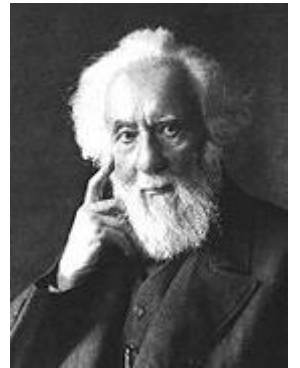
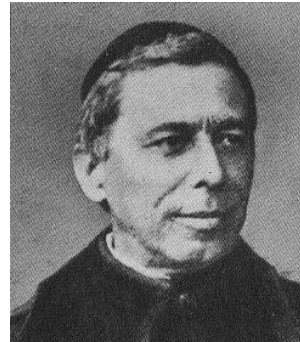
1862 - Angelo Secchi – počátek éry soustavného průzkumu hvězdných spekter – první pokus o spektrální klasifikaci

1862 - William Huggins - detailní studie vybraných hvězdných spekter

spektrograf - použití fotografie

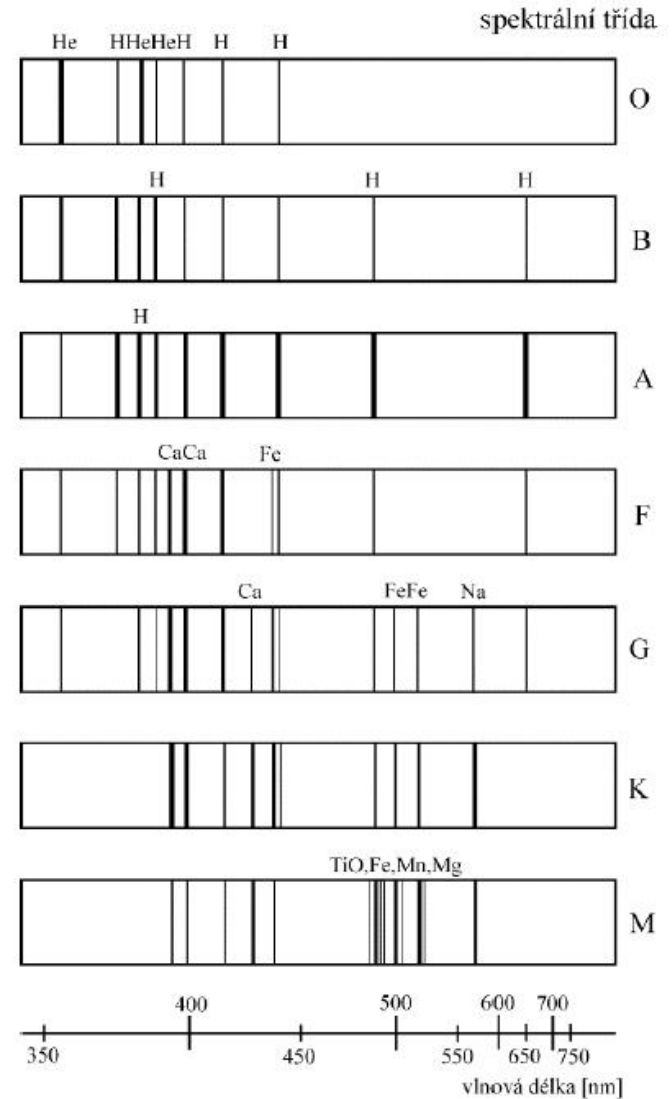
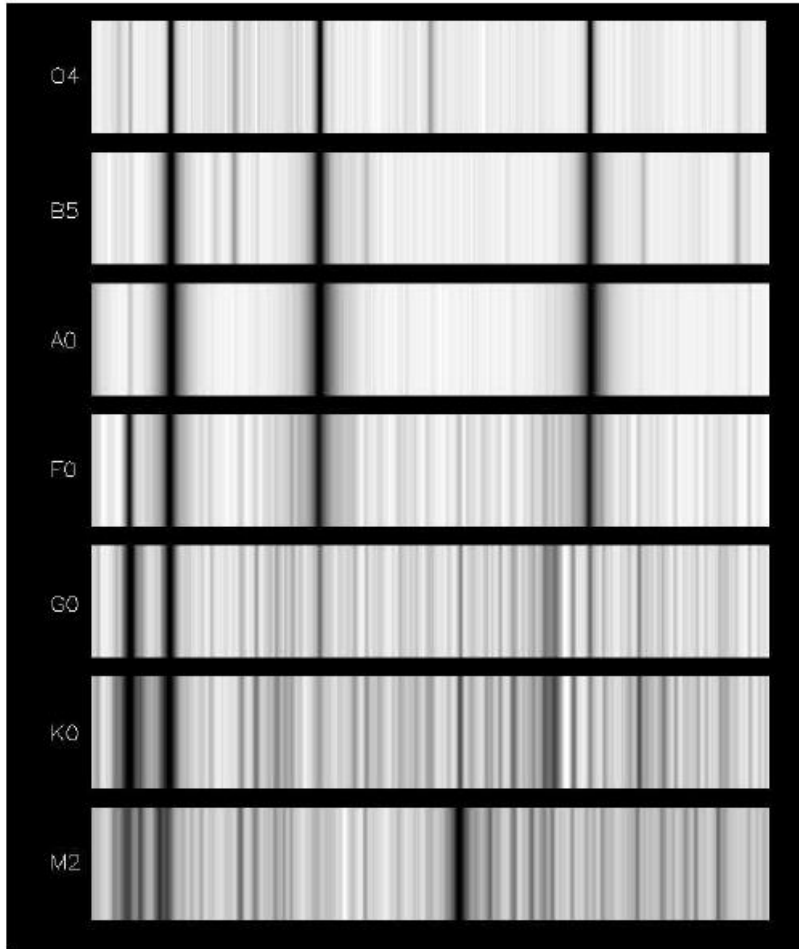
19./20. st. - Edward Pickering a „jeho ženy“ – klasifikace spekter

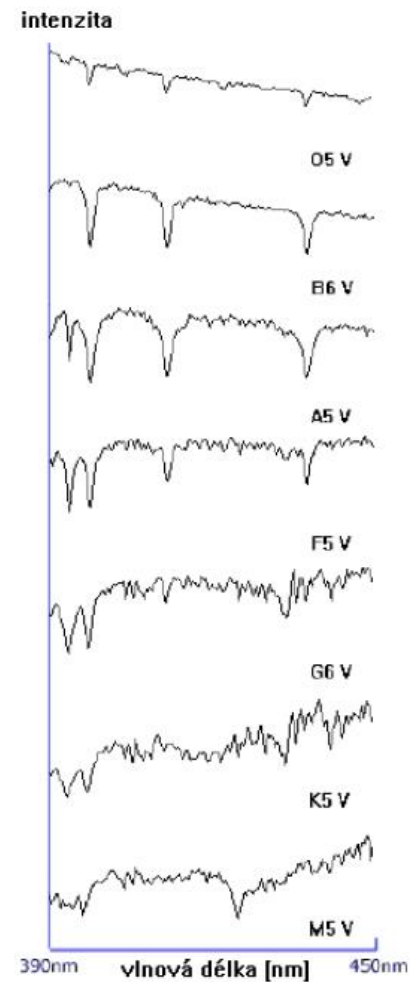
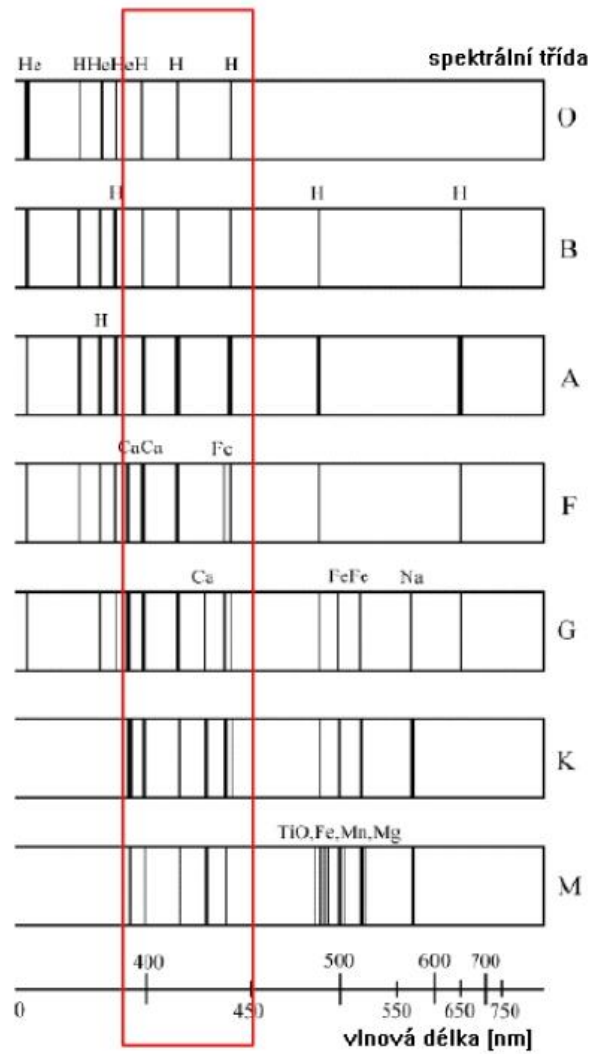
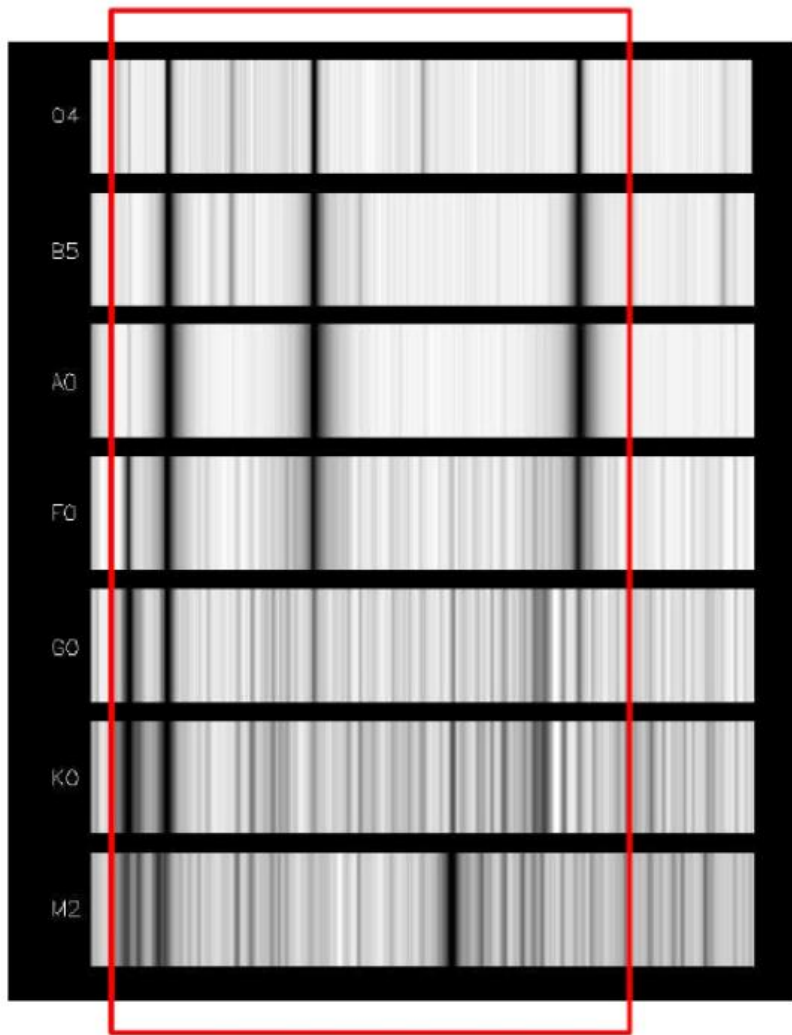
- Anthonia Mauryová a Annie Cannonová – klasifikace půl milionu hvězdných spekter! => HD katalog



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

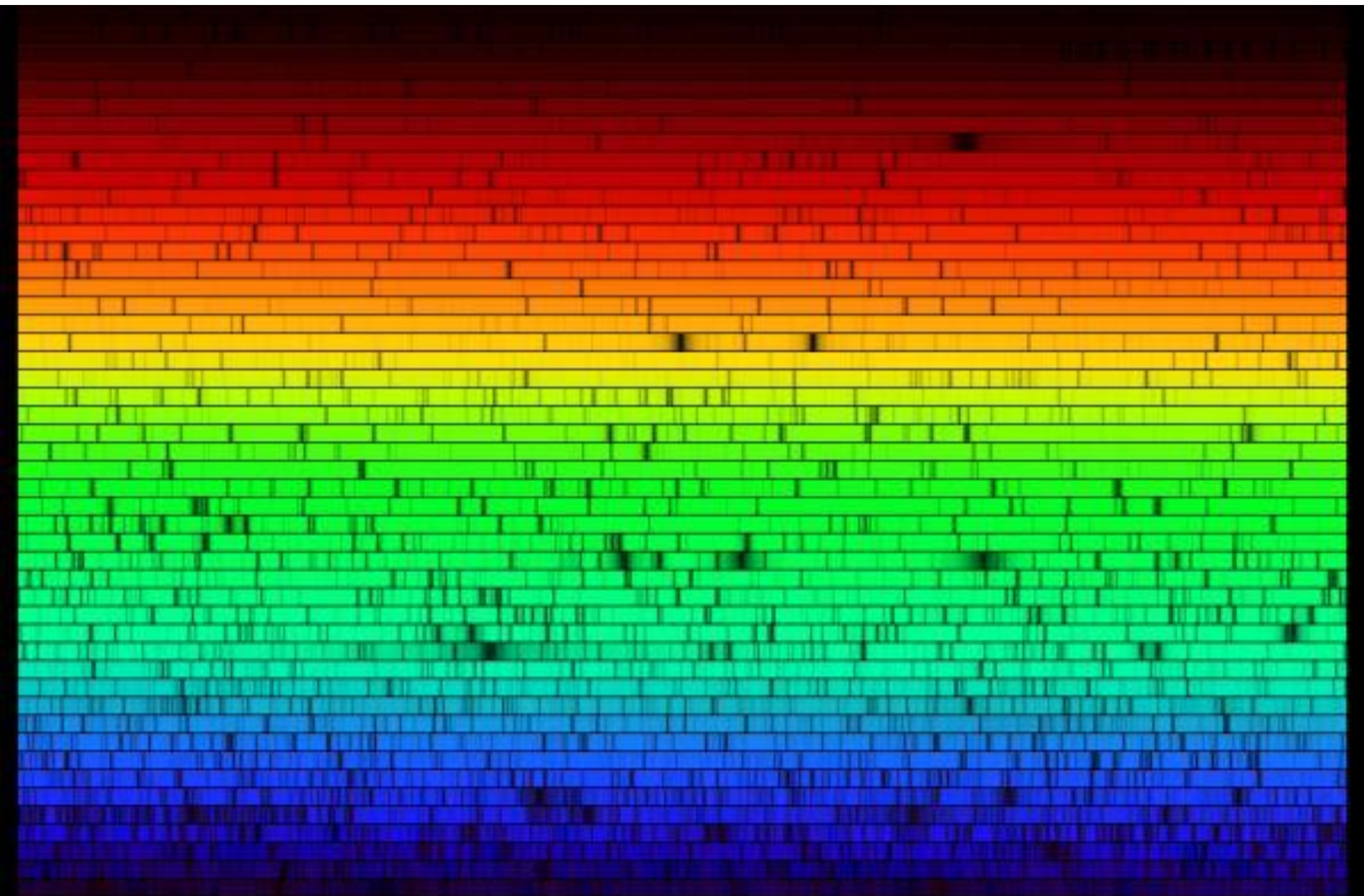
<i>Spektrální třída</i>	<i>Povrchová teplota hvězdy (přibližně)</i>	<i>Typičtí představitelé</i>
O	28 000 – 40 000 K	ζ Pup, λ Ori, ξ Per, λ Cep
B	10 000 – 28 000 K	ε Ori, α Vir, γ Per, γ Ori
A	7000 – 10 000 K	α CMa, α Lyr, γ Gem
F	6000 – 7000 K	δ Gem, α CMi, α Per, α Pup
G	5000 – 6000 K	Slunce, α Aur,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

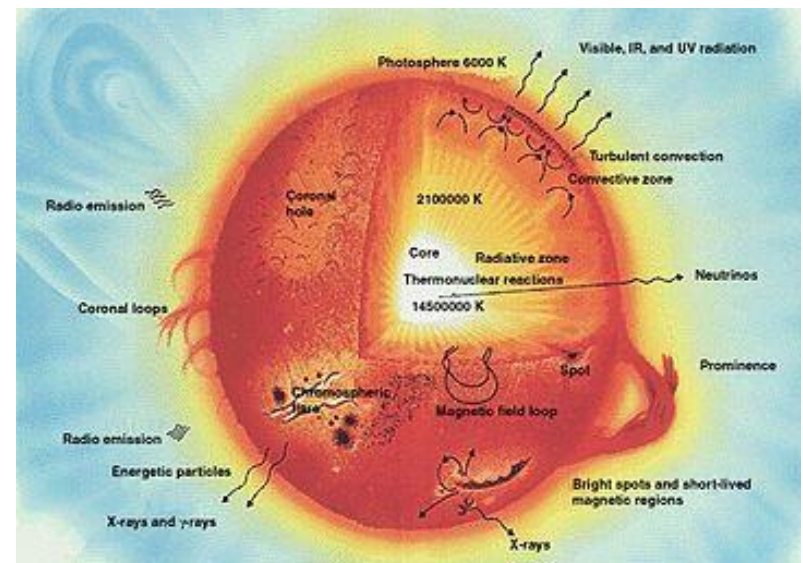
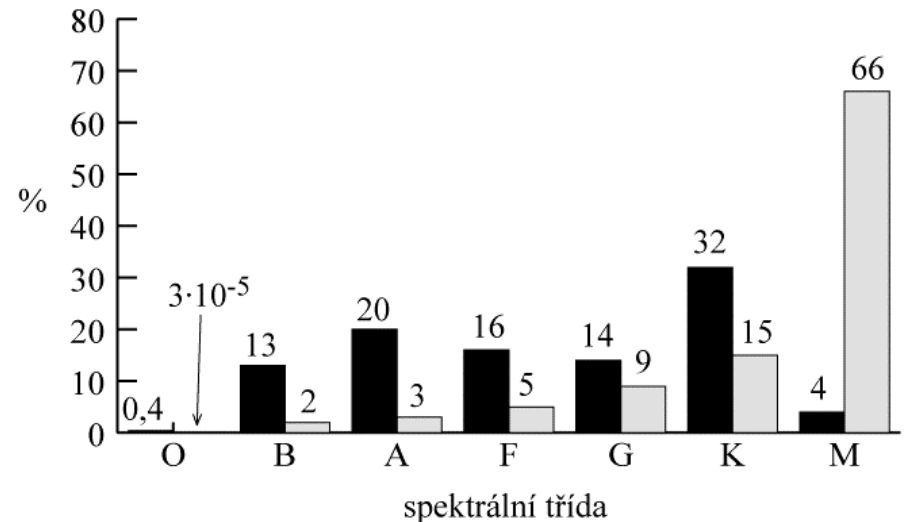
2. složení hvězdy

čáry ve spektru ukazují chemické
složení hvězdy

NEPLATÍ!

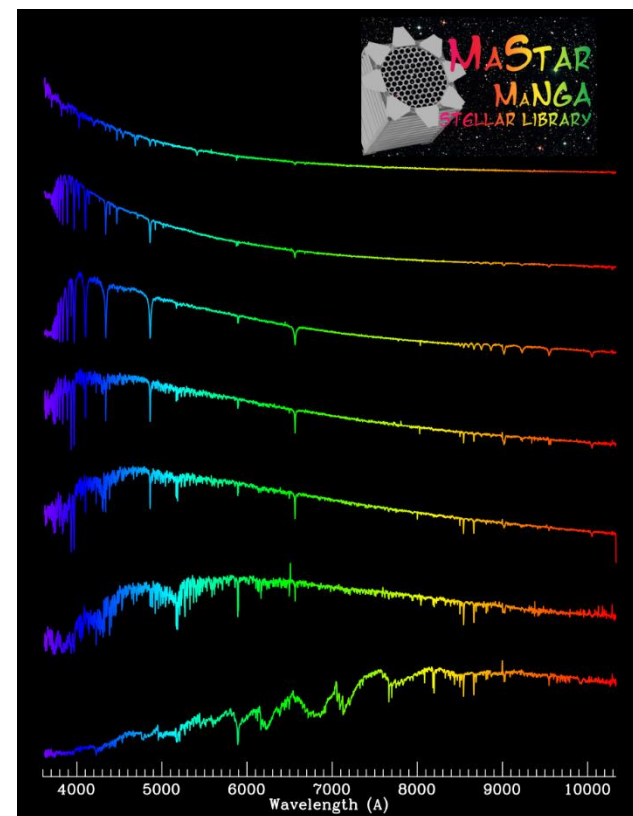
ukazují fyz. podmínky a chemické
složení látky v místě vzniku záření
(tenká fotosféra)

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

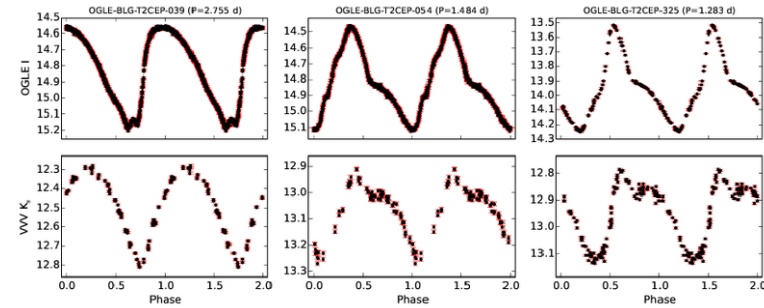
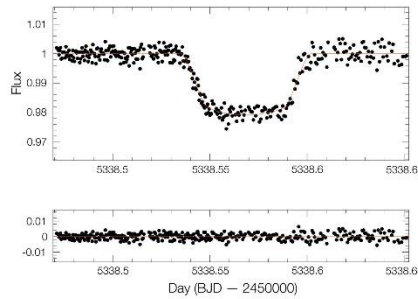


Proč studujeme spektra (hvězd)?

- 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

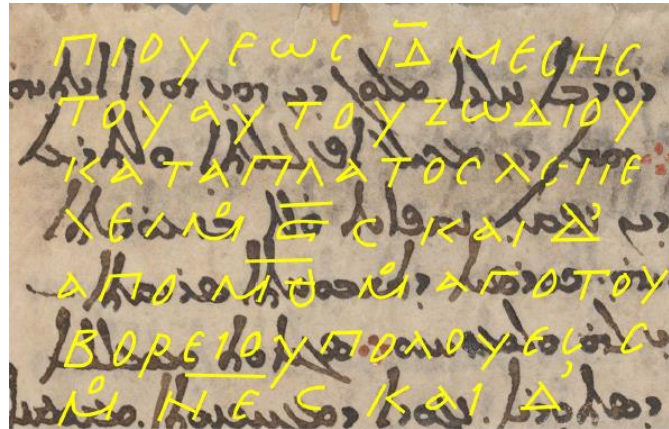
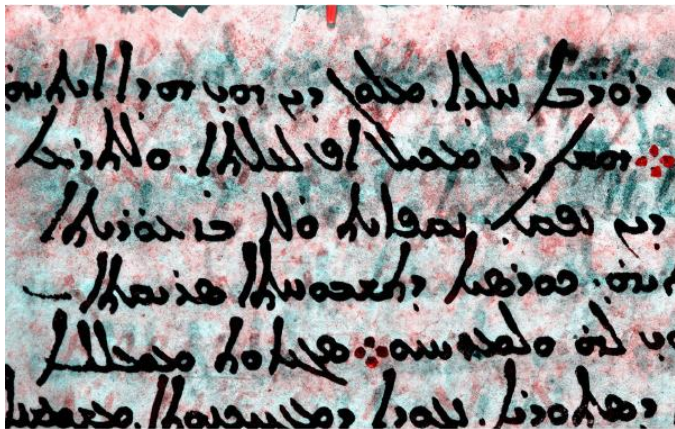


fotometrie = *fotos* (světlo) + *metron* (míra, měřit) - část fyziky zabývající se měřením světla; zkoumáním hustoty světelného toku

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?



objeven 2022?



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:

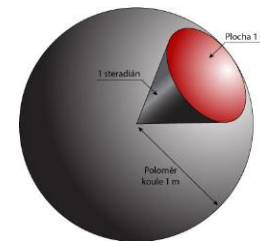
$$j_m = j_n \rho^{(n-m)}, \text{ resp. } n - m = 2,5 \log (j_m/j_n) \quad \textbf{Pogsonova rovnice}$$

(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 [W]

hustota zářivého toku – zářivý tok plochou/průmět té plochy do směru kolmého na směr šíření záření [W/m²]

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 [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 (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 $\Delta\nu_{Cs}$.

jas – svítivost plošky povrchu zdroje ve směru pozorování/kolmý průmět této plošky do tohoto směru [cd/m²]

světelný tok – charakterizuje intenzitu zrakového vjemu lidského oka, který je vyvolán zářivým tokem; **lumen [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/m²]

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

1 lux [lx] – jednotka osvětlení; 1 lux je osvětlení plochy, na jejíž každé m² 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);

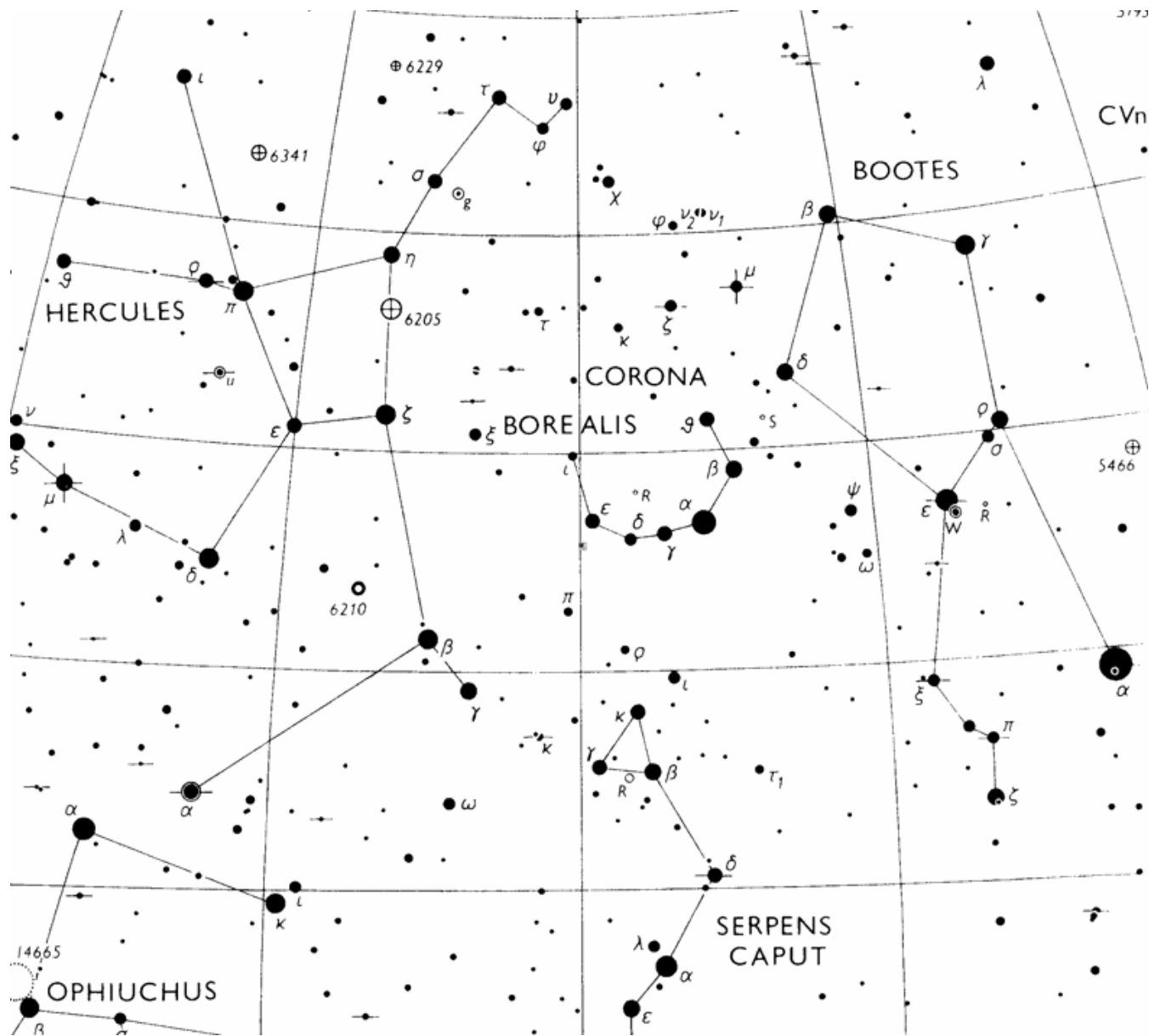
- POZOR: 1. *zmenšuje-li* se hodnota hvězdné velikosti, jasnost objektu *roste!*;
2. nezaměňujte název veličiny (hvězdná velikost) a jednotky (magnituda);
3. z definice hv. velikosti => je-li jasnost hvězdy *100krát* menší než jasnost jiného objektu, je rozdíl hvězdných velikostí *přesně 5 magnitud!*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

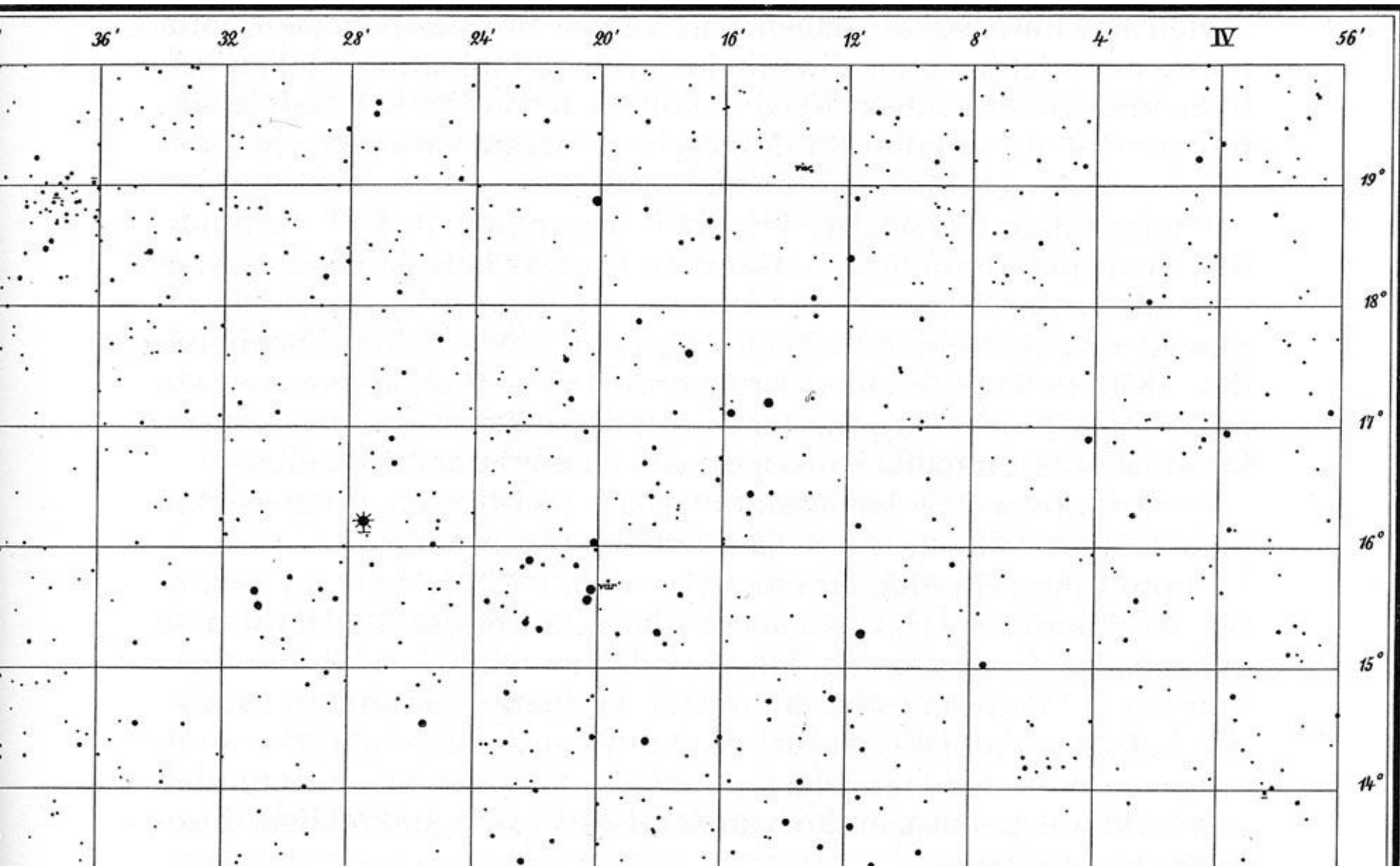
Viditelné prostým okem bez dalekohledu	Pozorovaná hvězdná velikost [mag]	Relativní jasnost vzhledem k hvězdě Vega	Počet hvězd jasnějších než udaná hvězdná velikost
Ano	-1	250%	2
	0	100%	4
	1	40%	15
	2	16%	48
	3	6.3%	171
	4	2.5%	513
	5	1.0%	1 602
	6	0.40%	4 800
Ne	7	0.16%	14 000
	8	0.063%	42 000
	9	0.025%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

Záznam hvězdných velikostí v atlasech

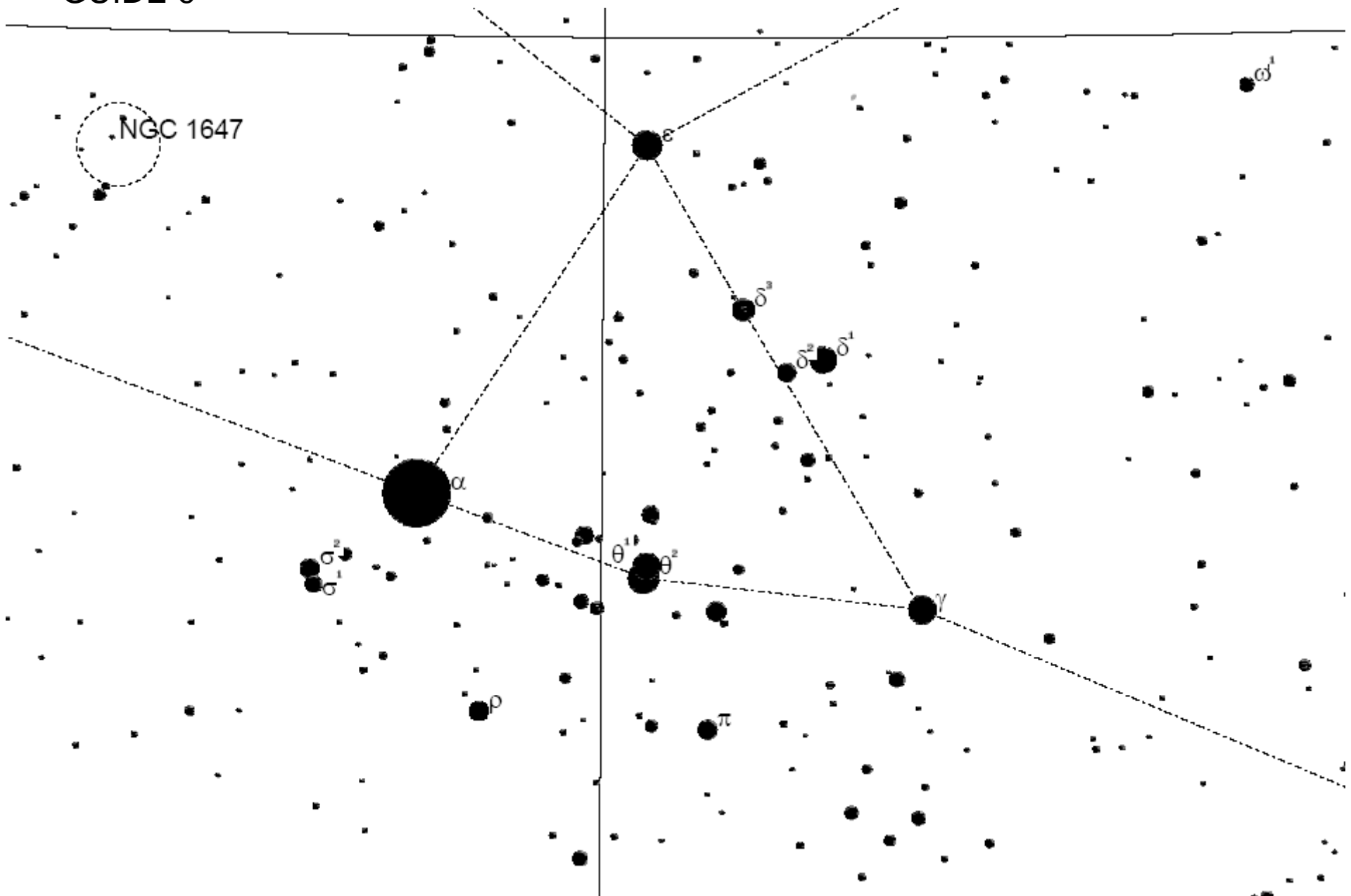


průměr kotoučku hvězdy odpovídá intervalu hvězdných velikostí

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)

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

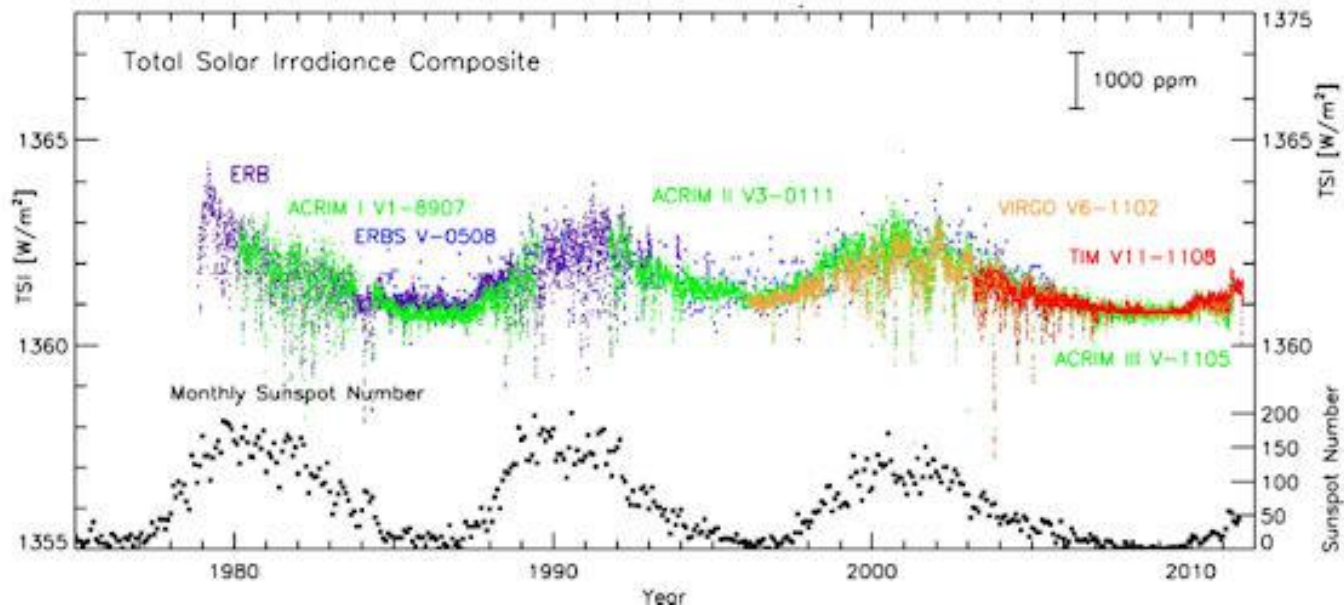
$$L = 4\pi r^2 F$$

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

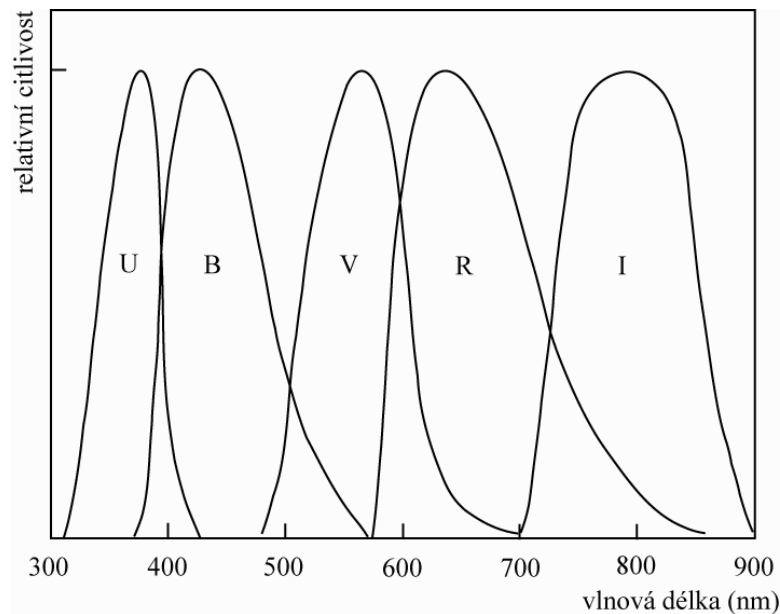
odvození hvězdných velikostí - ve vizuální části spektra, ale lze využít i v jiných vymezených částech spektra v tzv. *barvách*

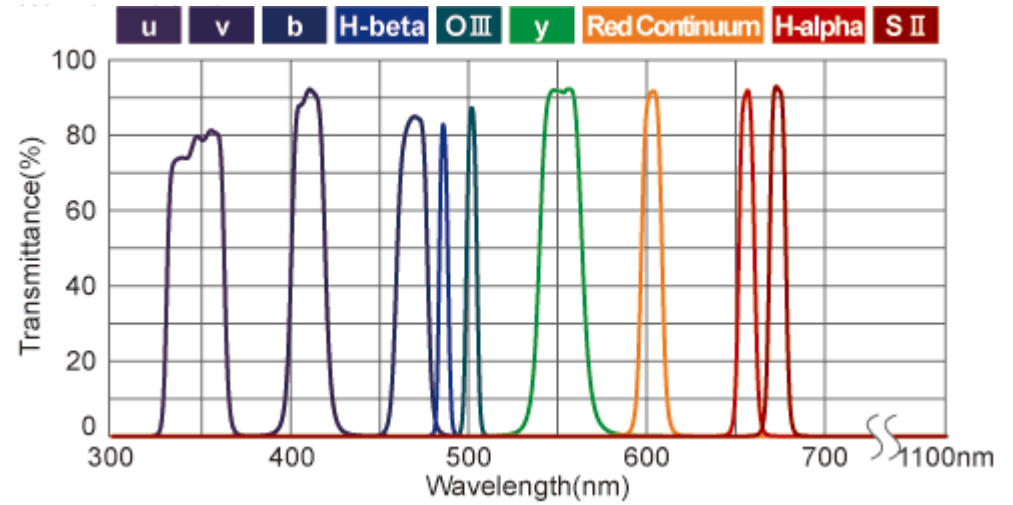
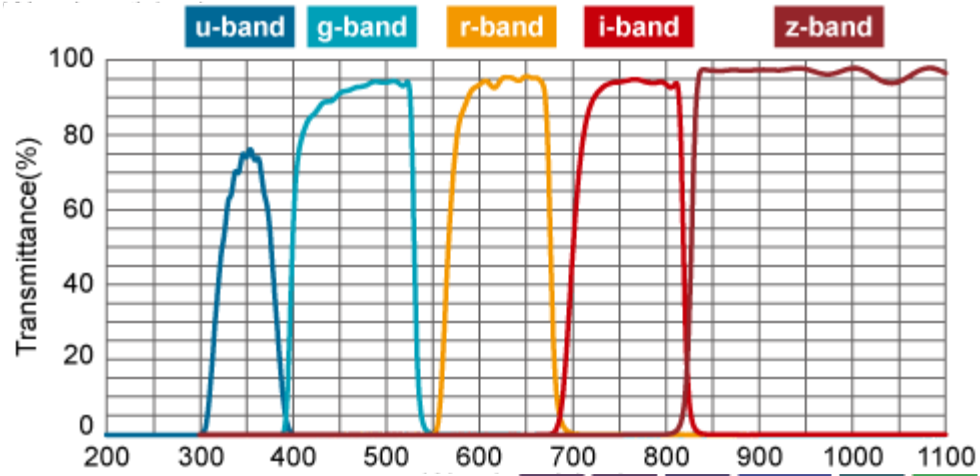
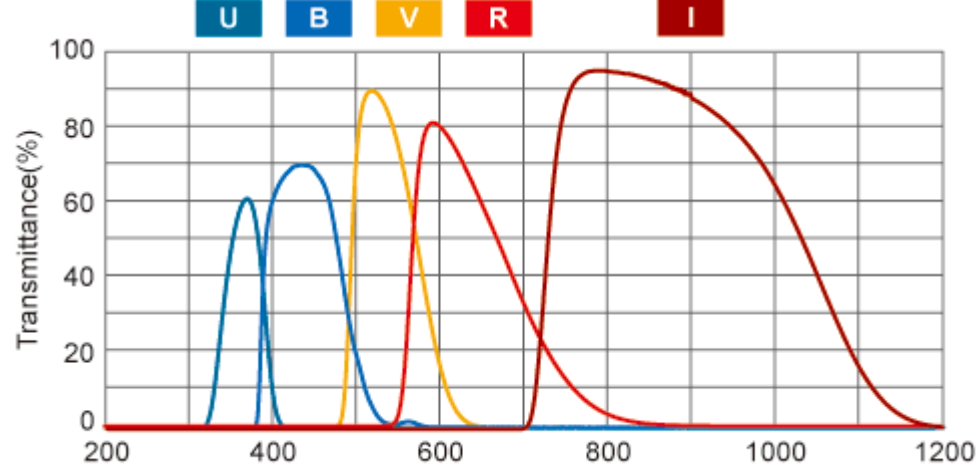
více „barev“=> *barevný systém* – existuje více než 200 barevných systémů,

nejrozšířenější Johnsonův *UBV* systém, dnes *UBVRI*

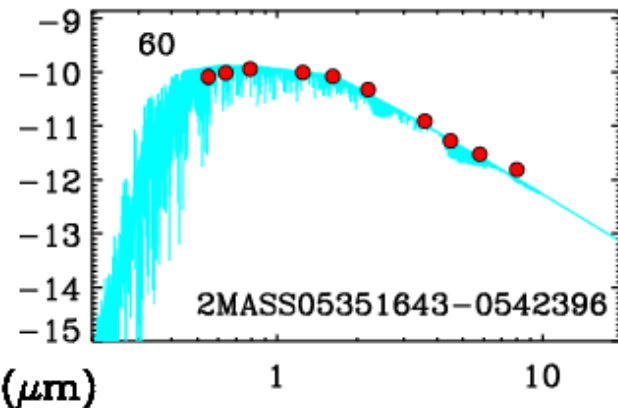
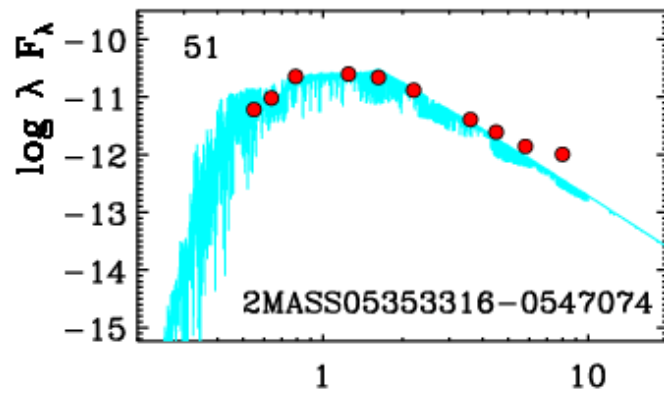
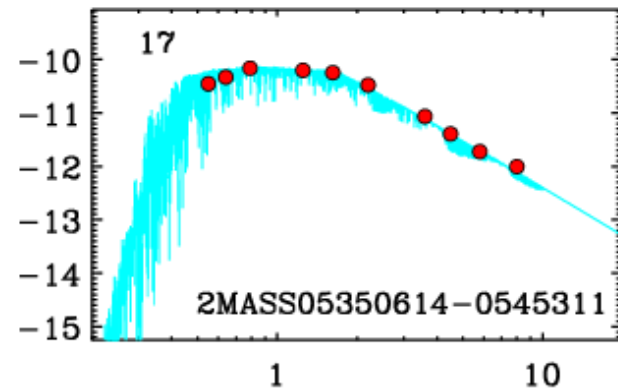
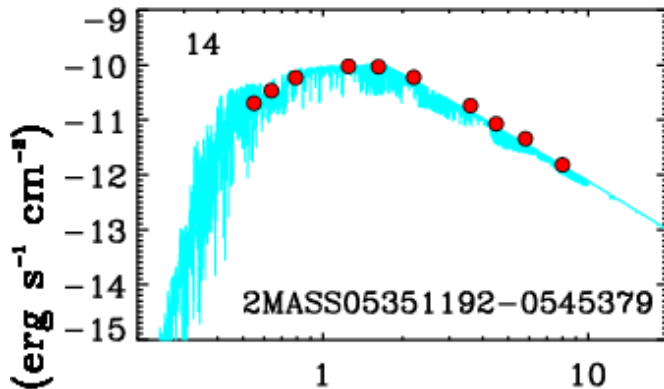
U (ultraviolet), *B* (blue), *V* (visual), *R* (red), *I* (infrared)

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,

$$\text{např. } (B-V) = m_B - m_V = M_B - M_V$$

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

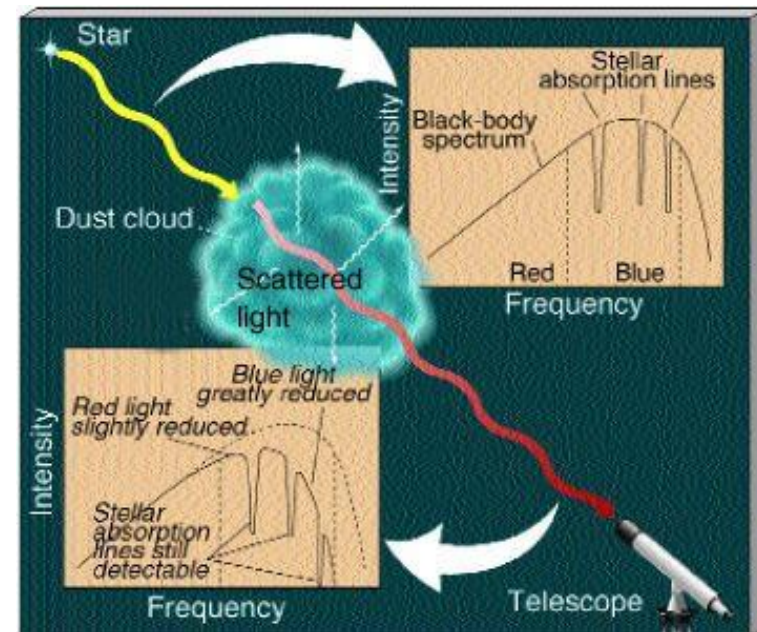
Mezihvězdná extinkce A_V v barvě V [mag]

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

= *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

