

# ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY HVĚZD

HVĚZDNÁ VELIKOST, BAREVNÝ INDEX, SPEKTRÁLNÍ TŘÍDA, H-R DIAGRAM,  
VZTAH HMOTNOST SVÍTIVOST, BAREVNÝ DIAGRAM

# DEFINICE

- hvězdy jsou samostatná souvislá gravitačně vázaná tělesa o hmotnostech od  $0,075 M_{\odot}$  do  $100 M_{\odot}$



# ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY HVĚZD

## rozpětí základních charakteristik

- hvězdy se svými vnějšími i vnitřními charakteristikami výrazně liší
- **hmotnost:** od  $0,075 M_{\odot}$  (červení trpaslíci – Gliese 623 B) do  $60 M_{\odot}$  (hmotní „modří“ veleobři – Plaskettova hvězda)
- **poloměr:** od  $12 \text{ km} = 1,7 \cdot 10^{-5} R_{\odot}$  (neutronové hvězdy) až po  $2000 R_{\odot}$  (červení veleobři – VV Cephei,  $\mu$  Cephei)
- **zářivý výkon:** od  $1,5 \cdot 10^{-5} L_{\odot}$  (červení trpaslíci – Gliese 623 B) až  $10^7 L_{\odot}$  (velmi hmotné nestacionární hvězdy typu  $\eta$  Carinae)

# ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY HVĚZD

rozpětí základních charakteristik

- **efektivní teplota:** od 2500 K u červených trpaslíků a obrů až po stovky tisíc kelvinů u jader planetárních mlhovin
- **chemické složení:** pozorovány jsou jen svrchní vrstvy hvězd, jejichž složení zpravidla odpovídá složení zárodečné mlhoviny, H a He mají cca stejné relativní zastoupení jako na Slunci, rozdíly jsou v obsahu těžších prvků: od téměř 0 % u nejstarších hvězd v kulových hvězdokupách až po 5 % u příslušníků tzv. extrémní ploché složky Galaxie (Slunce má 2 % těžších prvků)
- **Slunce** není v žádné charakteristice hvězdou extrémní

# TYPICKÉ HVĚZDY

- **Slunce x 100 nejbližších hvězd:** Slunce je nadprůměrná hvězda, jen 7 hvězd má větší hmotnost, poloměr a zářivý výkon
- **Slunce x 100 nejjasnějších hvězd:** Slunce je silně podprůměrná hvězda, jen jediná hvězda ( $\alpha$  Centauri B) má zářivý výkon, hmotnost a poloměr menší
- za **typickou hvězdu slunečního okolí** (nalezena jako medián zářivého výkonu) lze označit okem neviditelnou hvězdu HD 155 876 v Herkulovi, vzdálenou 21 ly, L je  $1/50 L_{\odot}$ , R je  $2/5 R_{\odot}$ ,  $T_{\text{ef}}$  3500 K a M  $1/3 M_{\odot}$
- **typičtí zástupci hvězd hvězdné** oblohy a současně nejjasnější hvězdy severní hvězdné oblohy jsou Vega a Arcturus:
  - *Vega* je hvězdou hlavní posloupnosti spektrálního typu A0, má L 45 Sluncí, R  $2,6 R_{\odot}$ ,  $T_{\text{ef}}$  9400 K, M asi  $2,3 M_{\odot}$
  - *Arcturus* je obrem spektrálního typu K2 III s efektivní teplotou 4200 K, s R asi  $20 R_{\odot}$ , s L cca  $110 L_{\odot}$  a M kolem  $2 M_{\odot}$  - je již v pokročilém stadiu vývoje

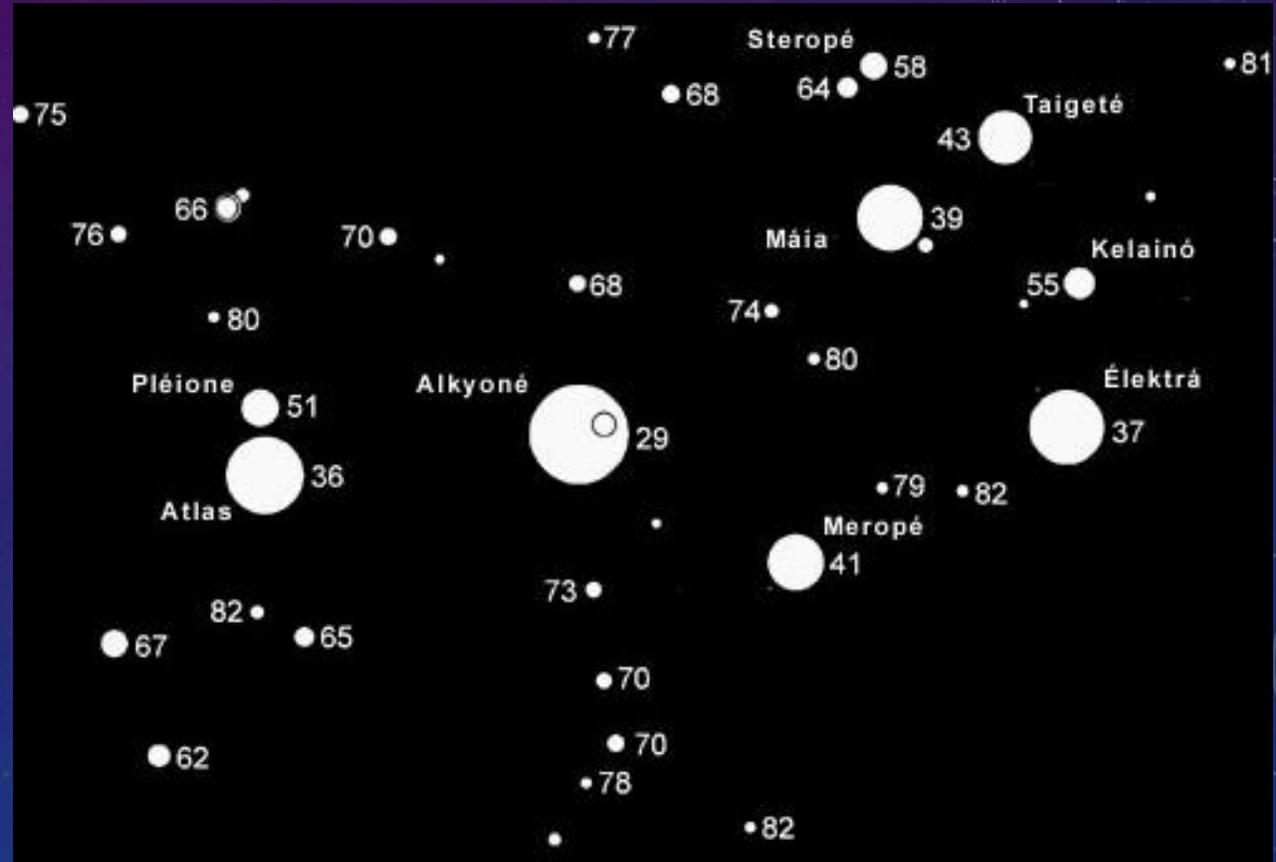
# VÝBĚROVÝ EFEKT

- na obloze vidíme výjimečné hvězdy, jež svítí mnohokrát více než Slunce
- je to důsledkem tzv. *výběrového efektu*, který souvisí s tím, že hvězdy s větší svítivostí pozorujeme i na větší vzdálenost
- zanedbáme-li extinkci a za předpokladu homogenního rozložení hvězd, pak bude objem oblasti, odkud lze hvězdy o absolutní jasnosti  $S$  pozorovat, úměrný  $S^{3/2}$
- pro typické hvězdy hvězdné oblohy ( $S \sim 55 S_{\odot}$ ) je tento objem 400x větší než pro hvězdy slunečního typu a pro typické hvězdy slunečního okolí ( $S \sim 0,004 S_{\odot}$ ) je naopak 4000x menší než objem hvězd Slunci podobných - statistiky, které výběrový efekt neuvažují jsou nepřesné
- mezi hvězdami ve slunečním okolí se nachází méně než 1 % obrů, 7 % tvoří bílí trpaslíci a 92 % tzv. *hvězdy hlavní posloupnosti*, mezi nimiž převládají *červení trpaslíci* třídy M – ti představují celkem 73 % hvězdné populace

# MODELŮ HVĚZD

- stavbu ani vývoj hvězd nemůžeme studovat přímo, mají ohromné vnitřní teploty a tlaky, hvězdný vývoj probíhá v časových měřítkách o 5 až 8 řádů delších než je délka lidského života
- stavbu a vývoj hvězdy studujeme prostřednictvím matematických *modelů* jejich hvězdného nitra, které (nejčastěji formou soustavy diferenciálních rovnic) odrážejí všechny podstatné fyzikální skutečnosti a děje probíhající v jejich fyzických předlohách

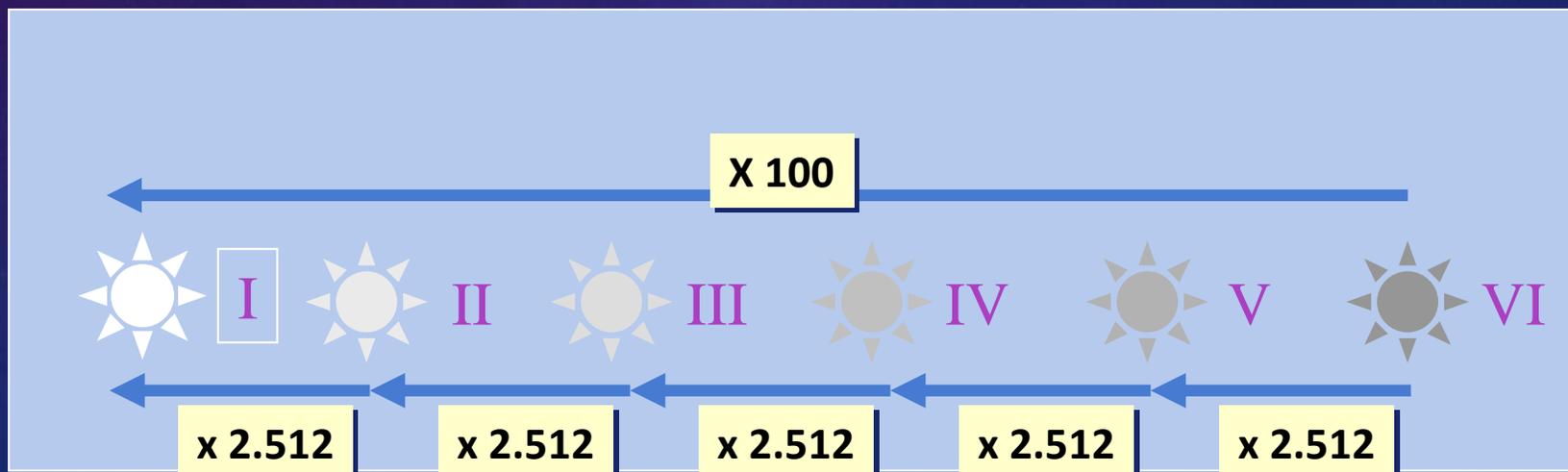
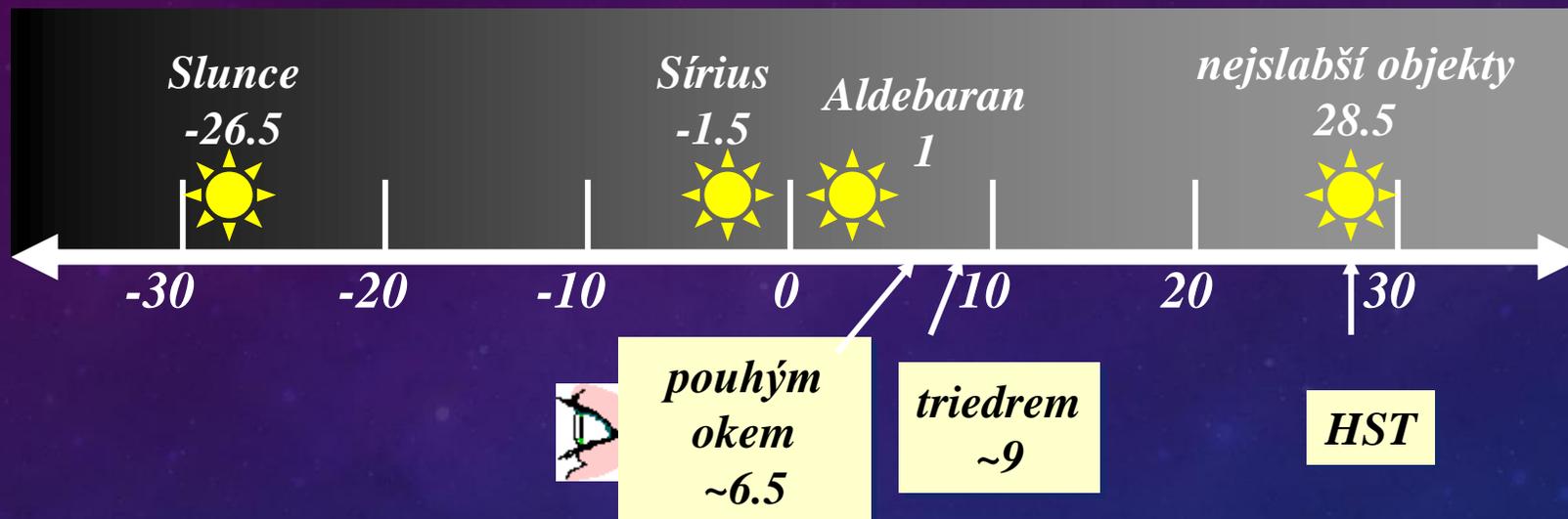
# JASNOST HVĚZD



# HVĚZDNÁ VELIKOST

- astronomové z tradičních i praktických důvodů vyjadřují jasnost zdroje záření pomocí tzv. *hvězdné velikosti* vyjadřované v jednotkách zvaných *magnitudy*
- hvězdná velikost  $m$  je logaritmická veličina svázaná s příslušnou jasností  $j$  tzv. *Pogsonovou rovnicí*:
- $m = -2,5 \log (j/j_0)$  [mag],
- kde  $j_0$  je tzv. referenční jasnost, kterou má zdroj s hvězdnou velikostí  $m = 0$  mag
- podle typu jasnosti rozeznáváme např. vizuální hvězdnou velikost  $m_V$ , bolometrickou hvězdnou velikost  $m_{bol}$ , aj.
- převodní vztahy mezi bolometrickou jasností  $F$  a bolometrickou hvězdnou velikostí  $m_{bol}$  vycházejí z definice, podle níž hvězda s bolometrickou hvězdnou velikostí  $m_{bol} = 0$  mag působí mimo zemskou atmosféru hustotu zářivého toku  $F_0 = 2,553 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}$

# HVĚZDNÁ VELIKOST



# HVĚZDNÁ VELIKOST

- v případě vizuální hvězdné velikosti  $m_V$  je stanovena referenční jasnost  $j_0 = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ lm m}^{-2} = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ luxů}$ , což odpovídá hustotě zářivého toku cca  $3,2 \cdot 10^{-9} \text{ W m}^{-2}$ .
- mezi bolometrickou hvězdnou velikostí a vizuální hvězdnou velikostí platí vztah:  
$$m_{bol} = m_V + BC,$$
- kde  $BC$  je tzv. *bolometrická korekce*, která vyjadřuje rozložení energie ve spektru zdroje, jež je v případě hvězd určeno v první řadě teplotou
- bolometrická korekce byla definována tak, aby byla nulová u hvězd o povrchové teplotě kolem 7000 K, jejichž záření má největší světelnou účinnost (hvězdy spektrálního typu F)
- směrem k vyšším i nižším teplotám bolometrická korekce klesá, v extrémních případech dosahuje až několika magnitud!

# HVĚZDNÁ VELIKOST

- v astrofyzice hvězd se v řadě aplikací zaměřují bolometrické veličiny snáze měřitelnými veličinami vizuálními
- je třeba mít neustále na paměti, že taková záměna někdy může zcela závažným způsobem zkreslit reálné vztahy mezi jednotlivými charakteristikami hvězd
- všude tam, kde nám půjde např. o celkové množství energie, které hvězda vydává prostřednictvím záření, je žádoucí použít správné, tedy bolometrické veličiny

# HARVARDSKÁ KLASIFIKACE

- prvním rozsáhlejším pokusem o spektrální klasifikaci hvězd je práce Angela Secchiho, v roce 1868 publikoval katalog se 4000 spektry Secchiho spektrální třídy:
- I – bílé hvězdy pouze s čarami H (Sirius, Vega, Altair, Regulus)
- II – nažloutlé hvězdy slunečního typu (Arcturus, Capella) se spoustou čar tzv. kovů
- III – oranžové hvězdy s absorpčními pásy (Betelgeuze, Mira), zpravidla proměnné
- IV – červené hvězdy s absorpčními pásy, které jsou ostré u červeného okraje, rozmyté u modrého – dnes víme že se jedná o projev uhlíku a jeho molekul

# HARVARDSKÁ KLASIFIKACE

- 1890 - Pickering a Flemingová rozšířili posloupnost spektrálních tříd od bílých A s nejsilnějšími čarami vodíku až po nejchladnější červené ...Q.
- Mauryová pak zjistila, že některé třídy jsou nadbytečné a jiné je nutno v klasifikaci přesunout jinam, vznikla proslulá harvardská spektrální posloupnost: *W O B A F G K M L T*
- Oh, Be **A** Fine **G**irl (**G**uy), Kiss **M**y **L**ips (základní)
- **W**aldemar **o**smý **b**ude **a**si **f**ňukat. **G**ustave, **k**up **m**u **l**egračního **t**ygříka!
- **W**hisky **o**d **b**abičky **A**ničky – **f**antasticky **g**eniální **k**oupě! **M**oderní **l**éčivo **t**raumat.
- pozorovaná hvězdná spektra lze sestavit v plynulou řadu podle klesající teploty – kritériem pro zařazení jednotlivé hvězdy jsou relativní intenzity některých vybraných spektrálních čar, které jsou silně závislé právě na teplotě.
- Harvardská klasifikace je jednoparametrická, jako rozhodující jsou brány ty rysy spektra, které závisí především na efektivní teplotě hvězdy

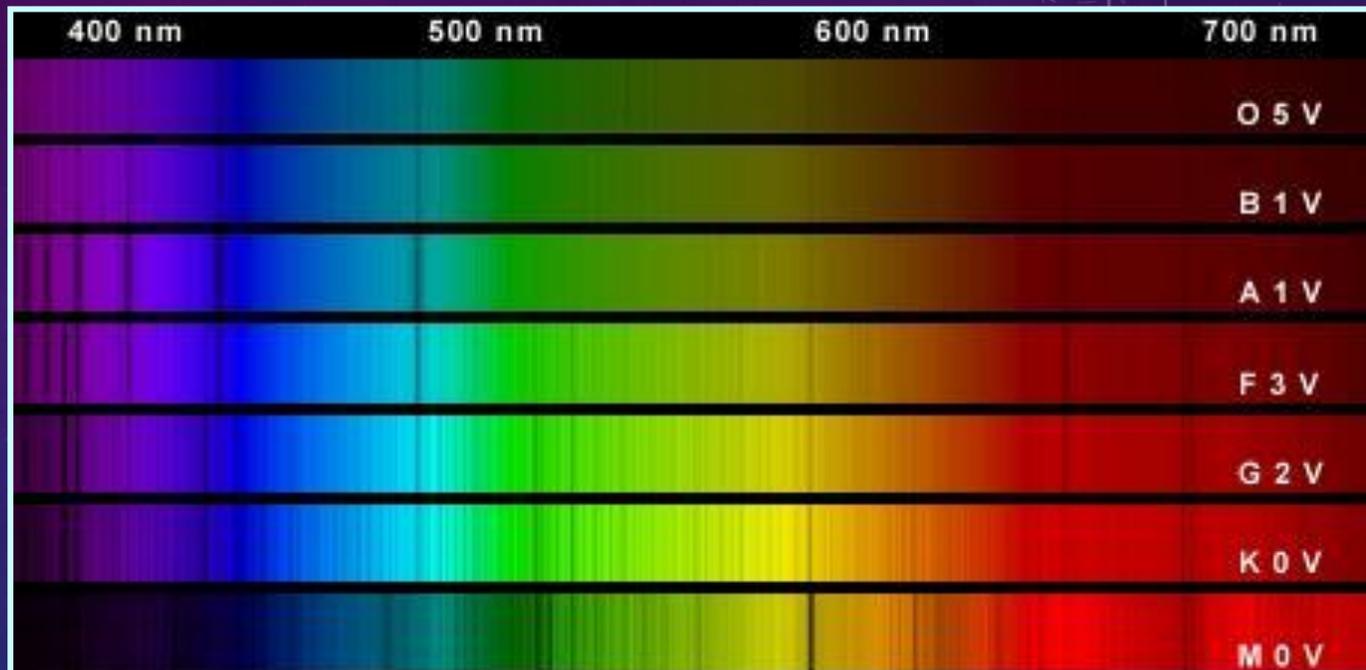
# HARVARDSKÁ KLASIFIKACE

## Charakteristiky jednotlivých spektrálních tříd:

- **W:** Wolfovy-Rayetovy hvězdy jeví široké emisní čáry vodíku a helia.
- **O:** Silné spojité spektrum, absorpční čáry ionizovaného helia.
- **B:** Absorpční čáry neutrálního helia, Balmerovy série vodíku a ionizovaného kyslíku.
- **A:** Silné čáry Balmerovy série vodíku. Objevují se čáry ionizovaného vápníku a čáry kovů.
- **F:** Čáry Balmerovy série slábnou, zesilují se čáry ionizovaného vápníku a kovů.
- **G:** Silné čáry ionizovaného vápníku, slabé čáry Balmerovy série, početné čáry kovů, zejména železa.
- **K:** Silné čáry kovů, slabé absorpční pásy molekul. Hvězdy mají oranžovou barvu.
- **M:** Silné pásy molekul, zejména oxidu titanatého. Hvězdy mají červenou barvu.
- **L:** Chladní trpaslíci na hranici TN syntézy, září v IR, pásy molekul FeH, CrH, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>.
- **T:** Při teplotě pod 1499 K vzniká metan a ve spektru se objevují typické IR čáry metanu.

W	O	B	A	F	G	K	M	L	T
80 000 K	60 000 K	38 000 K	15 400 K	9 000 K	6700 K	5400 K	3800 K	2200 K	1499 K

# SPEKTRA HVĚZD

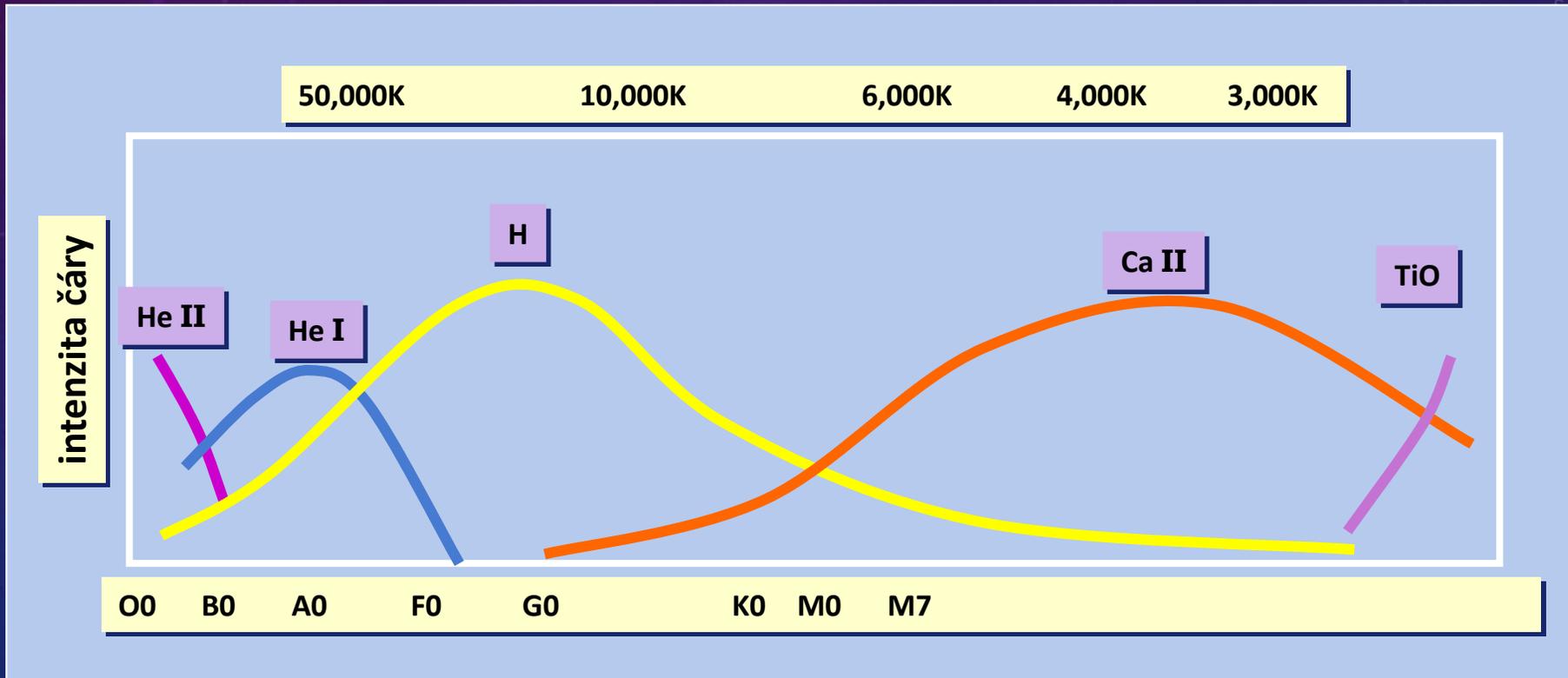


Taková krásná spektra samozřejmě na vlastní oči nevidíte. Jednak byla modelována počítačem, jednak nebude mít váš spektroskop tak dobré rozlišení. Přesto všechno dávají dobrou představu o jednotlivých spektrálních typech. Zatímco u chladných stálic (2500 stupňů kelvinů) ve spektrech dominují absorpční čáry, ba dokonce široké molekulové pásy, horké stálice (desítky tisíc stupňů) ve svém okolí existenci komplikovanějších molekul nedovolí. Proud ultrafialových fotonů je jednoduše rozbije na jednotlivé, ionizované atomy.

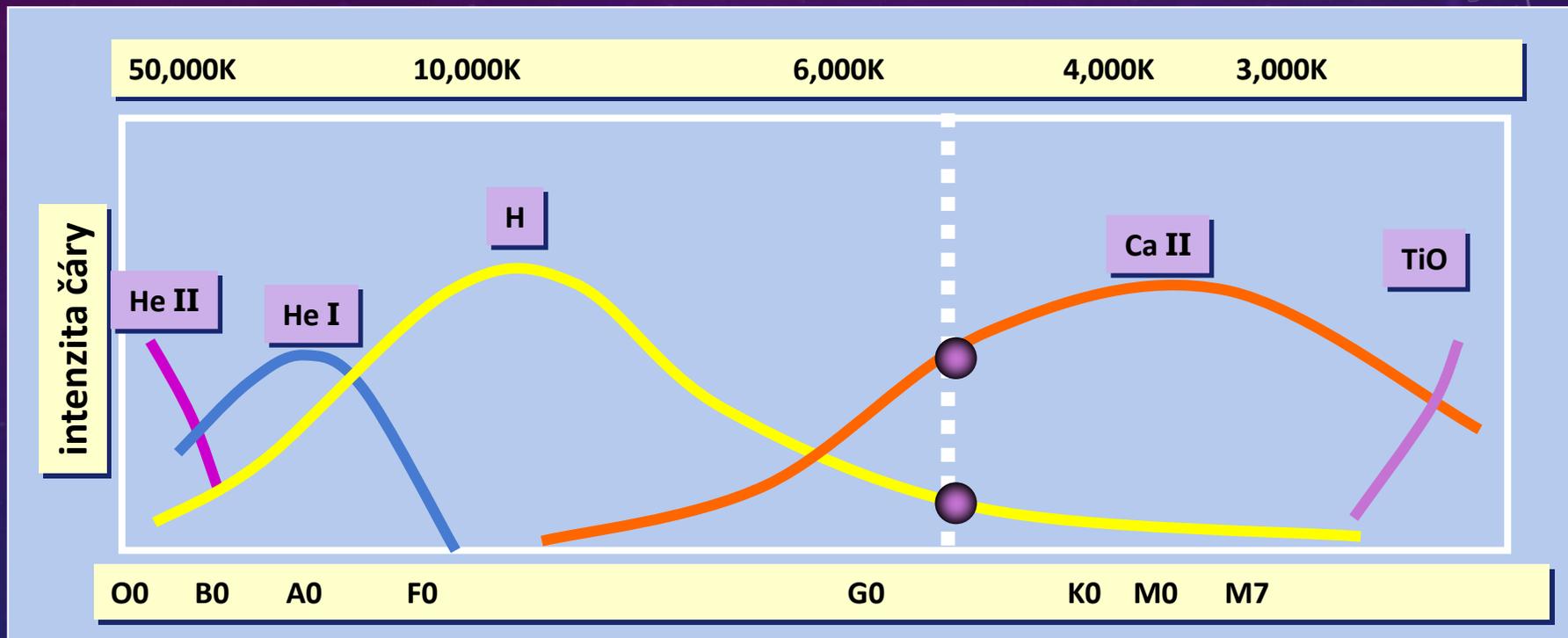
# HARVARDSKÁ KLASIFIKACE

- 1998 - spektrální posloupnost rozšířena do oblasti nižších teplot, za spektrálním typem M8 následuje typ L0 až L8, někdy se používají rozšiřující třídy W, T, Y, D, Q, P (viz <http://www.handprint.com/ASTRO/specclass.html> )
- spektrální typy v Galaxii jsou zastoupeny velmi nerovnoměrně, navíc se opět uplatňuje výběrový efekt zvýhodňující hvězdy s vyšší svítivostí:
- |                    | O     | B    | A    | F    | G    | K    | M    |
|--------------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| • skutečná četnost | 0 %   | 2 %  | 3 %  | 5 %  | 9 %  | 15 % | 66 % |
| • pozor. četnost   | 0,4 % | 13 % | 20 % | 16 % | 14 % | 32 % | 4 %  |
- 1925 - Payne-Gaposhkinová - chemické složení fotosféry naprosté *většiny* hvězd je velice podobné: 70 % H, 28 % He a zbytek ostatní prvky
- na každých 10 000 atomů H připadá zhruba 1000 atomů He, 8 atomů C, 15 O, 12 N, 0,2 Si a ostatních ještě méně
- to, že zejména ve spektrech chladnějších hvězd převládají právě ony, je dáno tím, že jejich atomy lze mnohem snáze vybudit k záření, než atomy těch nejčetnějších prvků

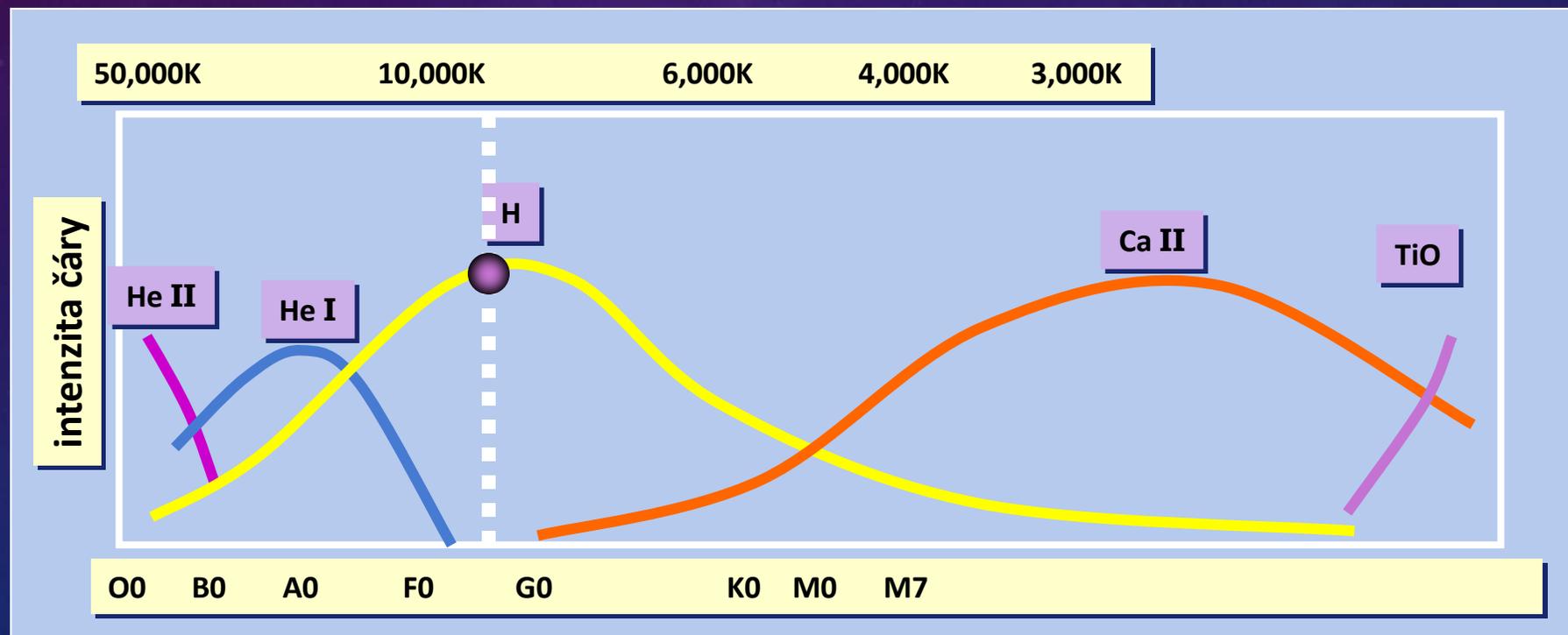
# OTISK TEPLoty



# SLUNCE

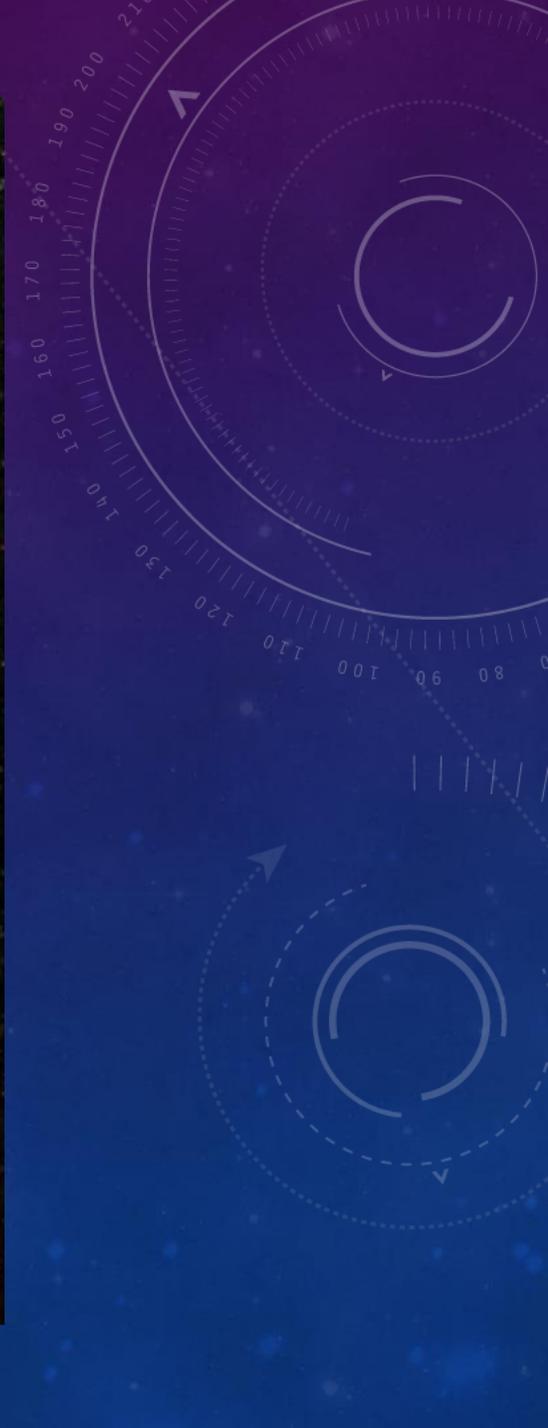
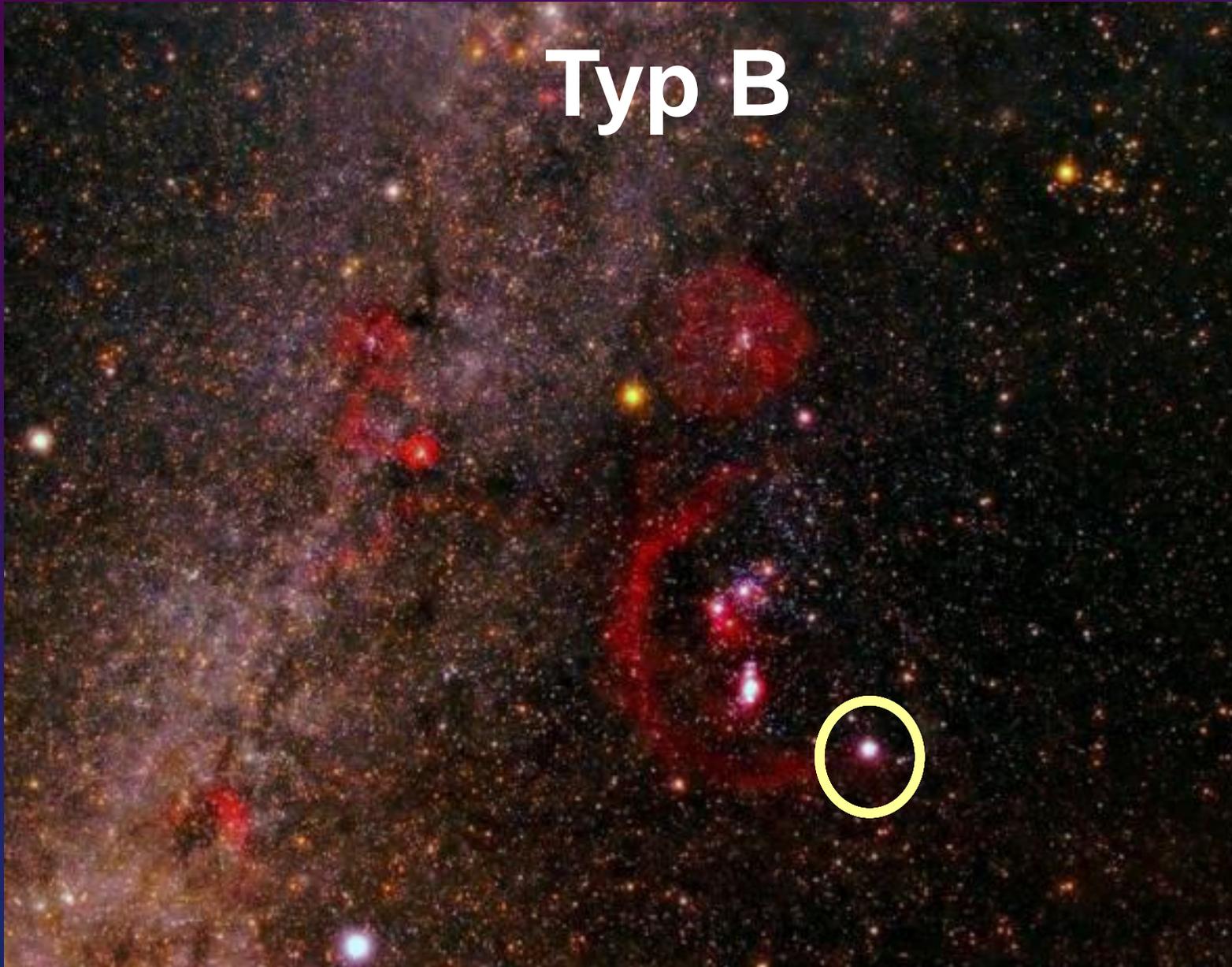


# SÍRIUS A



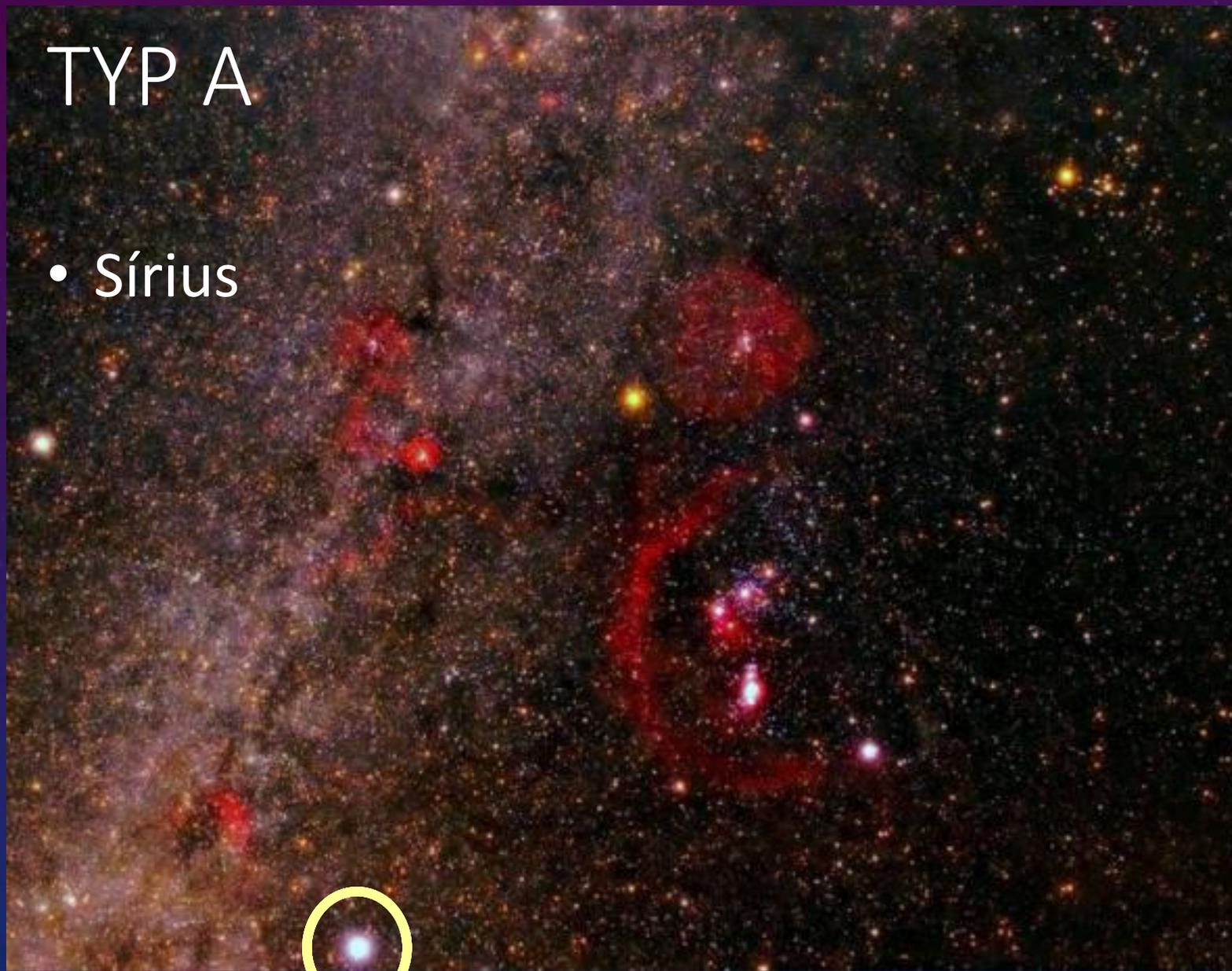
# Typ B

- Rigel



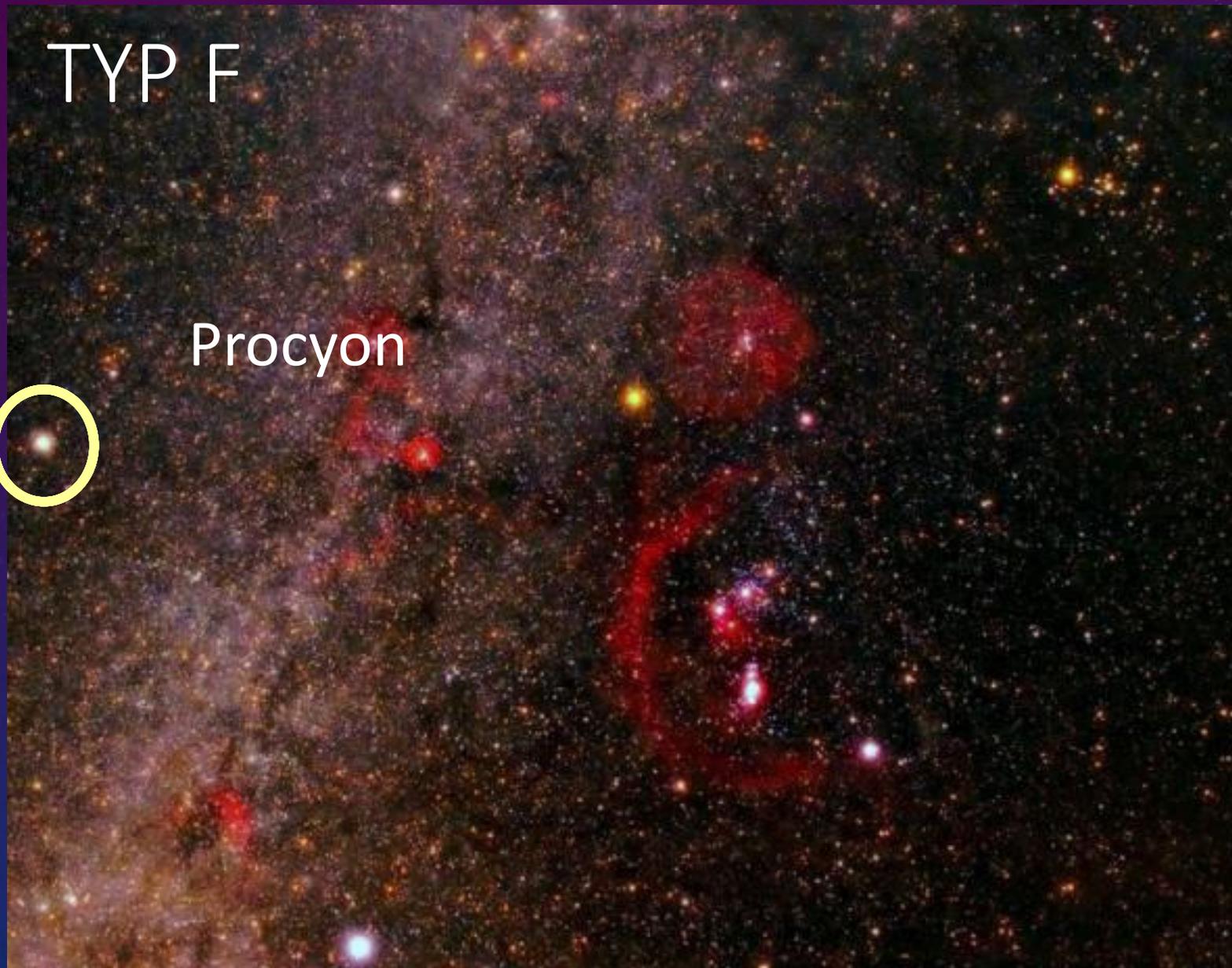
# TYP A

- Sírius



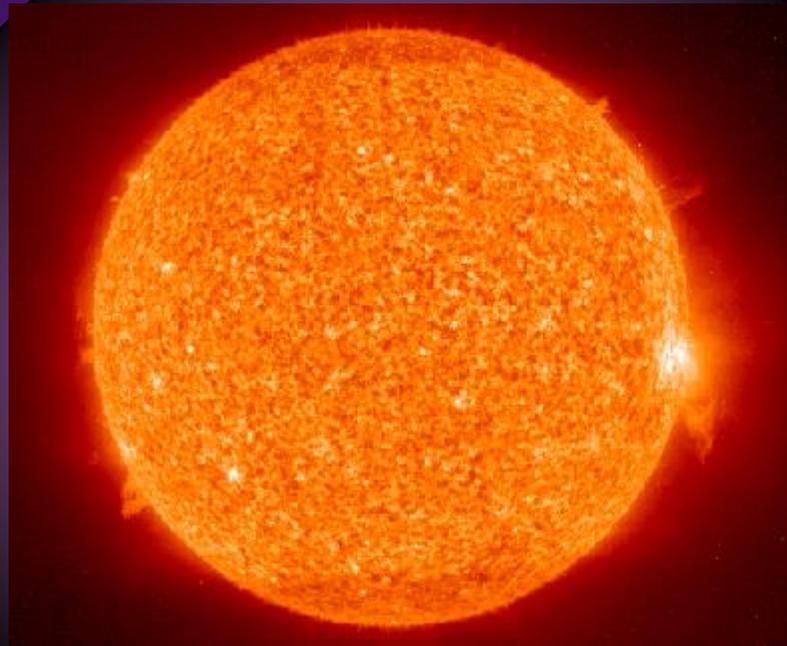
TYP F

Procyon



TYP G

- Slunce



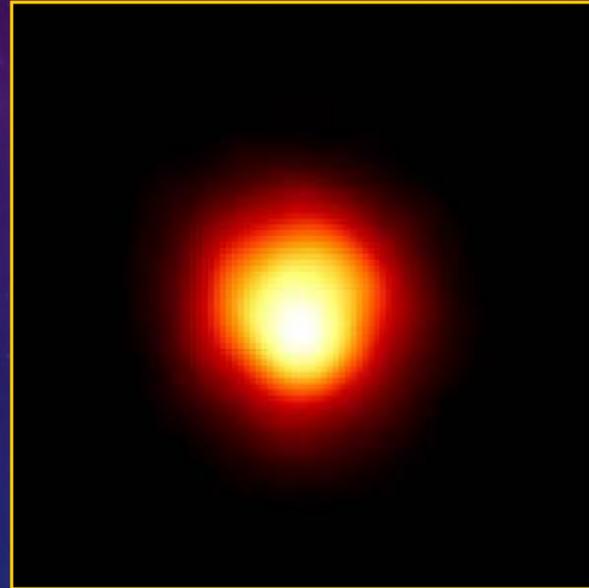
# TYP K

- Arcturus



# TYP M

- Betelgeuze



# LUMINOZITNÍ TŘÍDY

## MORGANOVA-KEENANOVA KLASIFIKACE

- spektrum informuje nejen o efektivní teplotě, ale i o povrchovém gravitačním zrychlení  $g$
- hmotnosti hvězd se mění v relativně malém rozmezí, tedy odvozená hodnota gravitačního zrychlení je dobrou informací o poloměru hvězdy
- pro hvězdu spektrálního typu K0 se můžeme setkat s tím, že jde buď:
  - a) o hvězdu hlavní posloupnosti ( $0,8 M_{\odot}$ ,  $0,85 R_{\odot}$ ), kde  $g = 1,1 g_{\odot}$
  - b) o běžného obra ( $M = 3,5 M_{\odot}$ ,  $R = 16 R_{\odot}$ ), u nějž je  $g = 1,4 \cdot 10^{-2} g_{\odot}$ ,
  - c) o hmotného veleobra ( $M = 13 M_{\odot}$ ,  $R = 200 R_{\odot}$ ) s  $g = 3,3 \cdot 10^{-4} g_{\odot}$ .
- rozdíly v hodnotě povrchového gravitačního zrychlení jsou řádové, což znamená, že podmínky pro vznik spektra v atmosférách těchto typů hvězd musejí být značně rozdílné

# LUMINOZITNÍ TŘÍDY

## MORGANOVA-KEENANOVA KLASIFIKACE

- pokud je gravitační zrychlení  $g$  vysoké, pak je atmosféra hvězdy tenká a relativně hustá, dochází k častým srážkám a spektrální čáry hvězdy jsou rozšířené tlakem
- spektrální čáry hvězd s malým povrchovým zrychlením, zejména veleobrů jsou ostré a hluboké. Ze spektra tedy lze zjistit hodnotu gravitačního zrychlení a tím i zhruba poloměr hvězdy
- známe-li přitom teplotu, můžeme odhadnout i zářivý výkon hvězdy, čili polohu hvězdy v H-R diagramu, dostaneme tak informaci o absolutní hvězdné velikosti hvězdy a tedy o její vzdálenosti
- při téže teplotě a různém gravitačním zrychlení se setkáváme i s rozdíly v intenzitě spektrálních čar, což souvisí s různým stupněm ionizace - je to dáno podle Sahovy rovnice různou koncentrací elektronů v atmosféře

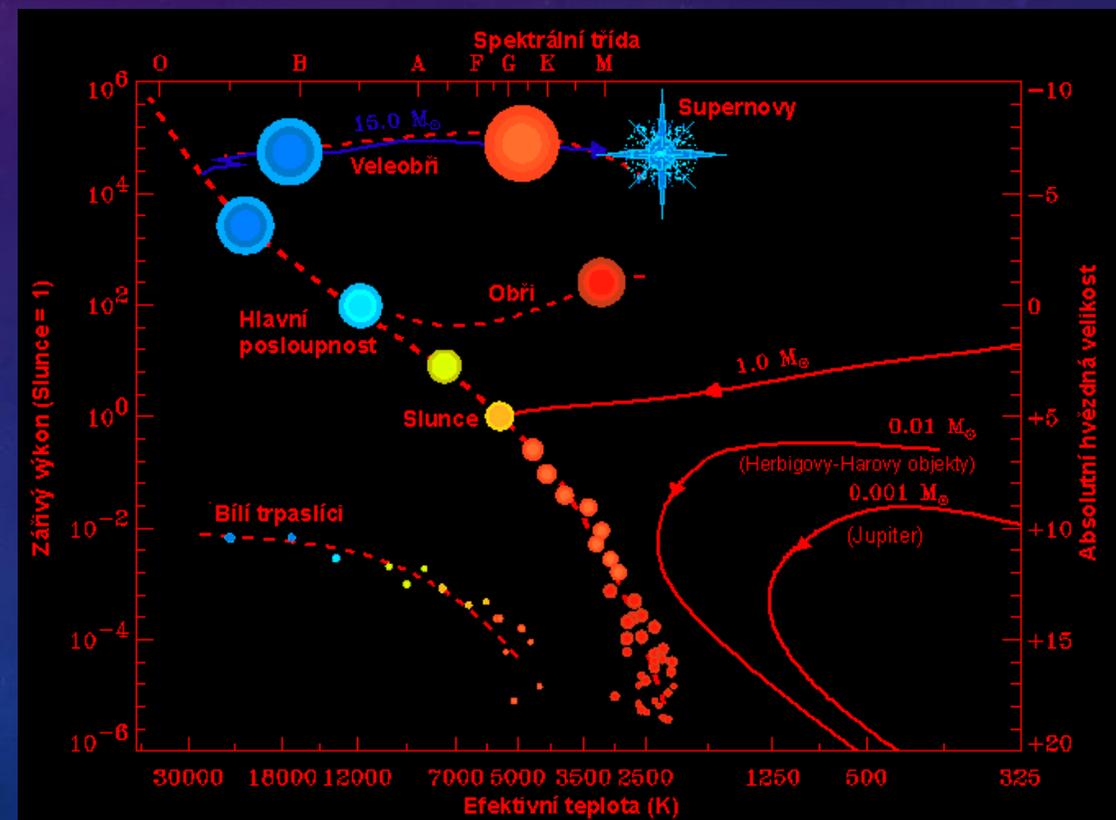
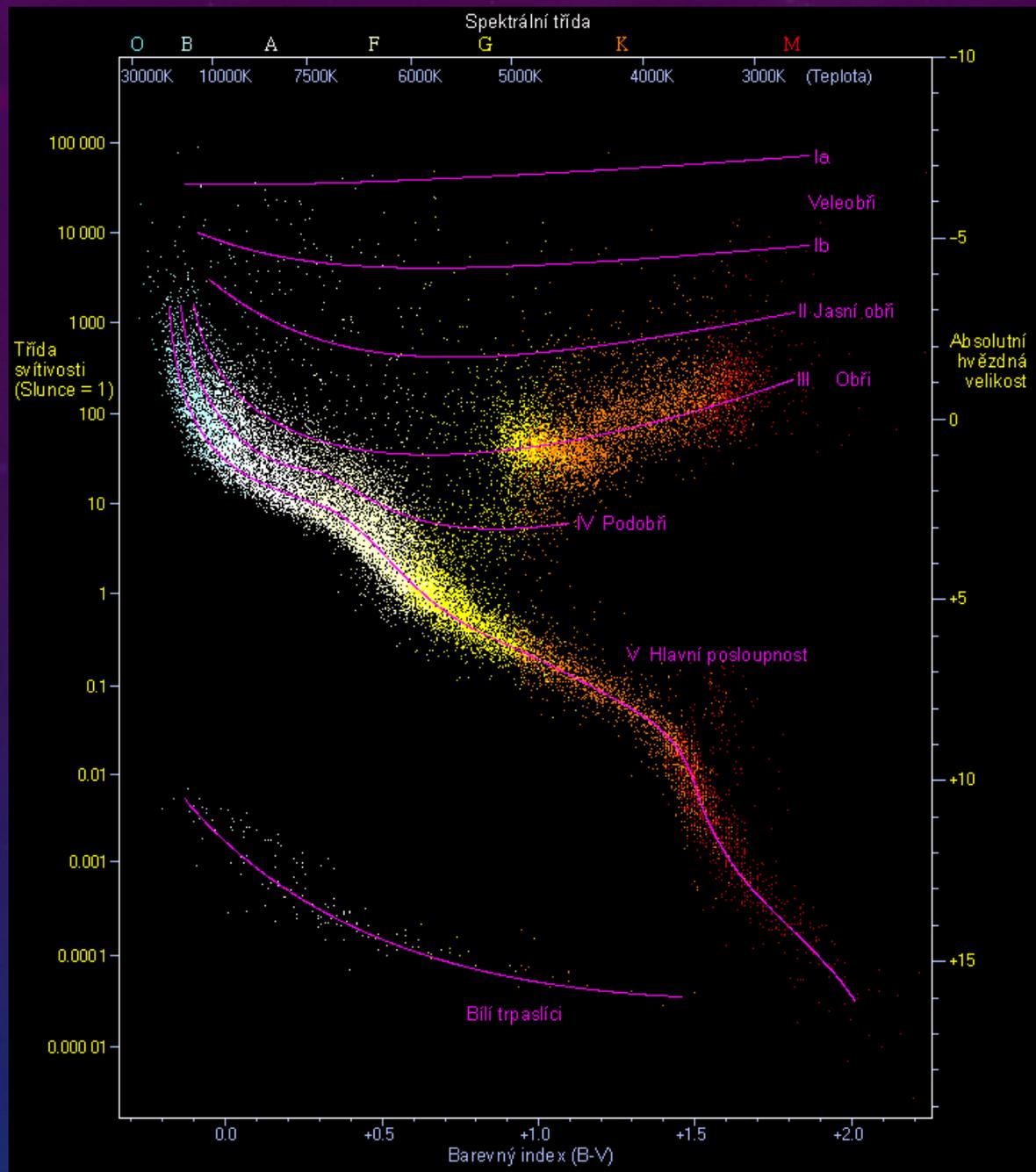
# LUMINOZITNÍ TŘÍDY

## MORGANOVA-KEENANOVA KLASIFIKACE

- od druhé poloviny 20. stol. se používá zdokonalené, dvouparametrické **Morganovy-Keenanovy klasifikace**, v níž se spektrální typ harvardské spektrální klasifikace na základě rozboru vzhledu spektra hvězdy doplňuje o tzv. *luminozitní třídu* (I – VII), která zhruba lokalizuje polohu obrazu hvězdy v H-R diagramu
- Ia – jasní veleobři      IV – podobři
- Ib – veleobři              V – hvězdy hlavní posloupnosti
- II – nadobři                VI – podtrpaslíci
- III – obři                    VII – bílí trpaslíci
- známe-li spektrální klasifikaci hvězdy v MK-klasifikaci, pak můžeme podle dostupných tabulek zhruba stanovit efektivní teplotu hvězdy, její absolutní hvězdnou velikost, čili i vzdálenost, a konečně i poloměr hvězdy a její vývojové stadium

# H-R DIAGRAM

- vyneseme-li si do grafu závislost základních charakteristik hvězd ( $M$ ,  $L$ ,  $T_e$  a  $R$ ), zjistíme, že obrazy jednotlivých hvězd v těchto diagramech nepokrývají jejich plochu rovnoměrně
- nejdříve byl sestrojen diagram zachycující závislost zářivého výkonu na efektivní teplotě ( $\log L - \log T_e$ ), všeobecně označovaný jako **Hertzsprungův-Russellův diagram**, zkráceně též **H-R diagram** - na počátku 20. století

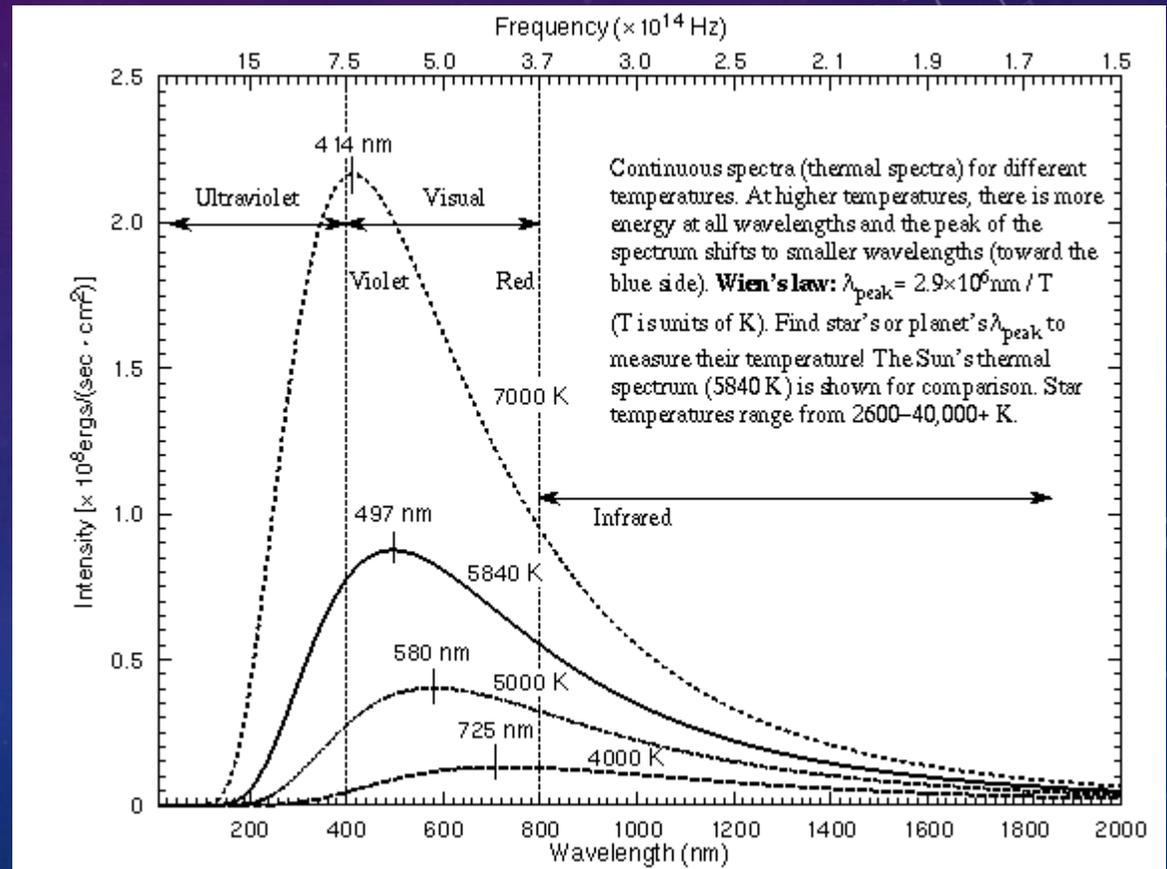


# STŘEDNÍ HODNOTY CHARAKTERISTIK HVĚZD HLAVNÍ POSLOUPNOSTI

Sp	$T_{ef}$ /K	$M/M_{\odot}$	$R/R_{\odot}$	$\log(L/L_{\odot})$	$\log(100g/ms^{-2})$	$\rho_s/kg\ m^{-3}$
O6	42 000	32	9,9	5,4	3,95	47
O8	35 600	22	7,5	4,9	4,00	73
B0	29 900	14,5	5,8	4,4	4,05	100
B2	23 100	8,6	4,3	3,7	4,10	150
B5	15 500	4,40	3,0	2,7	4,10	230
A0	9 400	2,25	2,1	1,5	4,15	350
A5	8 100	1,85	1,85	1,2	4,20	420
F0	7 200	1,50	1,55	0,75	4,25	560
F5	6 450	1,35	1,40	0,50	4,25	660
G0	5 900	1,15	1,25	0,25	4,30	830
G5	5 600	1,05	1,15	0,10	4,35	960
K0	5 200	0,90	1,00	-0,15	4,40	1 300
K5	4 300	0,60	0,70	-0,85	4,55	2 700
M0	3 900	0,45	0,50	-1,25	4,65	4 500
M5	3 250	0,25	0,30	-2,0	4,90	13 000
M8	2 600	0,10	0,15	-3,2	5,25	75 000

# VZTAH TEPLOTA – ZÁŘIVÝ VÝKON HVĚZD

- Stefanův – Boltzmannův zákon  $I = \sigma \times T^4$



The background is a dark blue gradient with a subtle pattern of white dots. On the left side, there are several overlapping circular elements. A prominent one is a large circular scale with tick marks and numbers ranging from 140 to 260. Other circles include dashed lines, solid lines, and arrows, suggesting a technical or scientific theme.

A TO JE VŠE, FOLKS!