Astronomie v barvách duhy

Astronomický ústav AV ČR

Marek Skarka

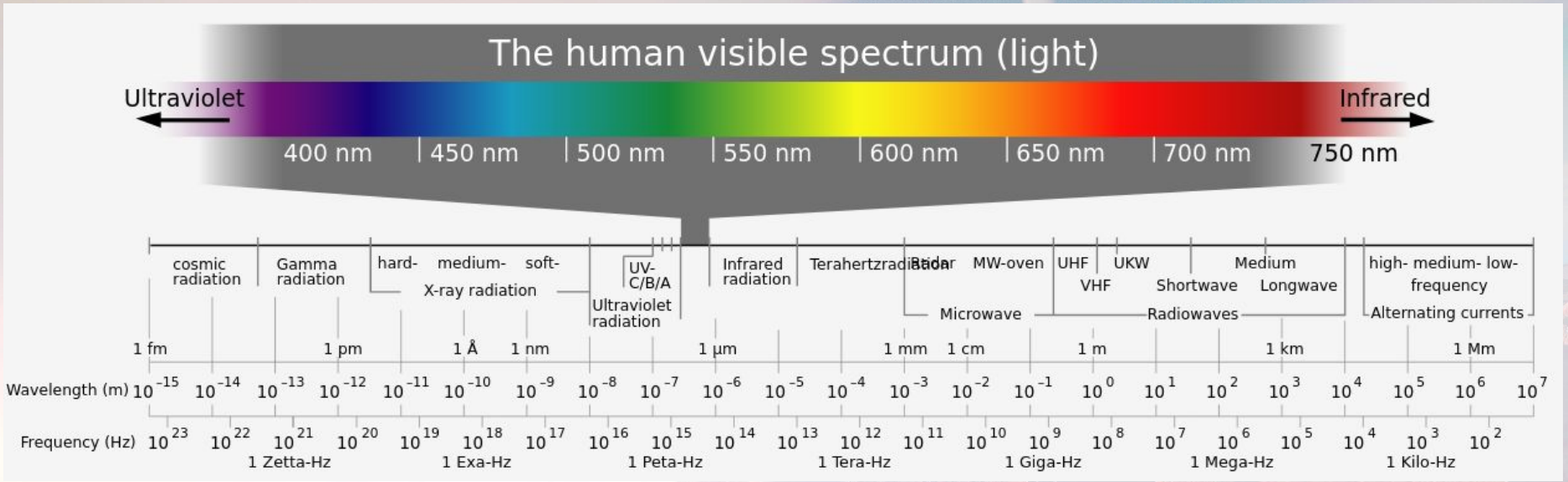
MUNI SCI

Astronomický ústav AV ČR & MU Brno, skarka@asu.cas.cz

U3V, Brno

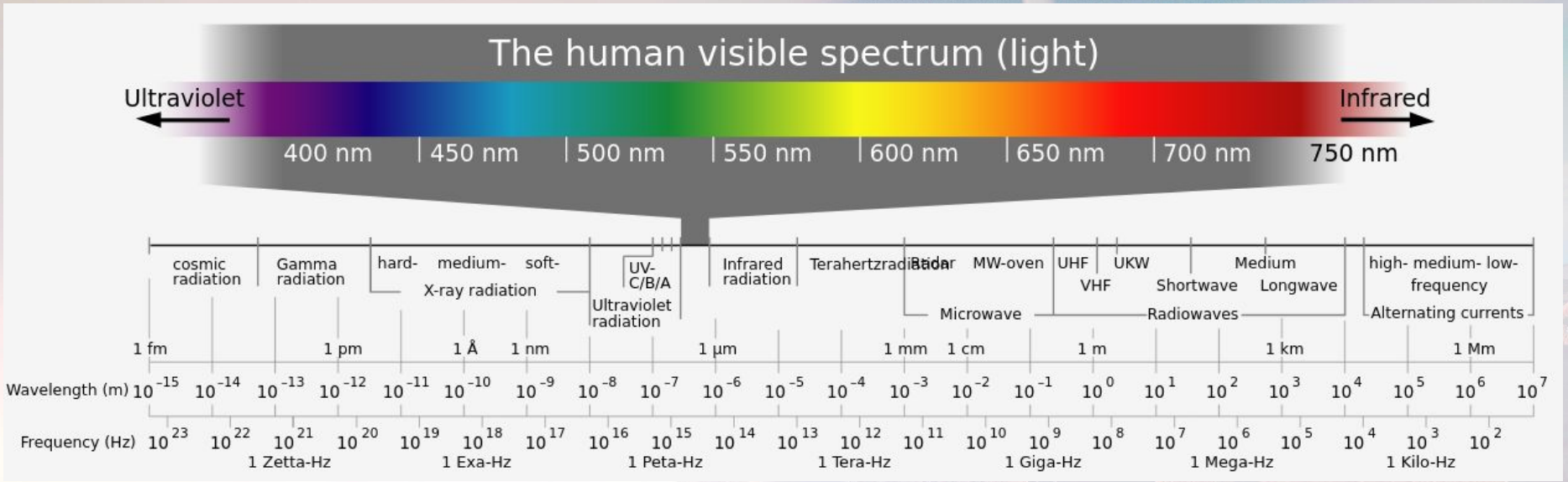
4.5.2021

Vznik záření

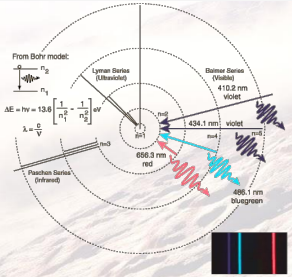


Procesy v atomových jádrech a blízkosti černých děr, splynutí objektů

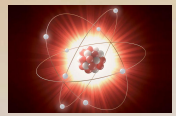
Vznik záření



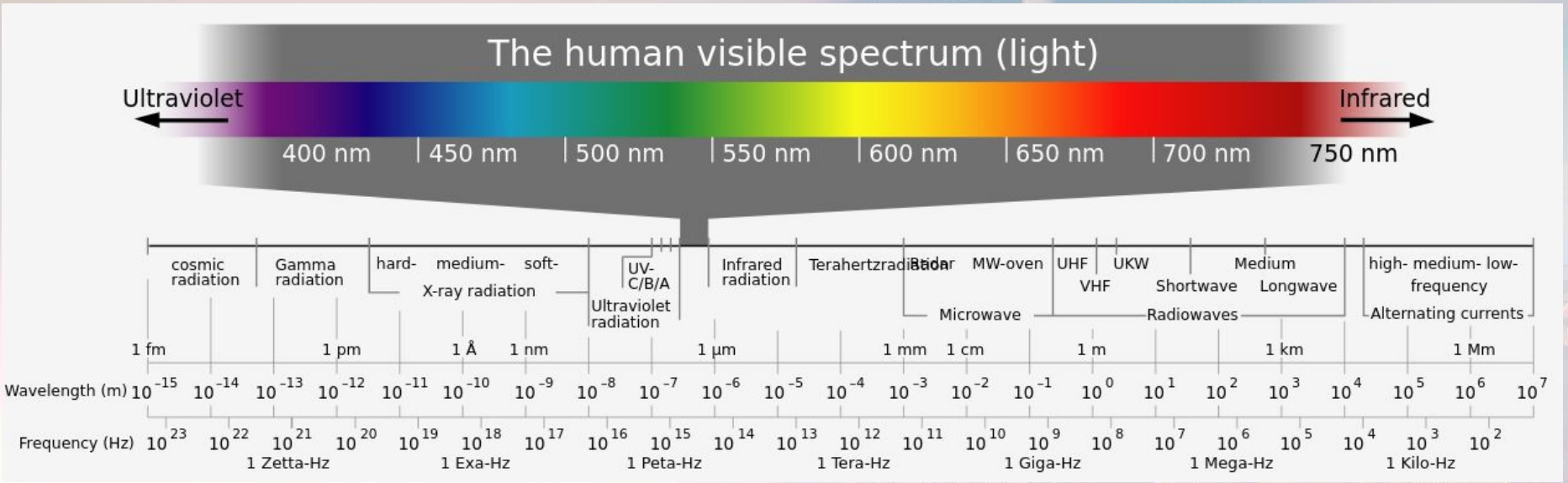
Procesy v atomových jádrech a blízkosti černých děr, splynutí objektů



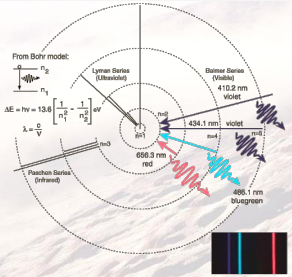
Procesy v atomových obalech



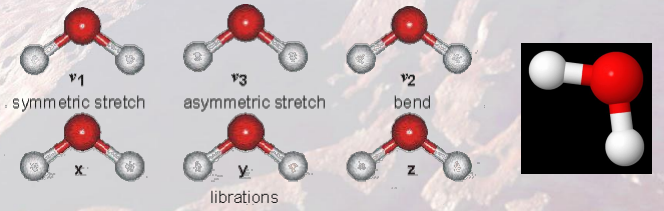
Vznik záření



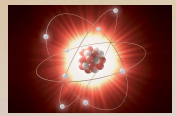
Procesy v atomových jádrech a blízkosti černých děr, splynutí objektů



Procesy v atomových obalech



Vibrace a rotace molekul, procesy na volných elektronech



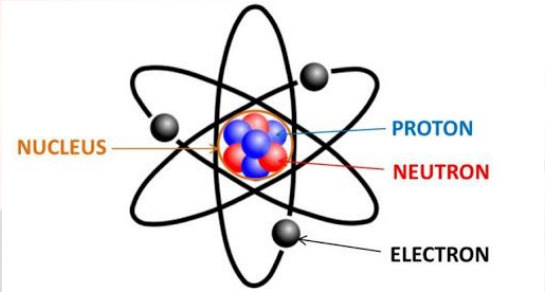
Vznik optického záření

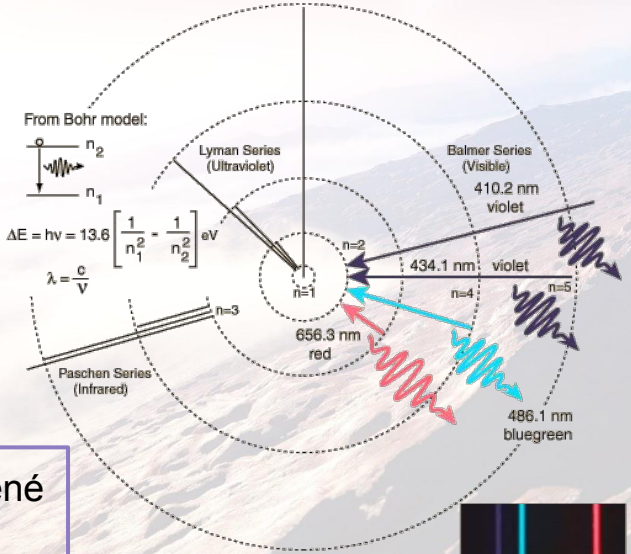
- Záření vzniká v atomech a molekulách změnami jejich energetických stavů
- Elektrony mohou být v atomech pouze v konkrétních stavech energie a momentu hybnosti s určitou orientací (kvantová čísla *n, l, m*). Při přechodu mezi stavy dochází k vyzáření fotonu s přesně definovanou konkrétní vlnovou délkou

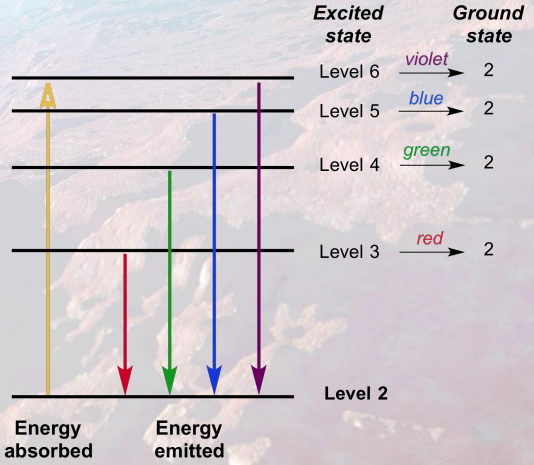
$\Delta E = h.\nu$ … frekvence záření ν je definována rozdílem energií jednotlivých stavů

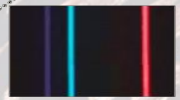
$c = \lambda.\nu$ … vlnová délka λ je s frekvencí ν svázána přes rychlost světla c.

→ Čím větší frekvence, tím kratší vlnová délka, tím větší energie záření

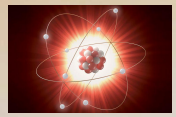








Spektrum: “Množství energie vyzářené na různých vlnových délkách”



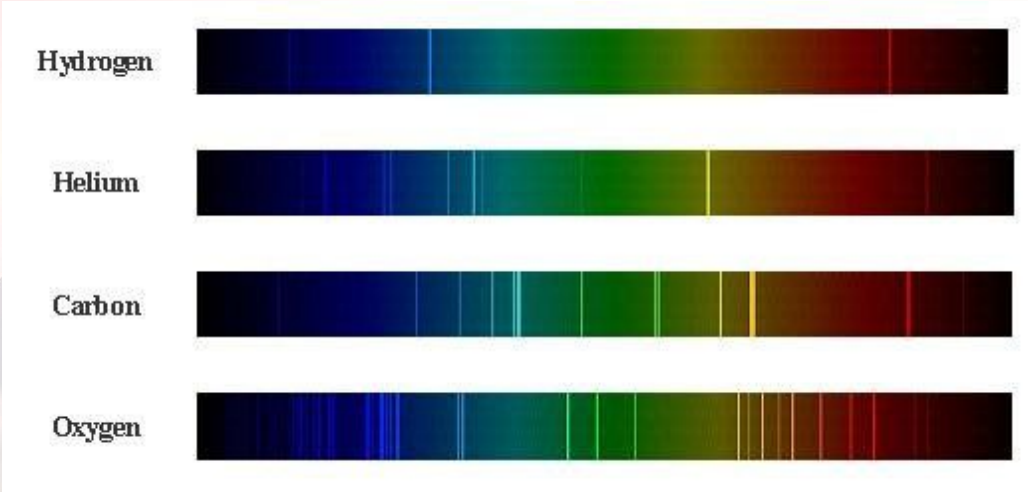
Vznik optického záření

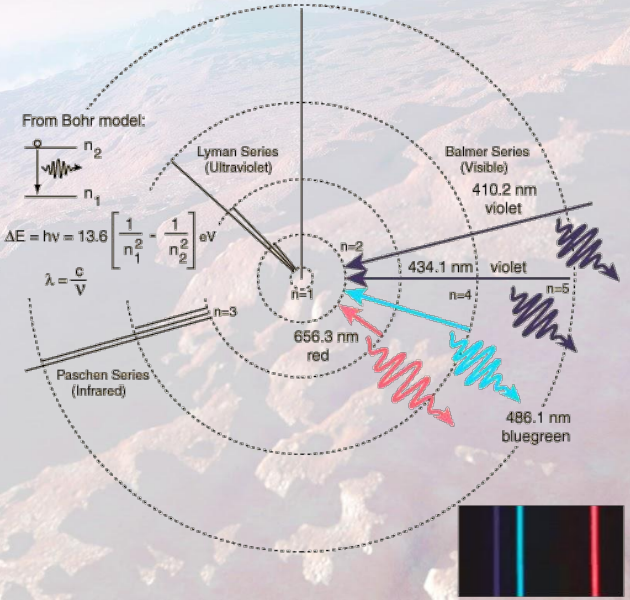
- Záření vzniká v atomech a molekulách změnami jejich energetických stavů
- Elektrony mohou být v atomech pouze v konkrétních stavech energie a momentu hybnosti s určitou orientací (kvantová čísla *n, l, m*). Při přechodu mezi stavy dochází k vyzáření fotonu s přesně definovanou konkrétní vlnovou délkou

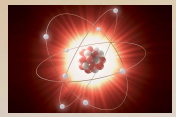
$\Delta E = h.\nu$ … frekvence záření ν je definována rozdílem energií jednotlivých stavů

$c = \lambda.\nu$ … vlnová délka λ je s frekvencí ν svázána přes rychlost světla c.

→ Čím větší frekvence, tím kratší vlnová délka, tím větší energie záření







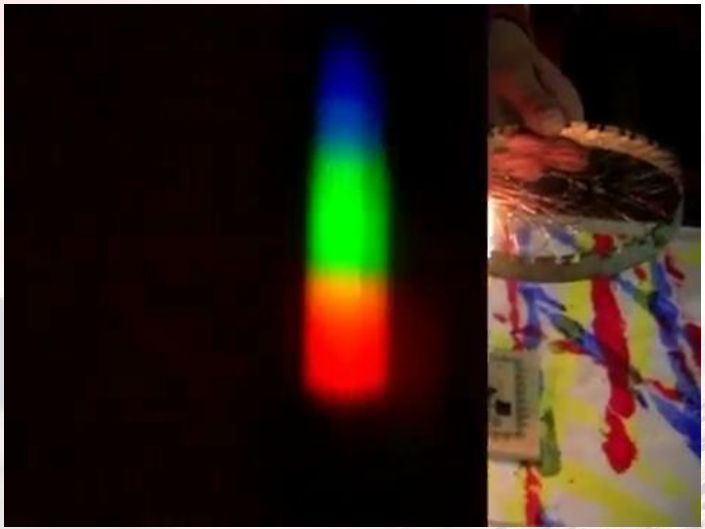
Vznik optického záření

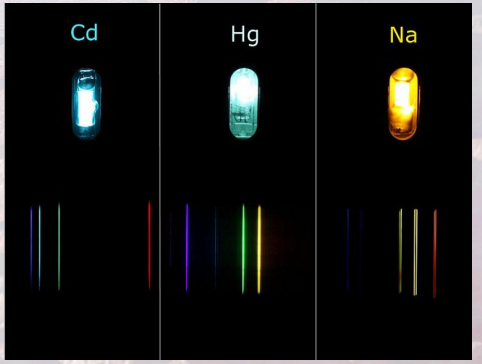
- Záření vzniká v atomech a molekulách změnami jejich energetických stavů
- Elektrony mohou být v atomech pouze v konkrétních stavech energie a momentu hybnosti s určitou orientací (kvantová čísla *n, l, m*). Při přechodu mezi stavy dochází k vyzáření fotonu s přesně definovanou konkrétní vlnovou délkou

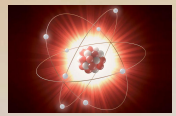
$\Delta E = h.\nu$ … frekvence záření ν je definována rozdílem energií jednotlivých stavů

$c = \lambda.\nu$ … vlnová délka λ je s frekvencí ν svázána přes rychlost světla c.

→ Čím větší frekvence, tím kratší vlnová délka, tím větší energie záření







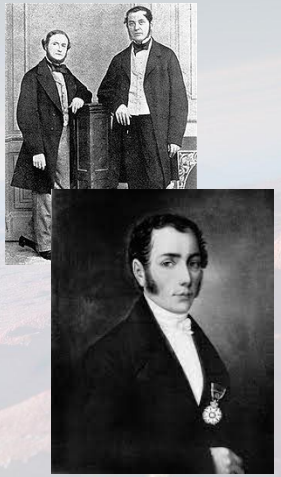
Vznik optického záření

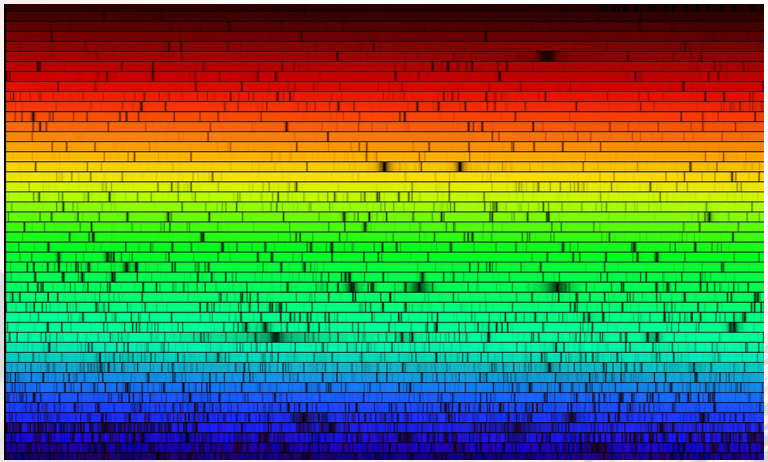
- Záření vzniká v atomech a molekulách změnami jejich energetických stavů
- Elektrony mohou být v atomech pouze v konkrétních stavech energie a momentu hybnosti s určitou orientací (kvantová čísla *n, l, m*). Při přechodu mezi stavy dochází k vyzáření fotonu s přesně definovanou konkrétní vlnovou délkou

$\Delta E = h.\nu$ … frekvence záření ν je definována rozdílem energií jednotlivých stavů

$c = \lambda.\nu$ … vlnová délka λ je s frekvencí ν svázána přes rychlost světla c.

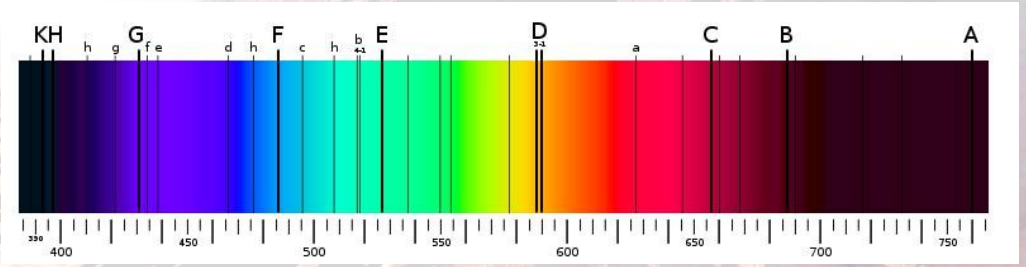
→ Čím větší frekvence, tím kratší vlnová délka, tím větší energie záření





Z přítomnosti záření na konkrétních vlnových délkách můžeme zjistit něco o přítomnosti různých chemických prvků

Robert Bunsen, Gustav Kirchhoff, Joseph von Fraunhofer - vznik astrofyziky v první polovině 19. století



Jak hmota září

$$B(T,\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- Každé těleso září v přibližně jako absolutně černé těleso
  = těleso jehož vyzařování je plně definováno jeho teplotou

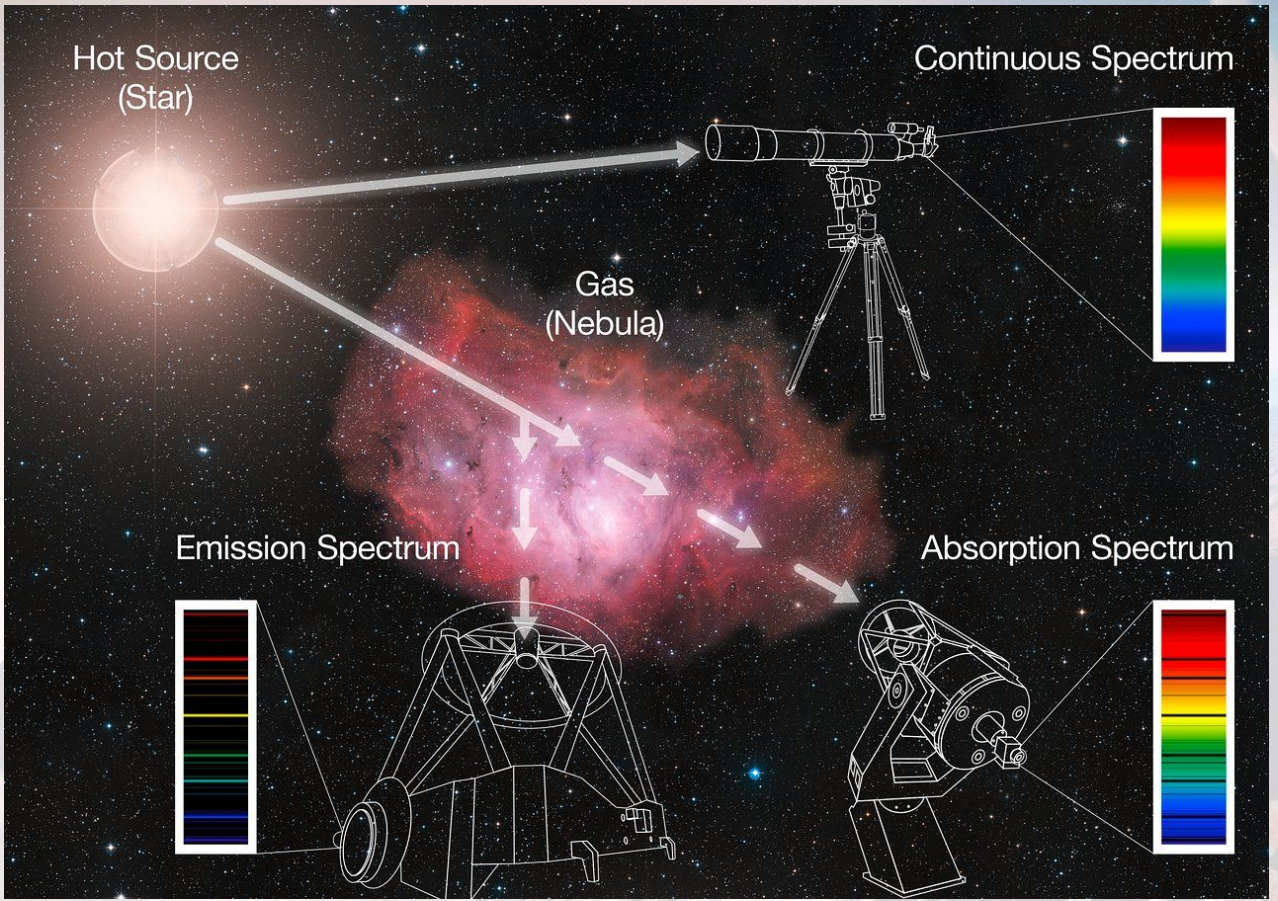
$$L = 4\pi\sigma R_*^2 T_{\text{eff}}^4$$

$$\lambda_{\max} T = b = 2.897 \cdot 10^{-3}\ \text{m K}$$

Čím teplejší je těleso, tím “modřejší” se nám jeví

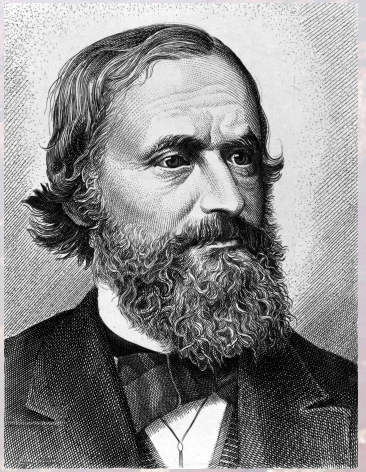
https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/1.0.7/blackbody-spectrum_cs.html

Jak hmota září

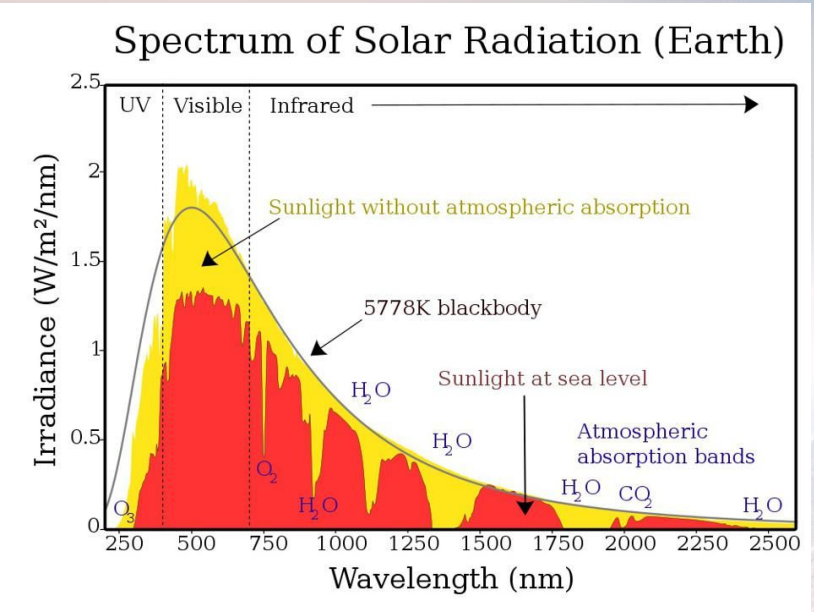


Kirchhoffovy zákony:

1. Pevná látka, kapalina nebo hustý plyn vyzařuje na všech vlnových délkách a vytváří tak spojité spektrum.
2. Horký řídký plyn září emisním spektrem
3. Chladný plyn při průchodu spojitého spektra vytváří absorpční spektrum

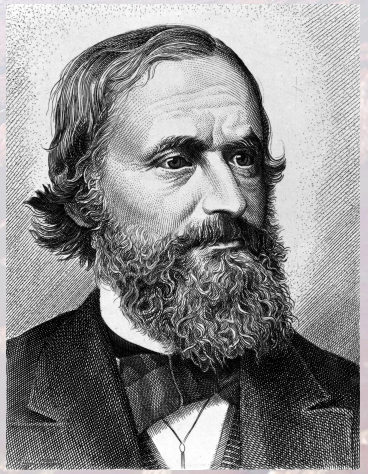


Jak hmota září



Kirchhoffovy zákony:

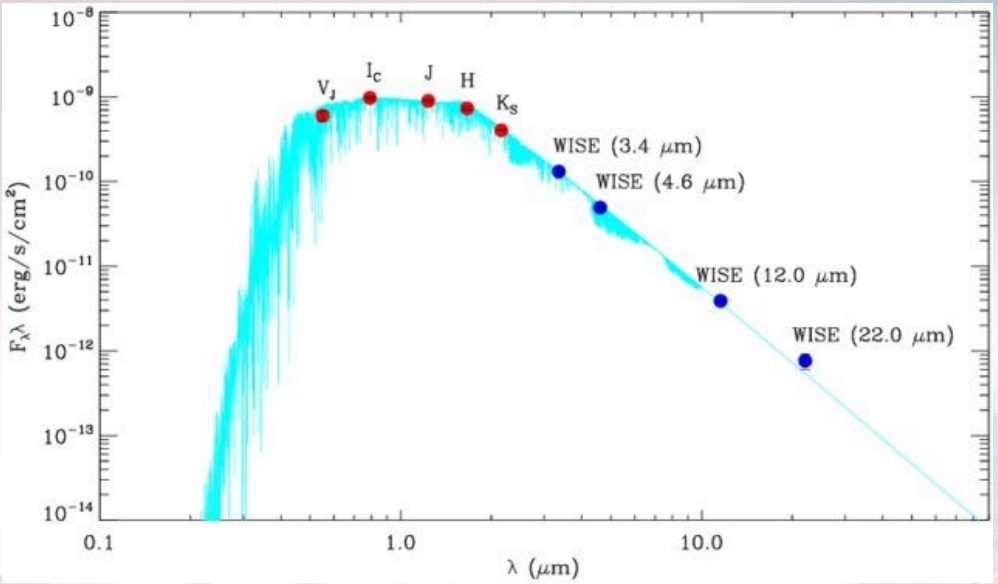
1. Pevná látka, kapalina nebo hustý plyn vyzařuje na všech vlnových délkách a vytváří tak spojité spektrum.
2. Horký řídký plyn září emisním spektrem
3. Chladný plyn při průchodu spojitého spektra vytváří absorpční spektrum



Hvězdy září jako absolutně černá tělesa v kombinaci s emisními čarami (horký materiál v okolí hvězdy) a absorpčními čarami (chladnější atmosféra hvězdy)

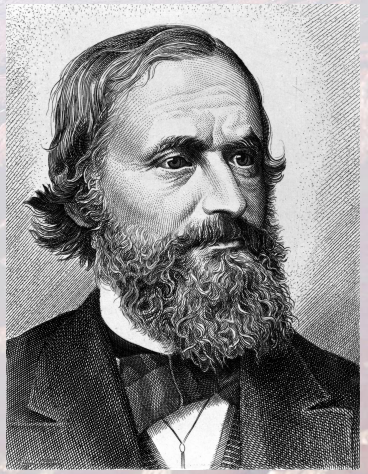
Výzkumem celkového záření hvězd můžeme zjistit teplotu hvězdy, z přítomnosti spektrálních čar můžeme odhadnout chemické složení atmosféry a povrchových vrstev

Jak hmota září



Kirchhoffovy zákony:

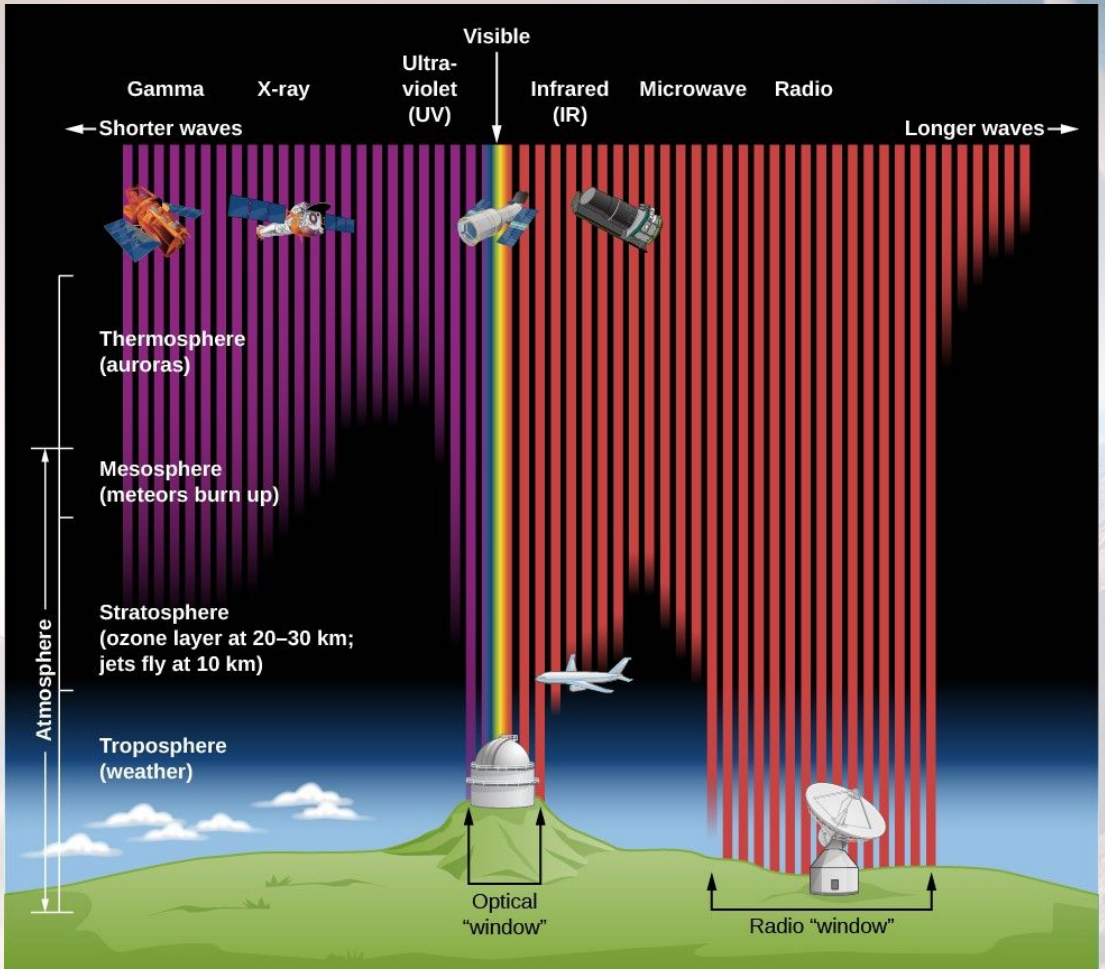
1. Pevná látka, kapalina nebo hustý plyn vyzařuje na všech vlnových délkách a vytváří tak spojité spektrum.
2. Horký řídký plyn září emisním spektrem
3. Chladný plyn při průchodu spojitého spektra vytváří absorpční spektrum



Hvězdy září jako absolutně černá tělesa v kombinaci s emisními čarami (horký materiál v okolí hvězdy) a absorpčními čarami (chladnější atmosféra hvězdy)

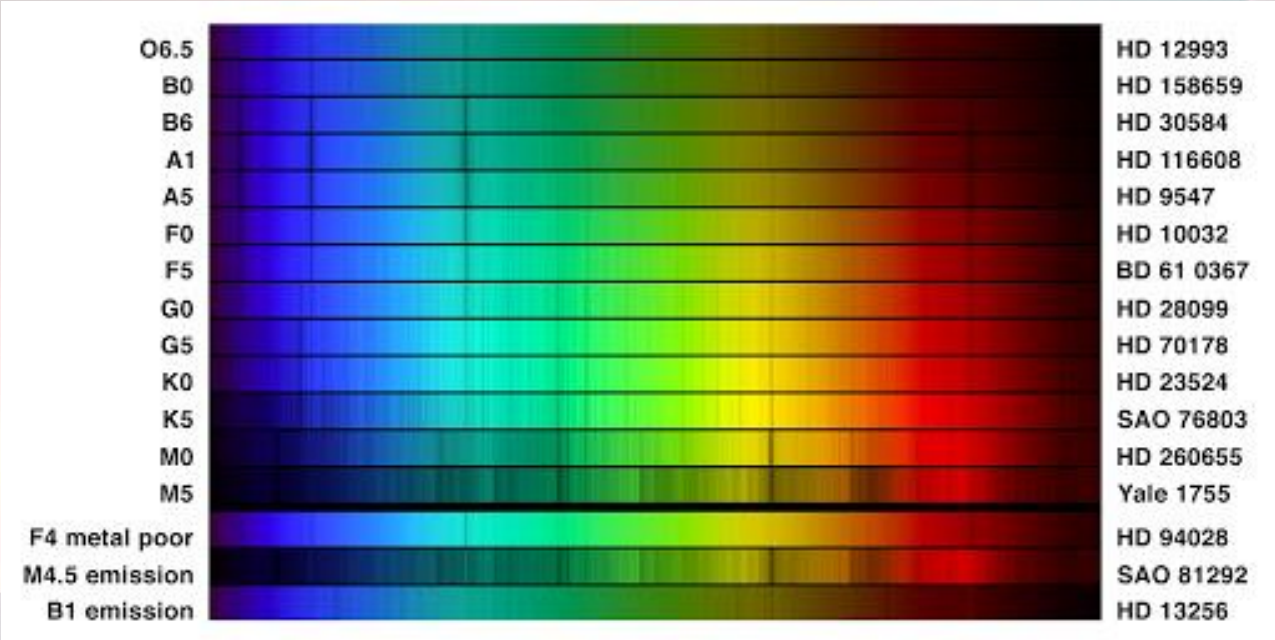
Výzkumem celkového záření hvězd můžeme zjistit teplotu hvězdy, z přítomnosti spektrálních čar můžeme odhadnout chemické složení atmosféry a povrchových vrstev

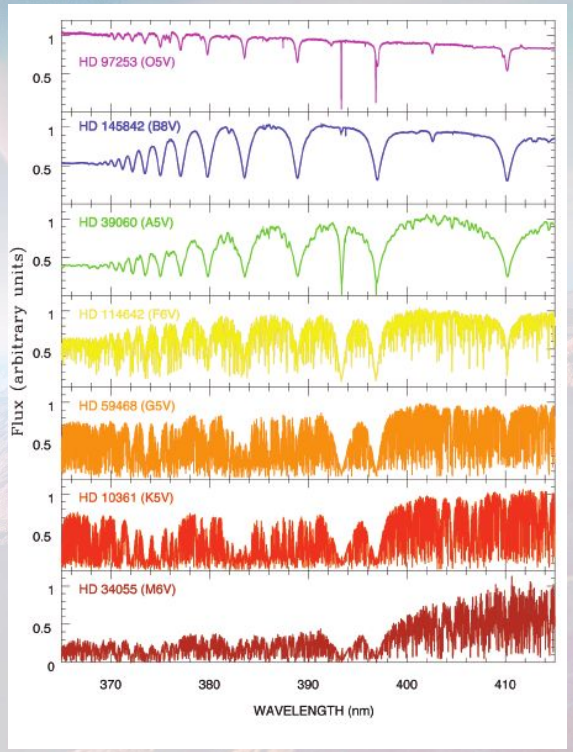
Co můžeme zjistit ze spekter



Zemská atmosféra silně limituje možnosti spektroskopických pozorování pouze na část UV, VIS, IR a rádiovou oblast

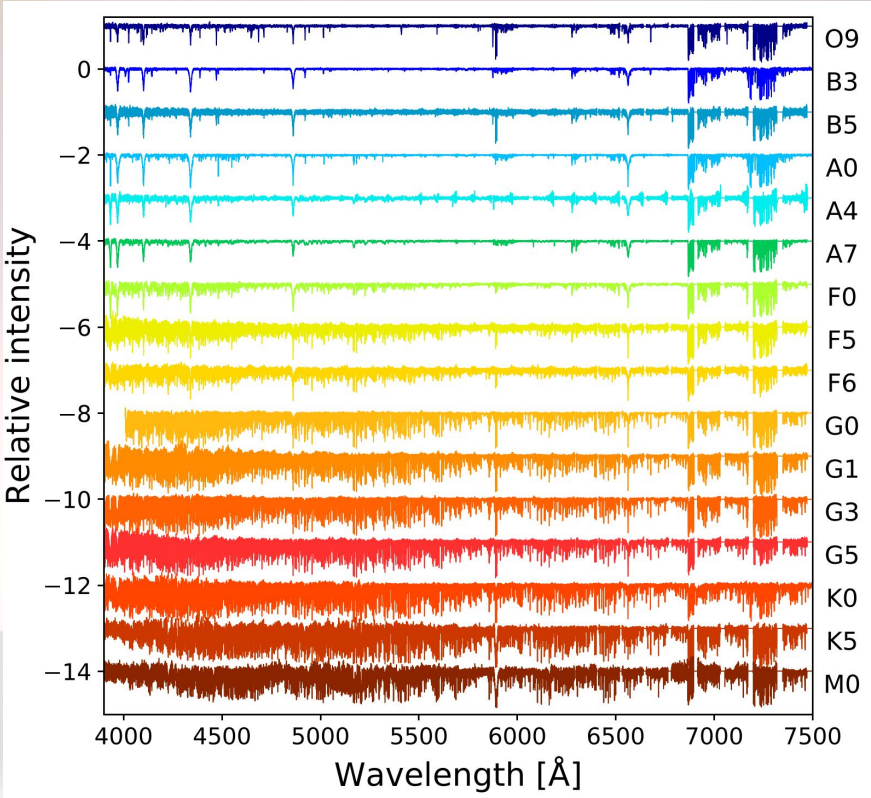
Co můžeme zjistit ze spekter

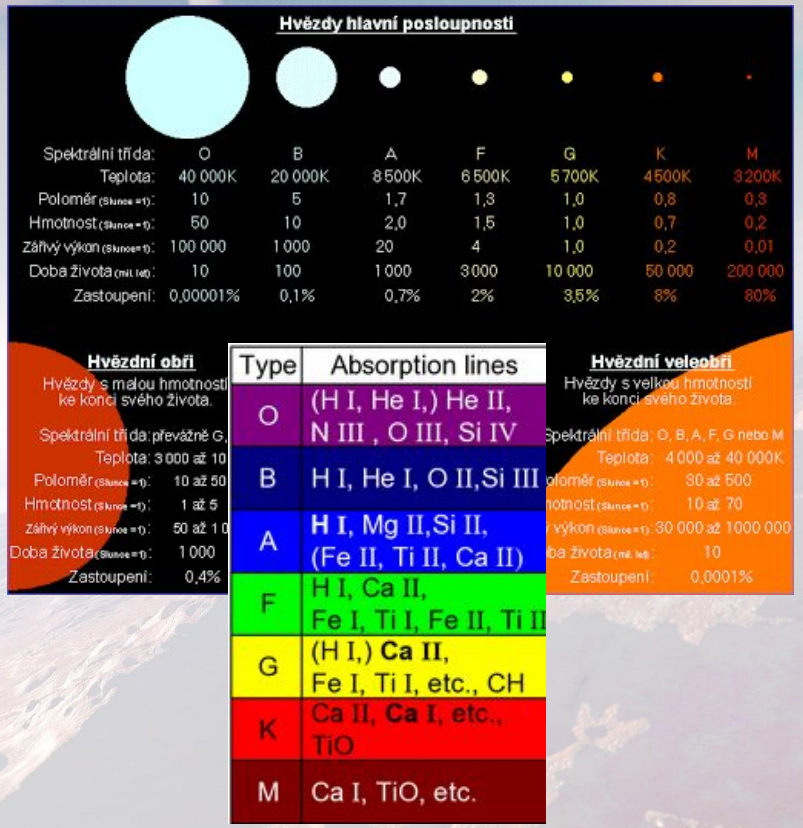




Spektra různých typů hvězd se liší jak v průběhu spektra a jeho intenzitě, tak v přítomnosti, počtu a síle absorpčních/emisních čar => dáno především teplotou => spektrální klasifikace hvězd

Co můžeme zjistit ze spekter





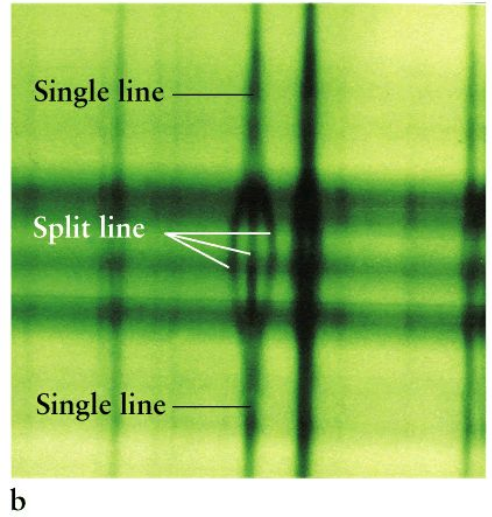
Spektra různých typů hvězd se liší jak v průběhu spektra a jeho intenzitě, tak v přítomnosti, počtu a síle absorpčních/emisních čar => dáno především teplotou => spektrální klasifikace hvězd

Co můžeme zjistit ze spekter

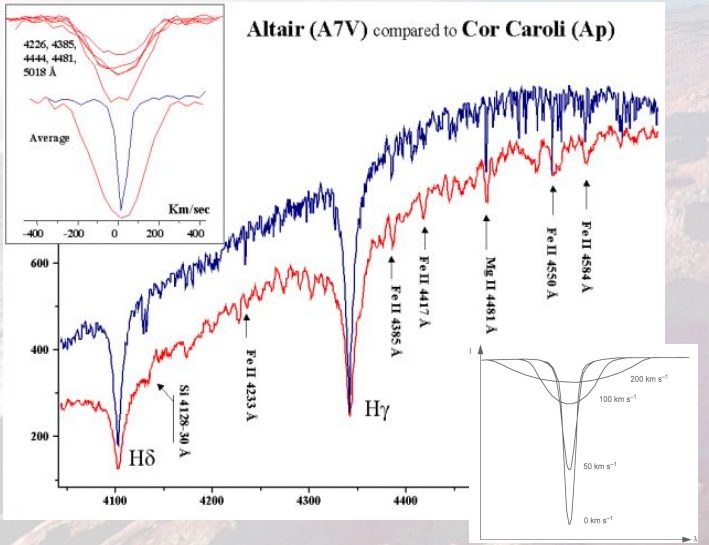
Vzhled spektra kromě teploty dále ovlivňuje:

- Gravitační zrychlení na povrchu (široké čáry u hvězd s velkým log g)
- Rotace hvězdy (rozšíření čar vlivem Dopplerova jevu)
- Chemické složení (různá síla čar)
- Vlastní pohyb hvězdy (posun čar vlivem Dopplerova jevu)
- Přítomnost souputníka (dvojhvězdy, exoplanety)
- Okolohvězdný materiál
- Magnetická pole
- ...

+instrumentální jevy



Vliv rychlosti rotace hvězdy



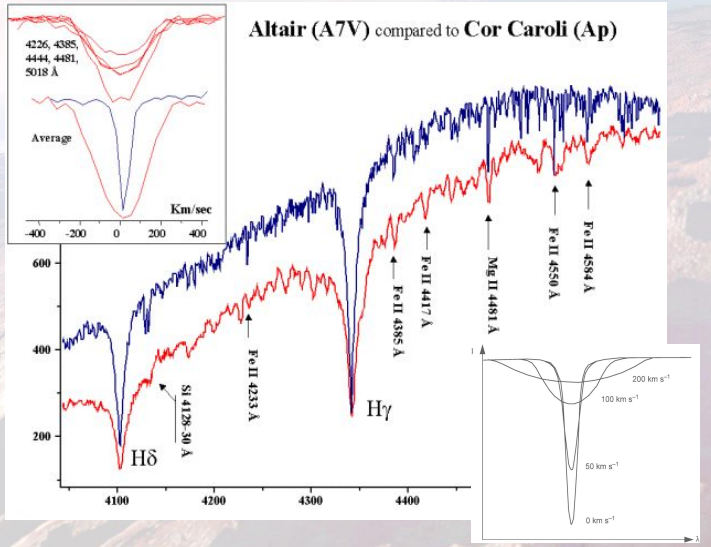
Co můžeme zjistit ze spekter

Vzhled spektra kromě teploty dále ovlivňuje:

- Gravitační zrychlení na povrchu (široké čáry u hvězd s velkým log g)
- Rotace hvězdy (rozšíření čar vlivem Dopplerova jevu)
- Chemické složení (různá síla čar)
- Vlastní pohyb hvězdy (posun čar vlivem Dopplerova jevu)
- Přítomnost souputníka (dvojhvězdy, exoplanety)
- Okolohvězdný materiál
- Magnetická pole
- ...

+instrumentální jevy

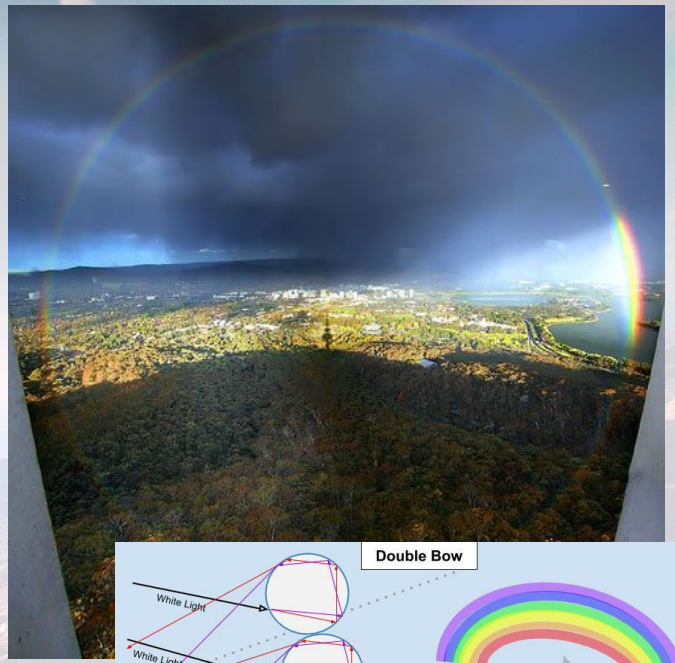
Vliv rychlosti rotace hvězdy



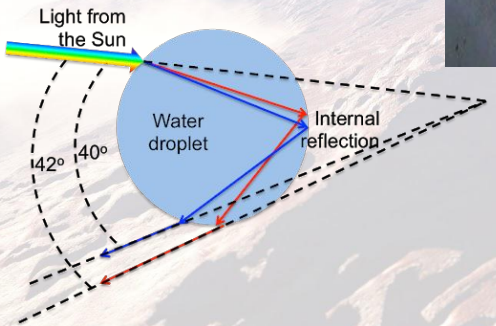
Jak získáme spektrum?

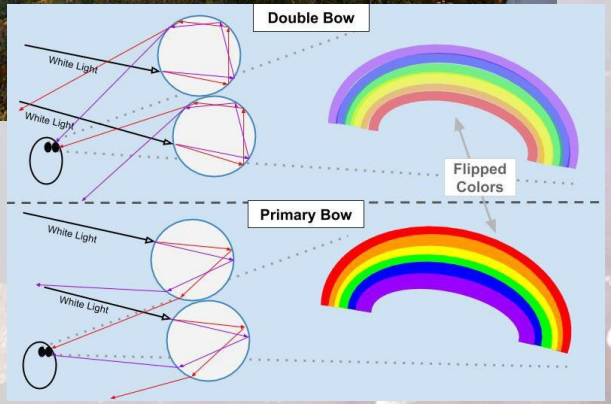
Jak získat spektrum

Jak získat spektrum



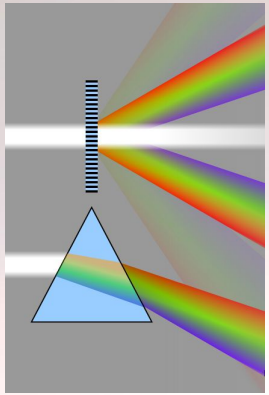
Díky rozdílnému indexu lomu pro různé barvy se světlo na vodních kapkách rozkládá do spektra v podobě duhy



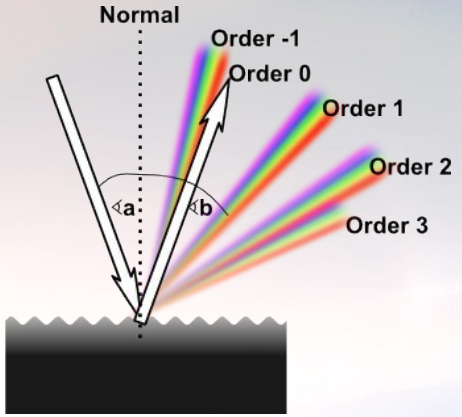


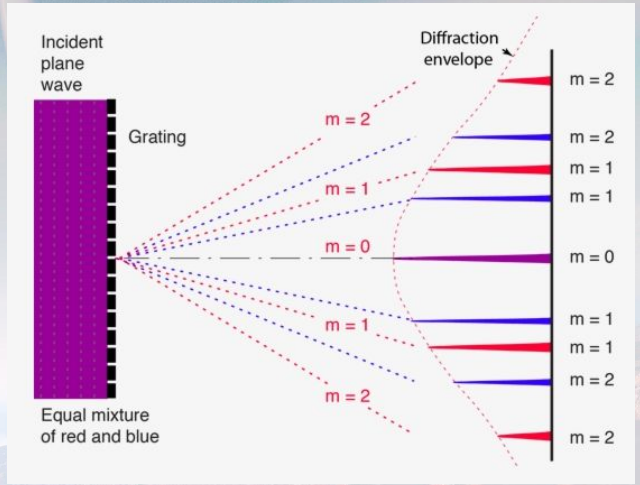
Jak získat spektrum

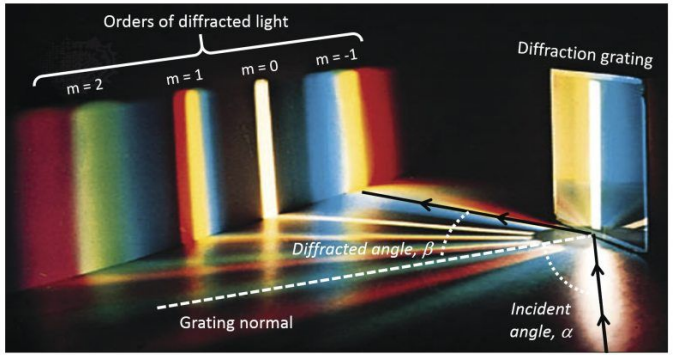
Lom a ohyb

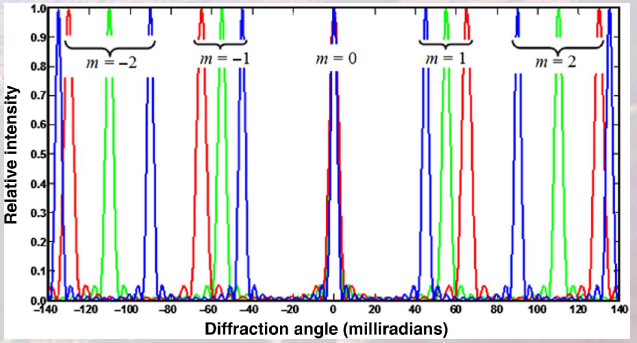


Odraz



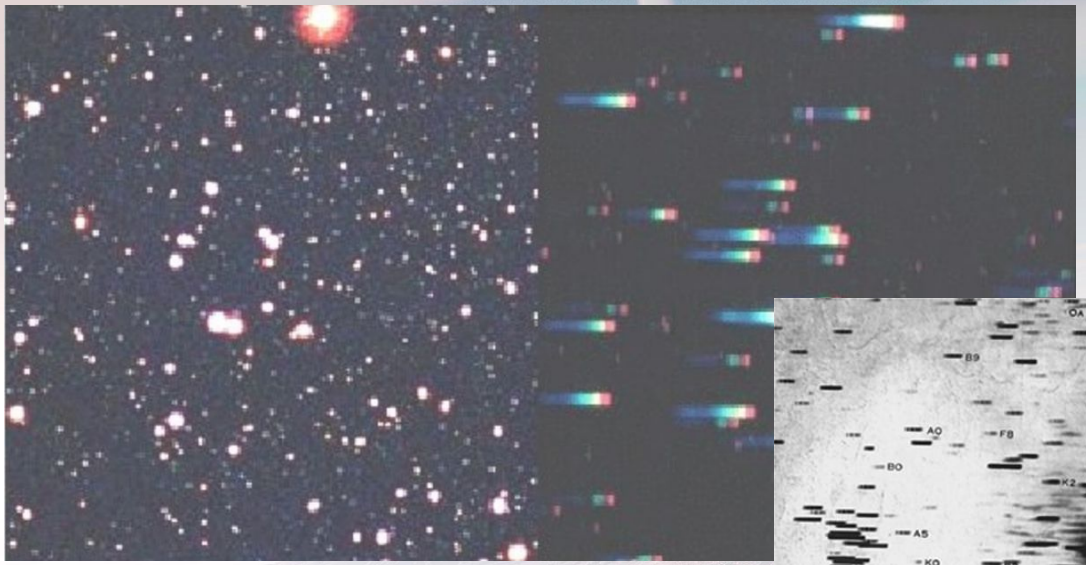


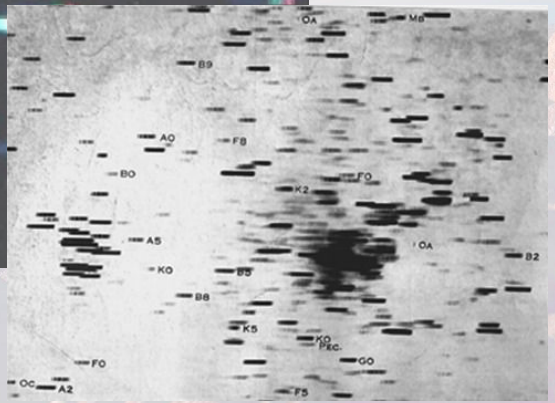




https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/2.0.2/wave-interference_cs.html

Jak získat spektrum



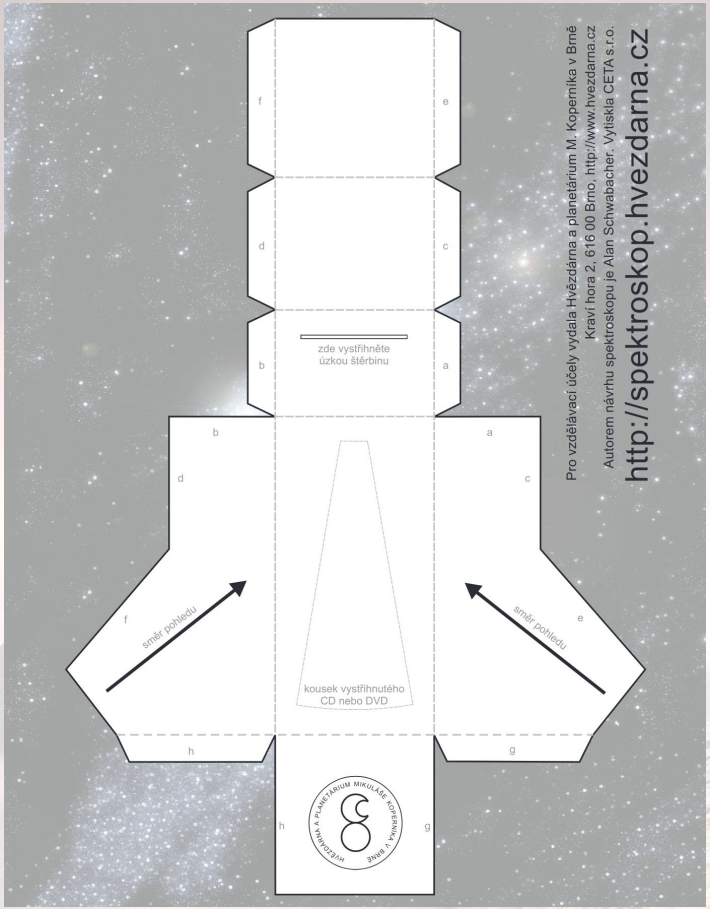


Spektrum mnoha objektů najednou s pomocí objektivového hranolu

=> první katalogy spektrálních typů na začátku 20. Století (Henry Draper catalogue)

Jak získat spektrum

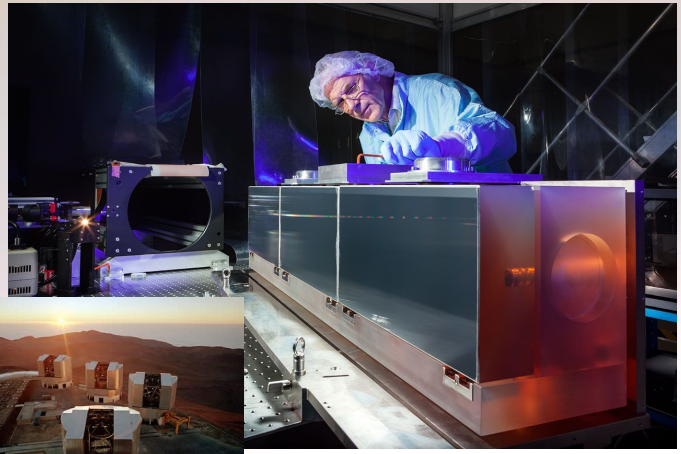
http://www.pise.cz/blog/ftp/fyzmatik/spektroskop.pdf

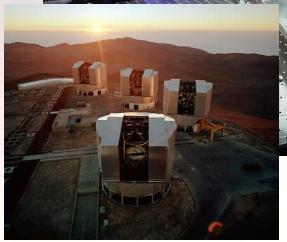


Rozkladem na mřížce - mřížkové spektrografy

Jak získat spektrum

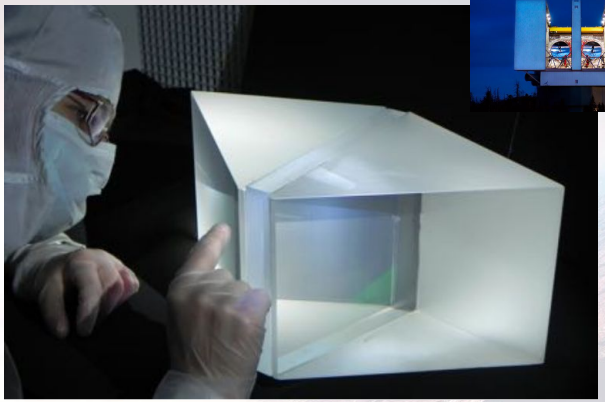
Rozkladem na mřížce - mřížkové spektrografy

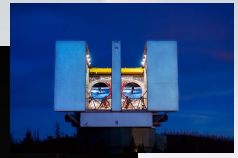


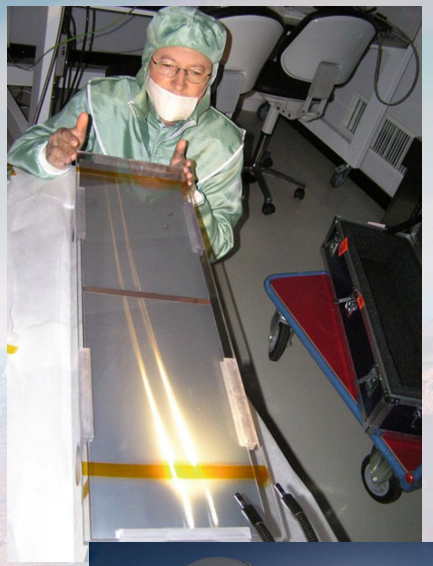


ESPRESSO@VLT, Chile

PEPSI@LBT, USA

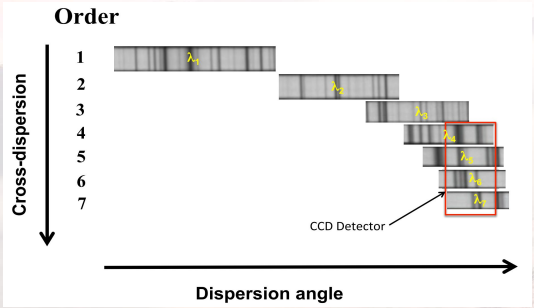




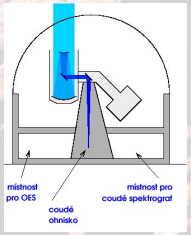


HARPS@3.6m, Chile

Echelletové spektrografy umožňují pozorování v širokém rozsahu vlnových délek při velkém rozlišení



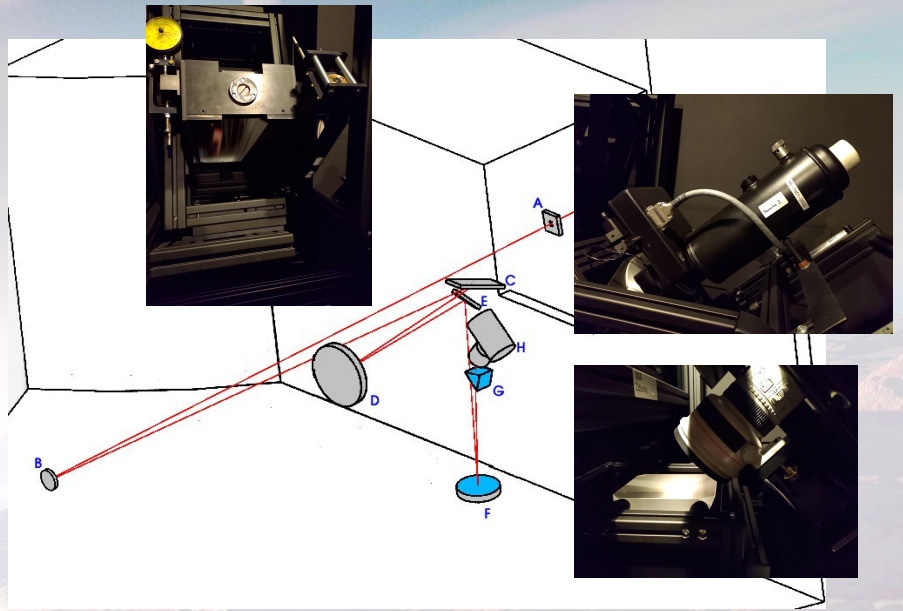
Ondřejovský Ešeletový Spektrograf - OES



Od roku 2005 v coudé ohnisku 2-m Perkova dalekohledu AsÚ AV ČR v Ondřejově
2019 - světlo vedeno vláknem

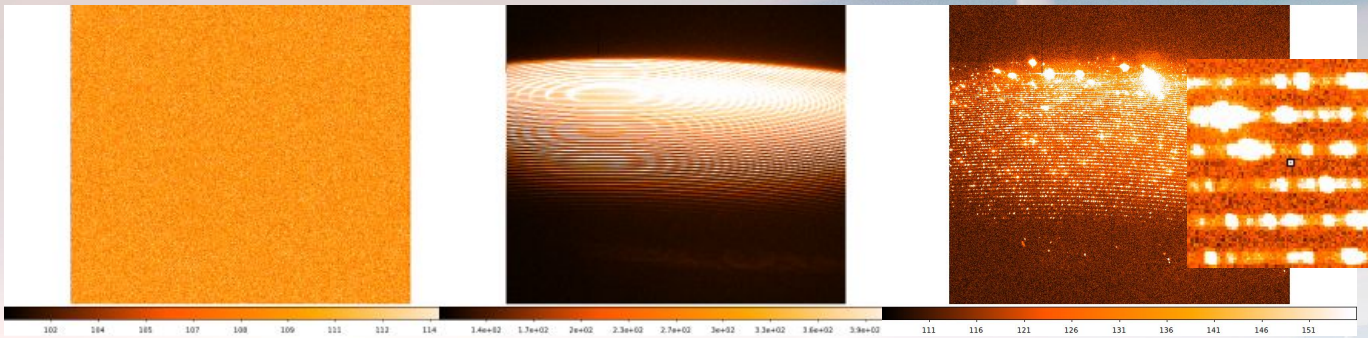
- detektor chlazen dusíkem
- stabilní teplota +-0.5 K
- ~3800-9100 Å)
- $R=\lambda/\Delta\lambda$ ~40000-77000

Ondřejovský Ešeletový Spektrograf - OES



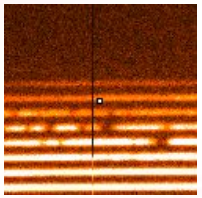
A - stěrbina 0.6 mm
B, F - kolimátory
C - mřížka (420x165 mm, 54.5 mm^{-1}, Θ_B=69°)
D - parabolické zrcadlo
E - rovinné zrcadlo
G - Cross dispersor (hranol)
H - objektiv (CANON EF 200 f1.8)+ detektor (CCD EEV 2048)

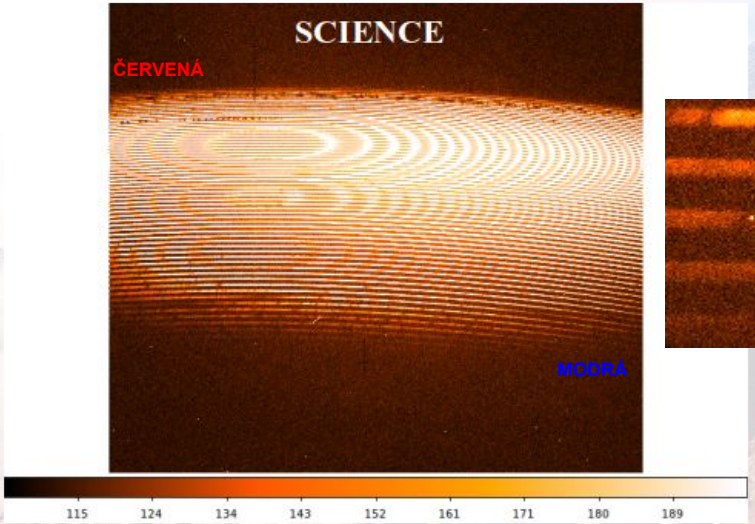
Od pozorování k finálnímu spektru

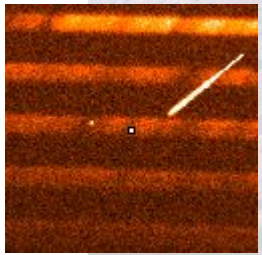


vadné pixely

okraje



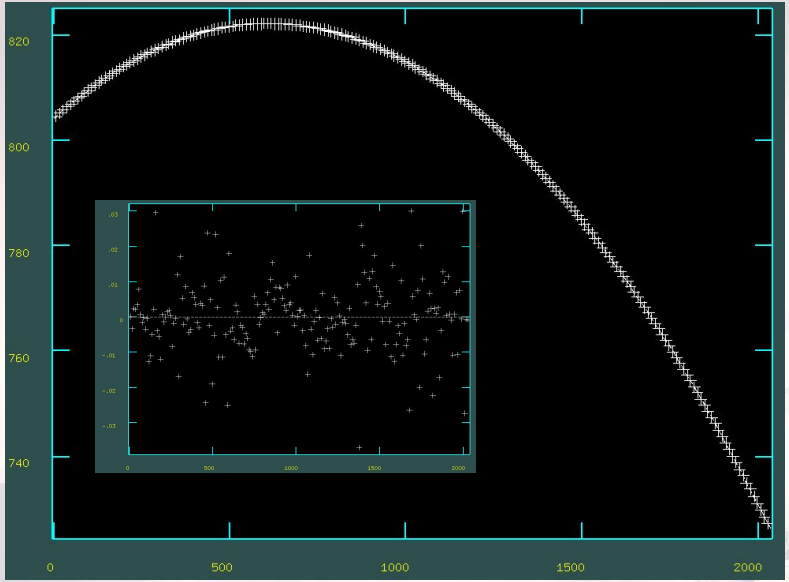


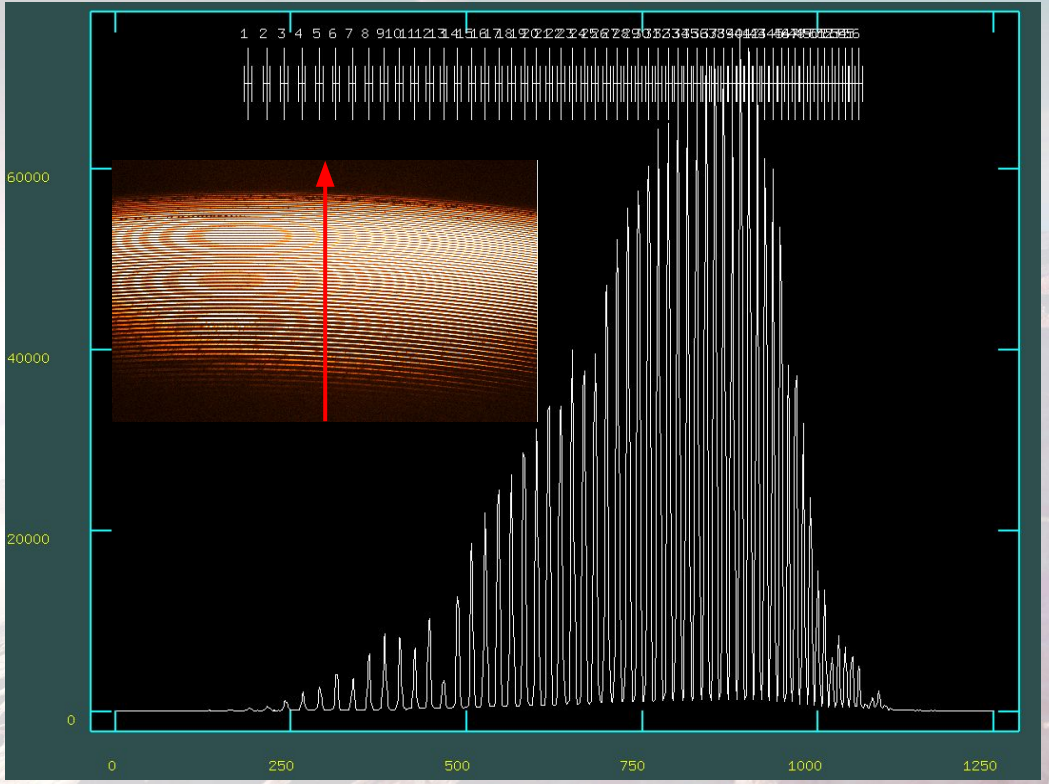


kosmíky

Od pozorování k finálnímu spektru

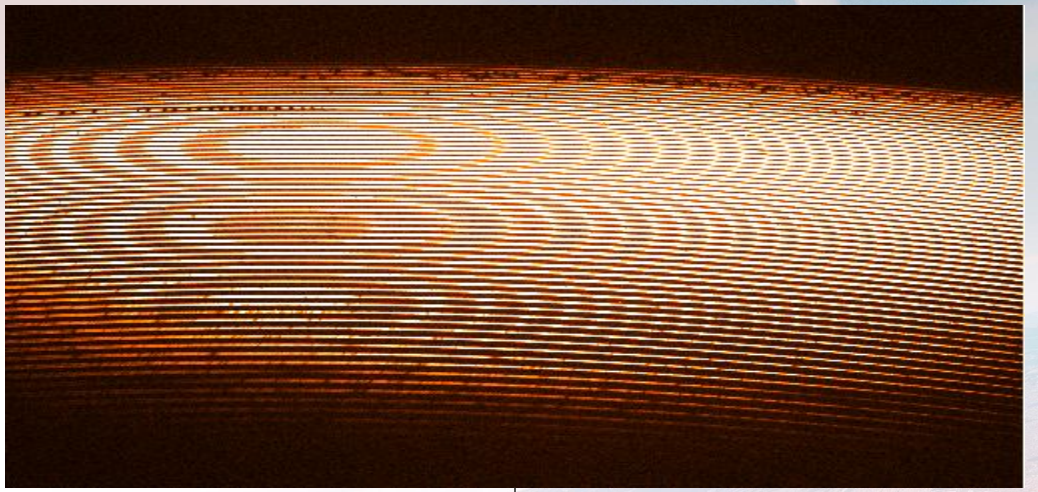
Extrakce apertur - identifikovat řády a extrahovat tok v jednotlivých řádech

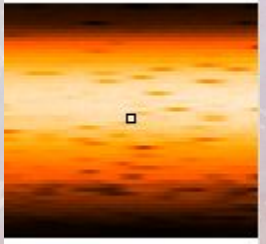




Od pozorování k finálnímu spektru

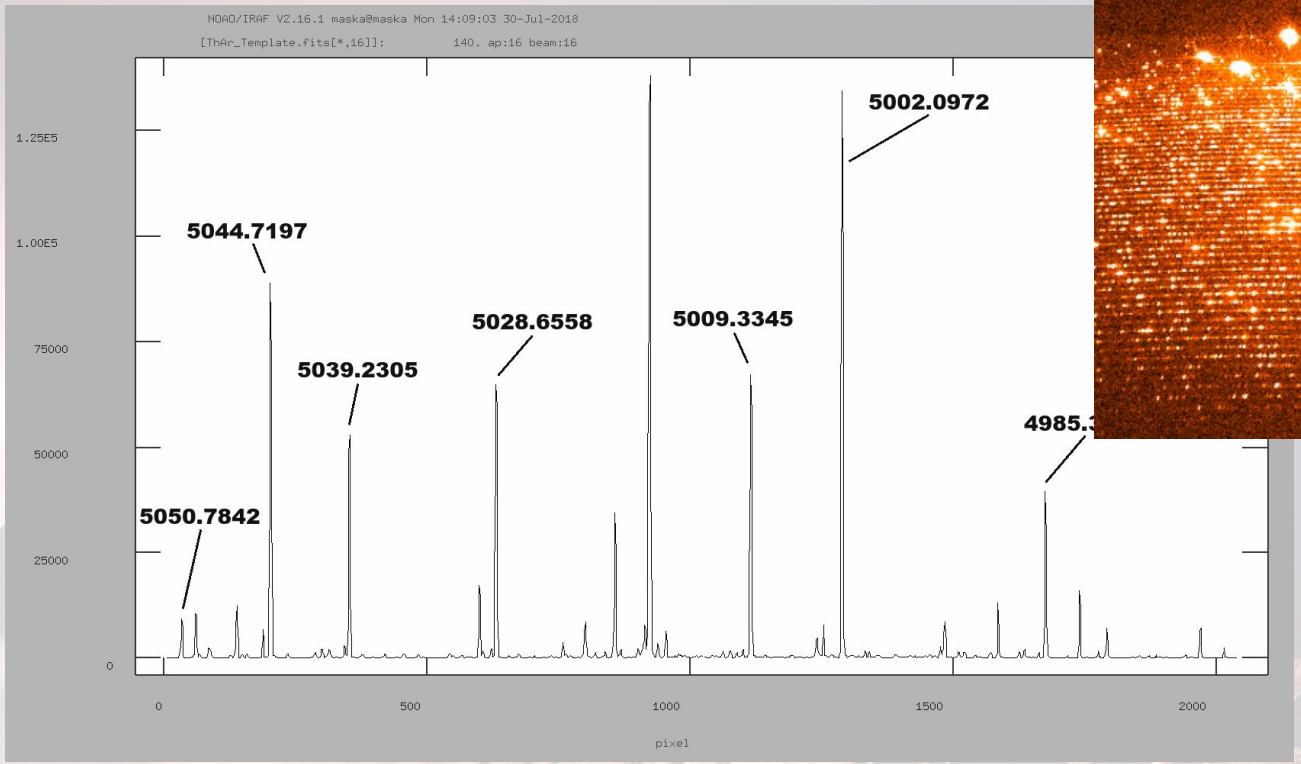
Extrakce apertur

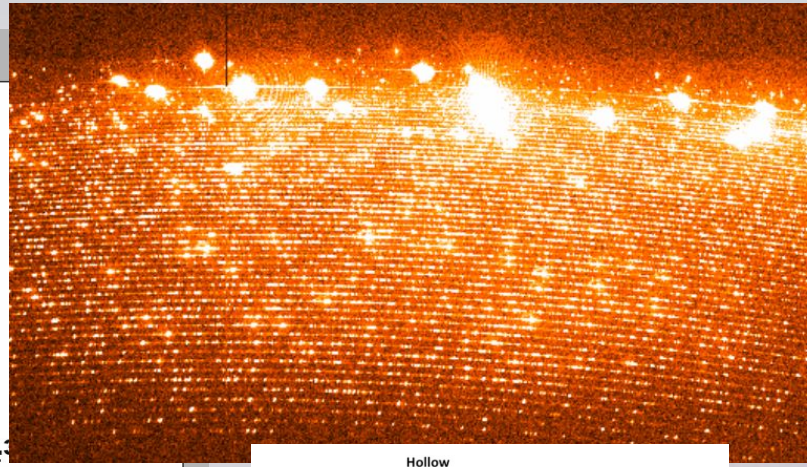


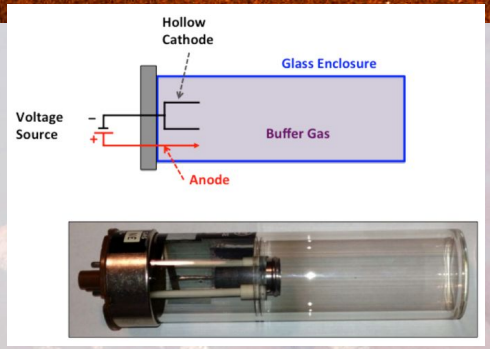


Od pozorování k finálnímu spektru

Vlnová kalibrace: pixely -> vlnové délky
Pomocí ThAr spektra. Je nutné identifikovat desítky čar přes celé spektrum, nejlépe v každém řádu.

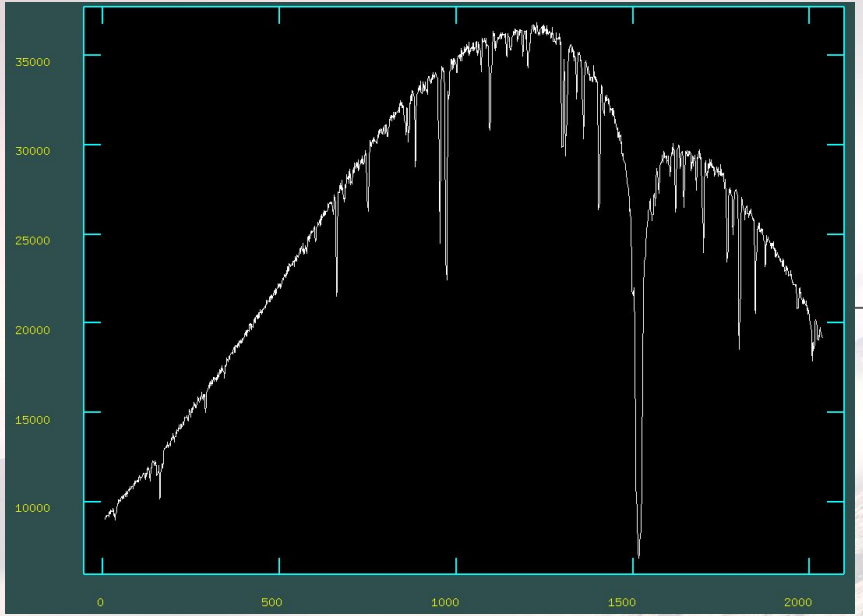


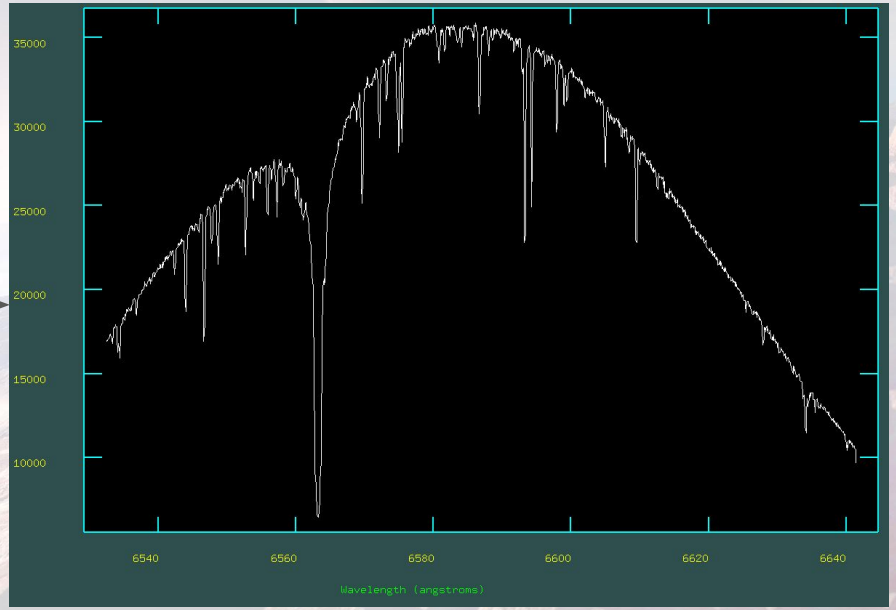




Od pozorování k finálnímu spektru

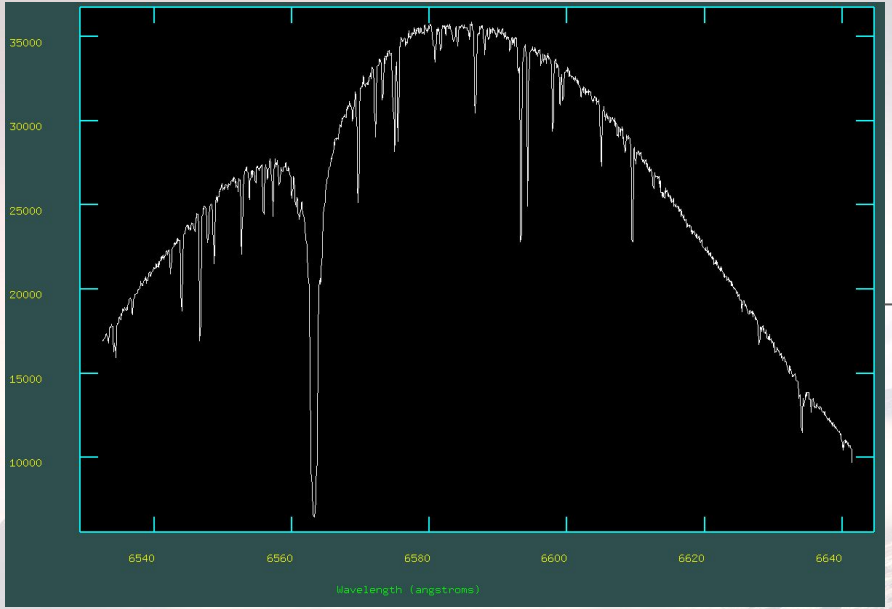
Vlnová kalibrace: pixely -> vlnové délky
Pomocí ThAr spektra. Je nutné identifikovat desítky čar přes celé spektrum, nejlépe v každém řádu.

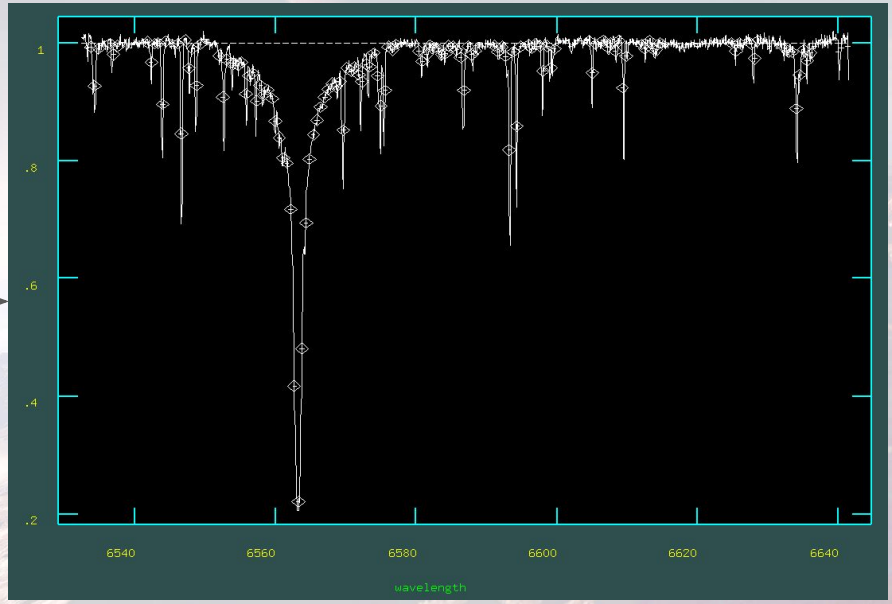




Od pozorování k finálnímu spektru

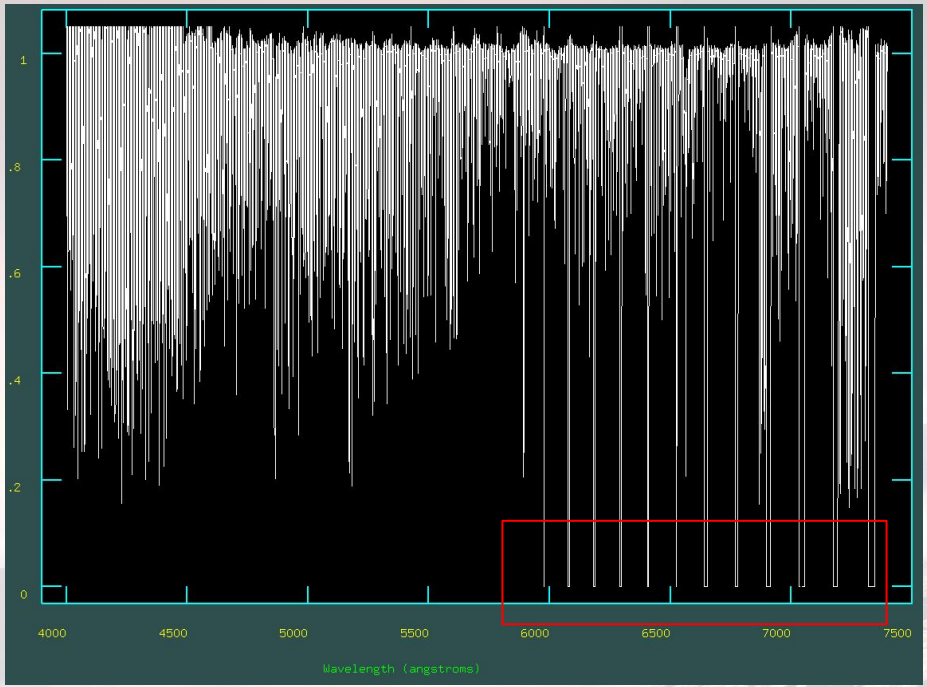
Normalizace kontinua - problém u širokých čar a u širokých absorpcí



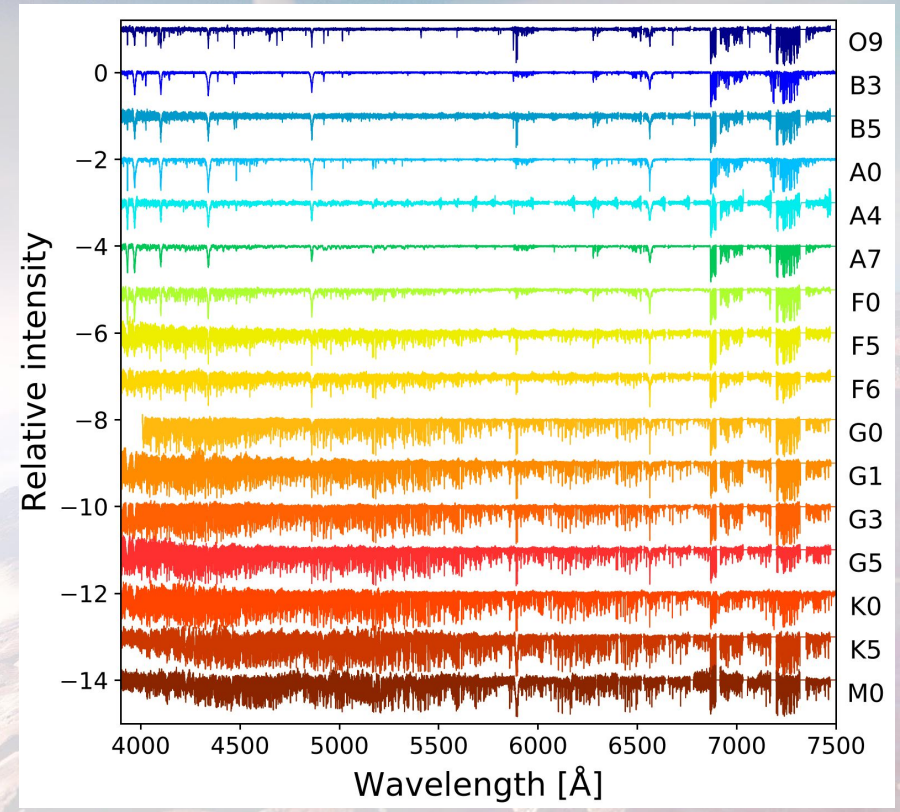


Od pozorování k finálnímu spektru

Sešití spektra (spojení normalizovaných řádů)



U OES problém - řády v červené oblasti se nepřekrývají



Měření radiálních rychlostí exoplanet

Hvězda a planeta obíhají okolo společného středu hmotnosti

=> i hvězda vykonává nepatrný pohyb

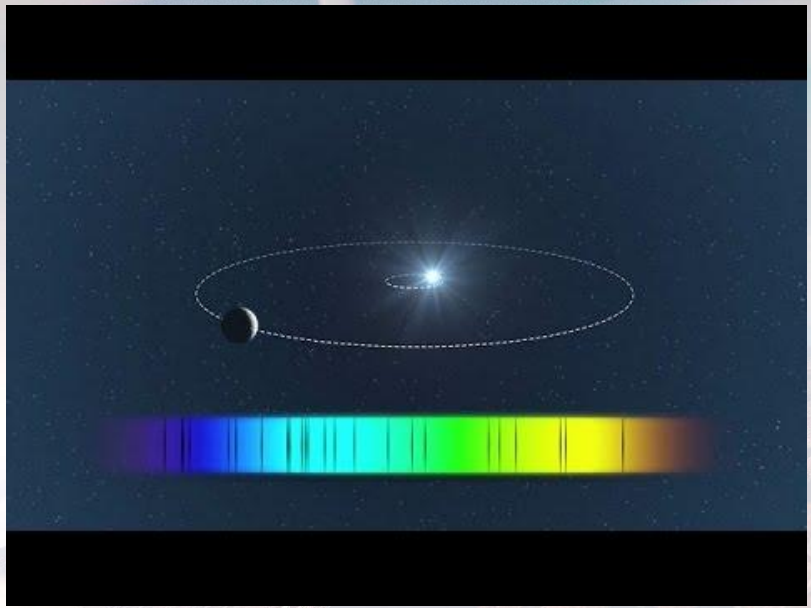
=> z přesných měření polohy a rychlosti pohybu hvězdy je možné odhadnout přítomnost planety a její minimální hmotnost

Měření radiálních rychlostí exoplanet

Ze změny polohy spektrálních čar
(“změna barvy”)

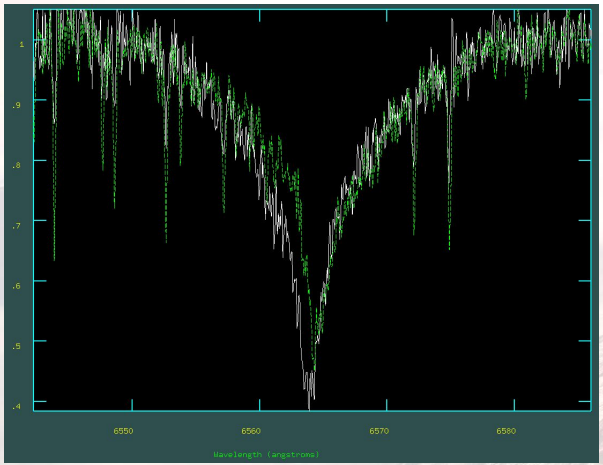
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

$$K_{\mathrm{Zeme}} = 0.1\,\mathrm{m/s}$$
$$K_{\mathrm{Jupiter}} = 13\,\mathrm{m/s}$$

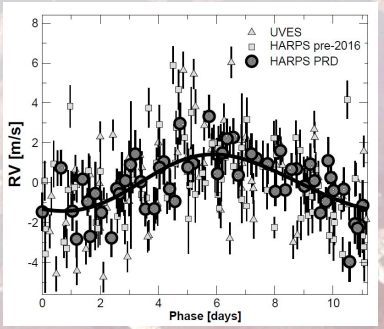


Měření extrémně náročné na stabilitu přístrojů a metody zpracování

Objeveno cca 800 exoplanet

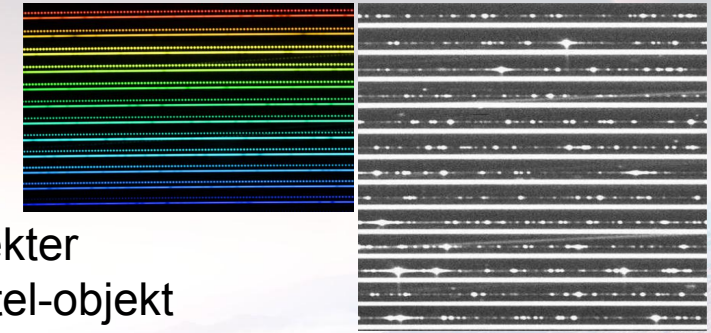


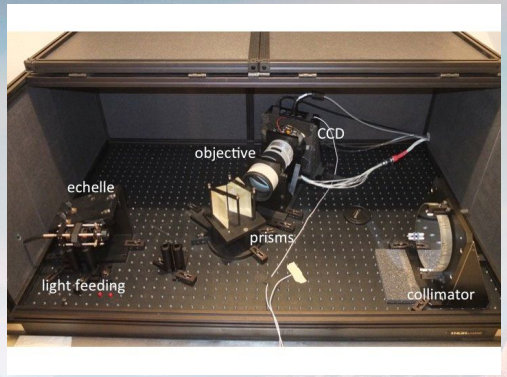
Amplitudy způsobené exoplanetami typicky < 1 km/s
→ velmi malé posuvy (na 400 nm 0.0013 nm)
→ extrémní nároky na stabilitu spektrografu, zpracování dat a analytické metody

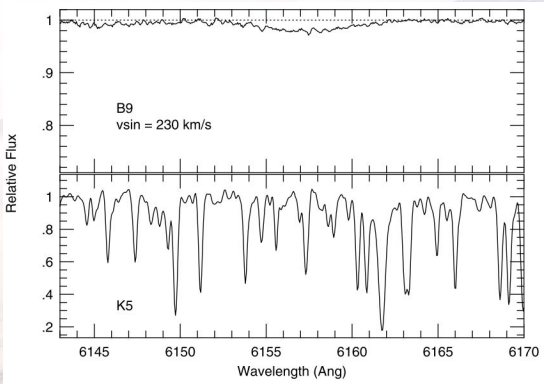


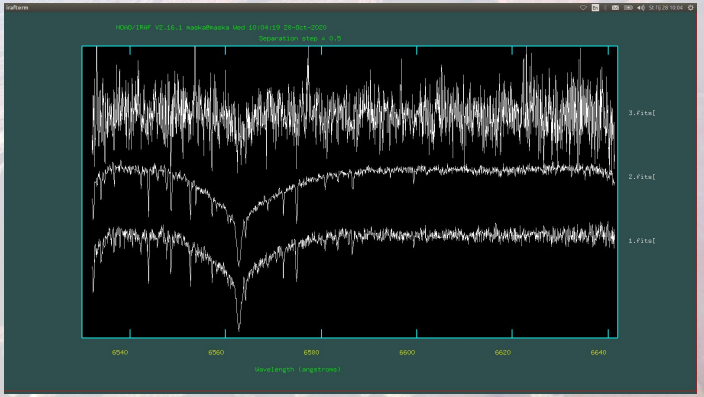
Efekty ovlivňující přesná měření RV

- Přístroj
  - Stabilita (roztažnost elementů)
  - Vlastnosti jednotlivých elementů (mřížka, detektor)
- Způsob měření a kalibrace
  - Expoziční doba
  - Vlnová kalibrace
- Zpracování a analýza
  - Extrakce a úprava spekter
- Vzájemný pohyb pozorovatel-objekt
- Objekt samotný
  - Jasnost
  - Vlastní pohyb
  - Rotace
  - Spektrální typ







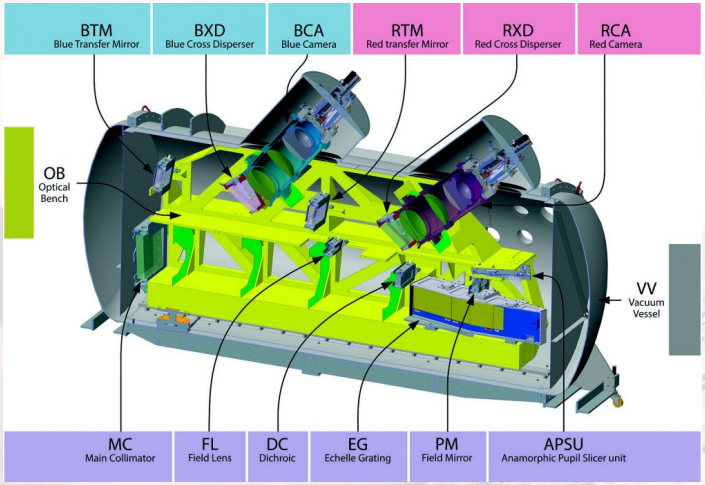


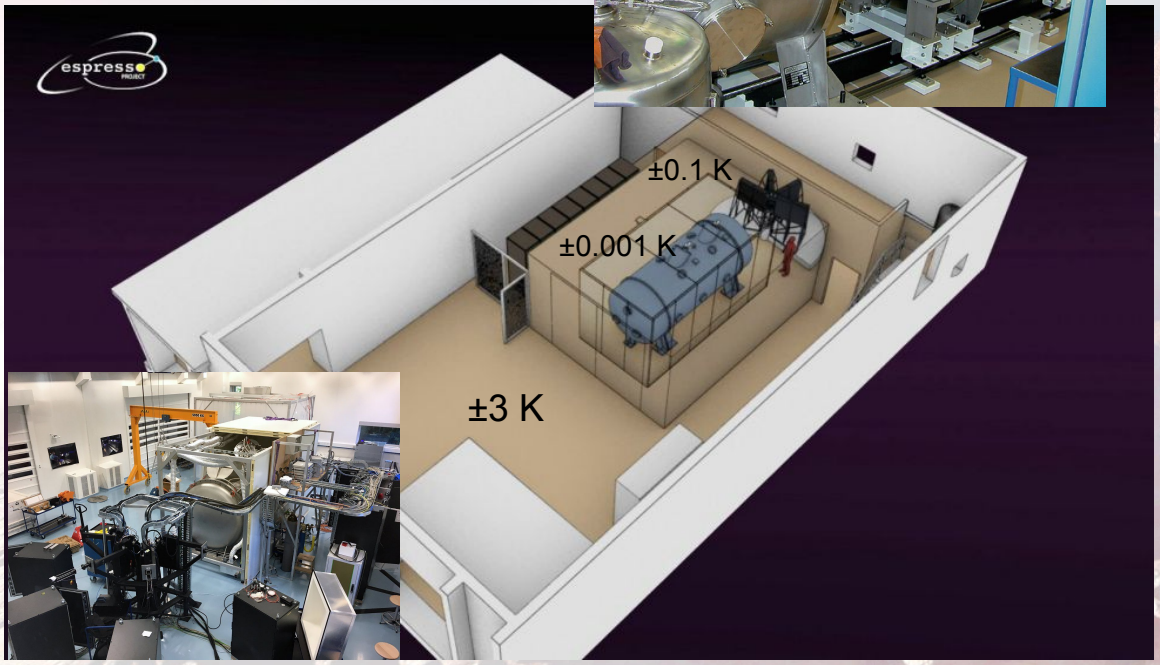
Efekty ovlivňující přesná měření RV

- Přístroj
  - Stabilita (roztažnost elementů)
  - Vlastnosti jednotlivých elementů (mřížka, detektor)

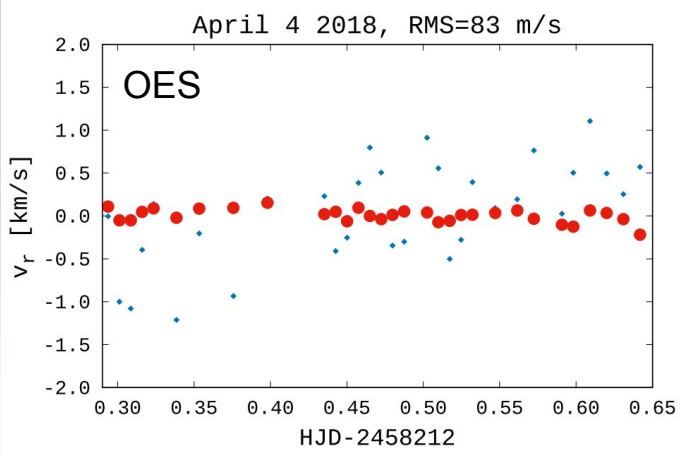
HARPS@3.6mLaSilla:
δT~0.01 K, p~10^{-5} bar

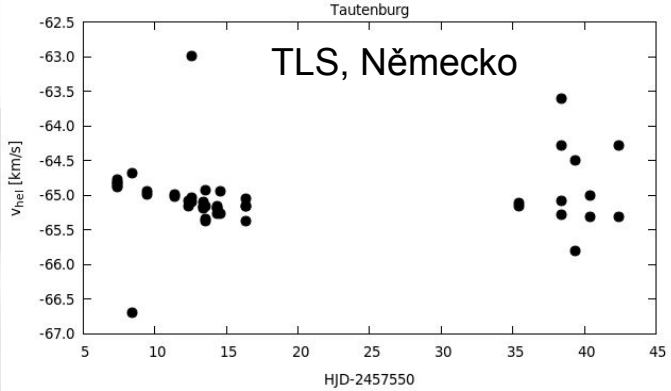
ESPRESSO@VLT:
δT~1 mK, p~10^{-8} bar

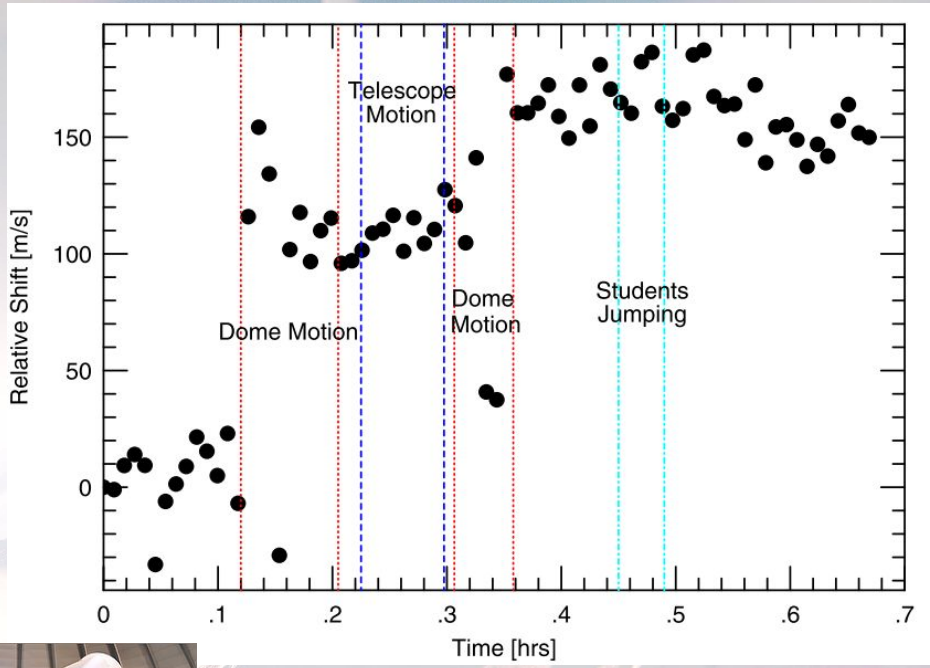




Efekty ovlivňující přesná měření RV

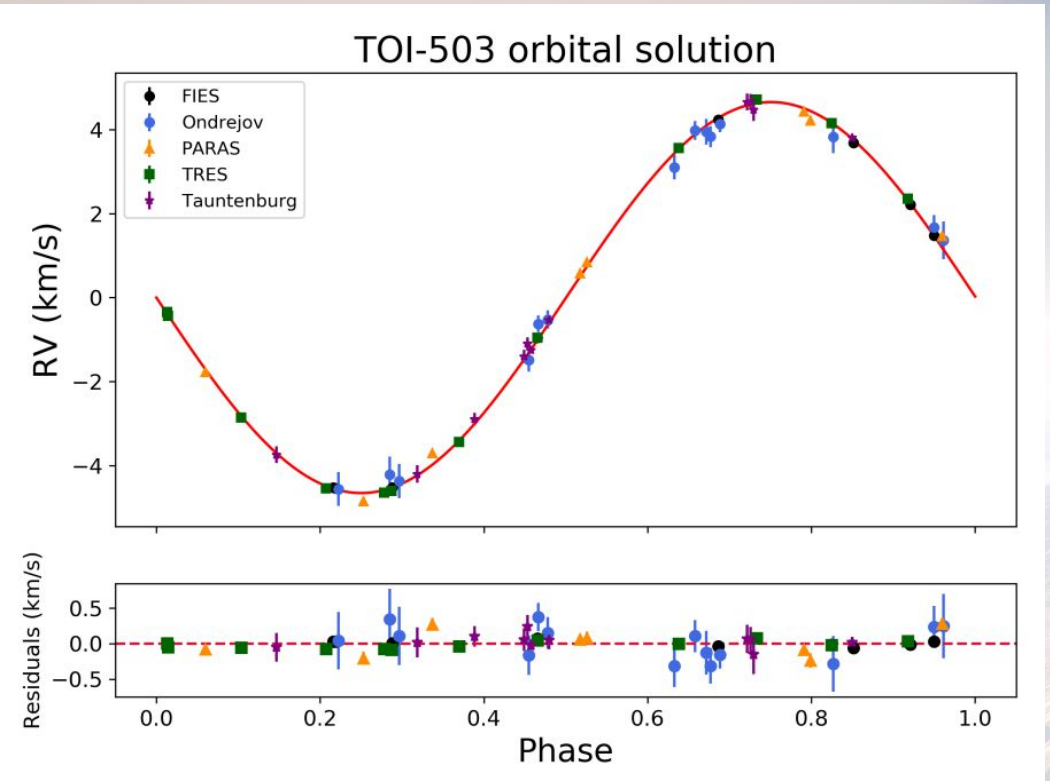




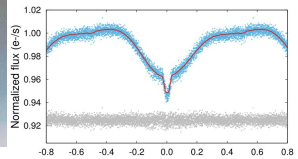


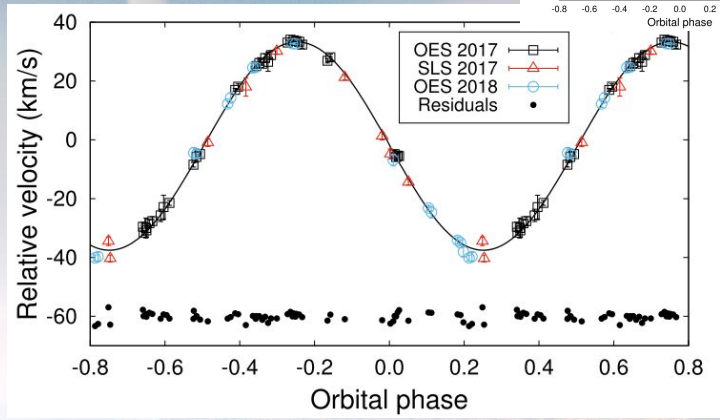
Je potřeba dobře eliminovat vlivy prostředí a instrumentální jevy

Výsledky z Ondřejova

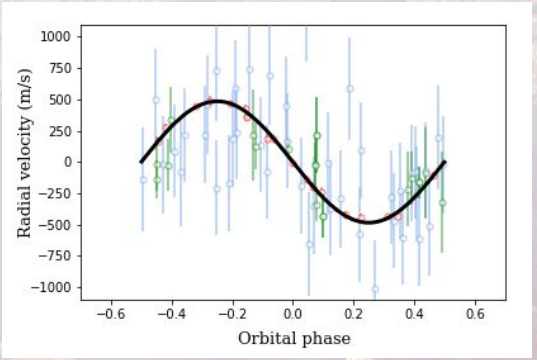


Šubjak et al. 2020, AJ, 159, 151 – první BD z TESS u Am hvězdy





Skarka et al. 2019, MNRAS, 487, 4230 – první mCP hvězda v zákrytové dvojhvězdě

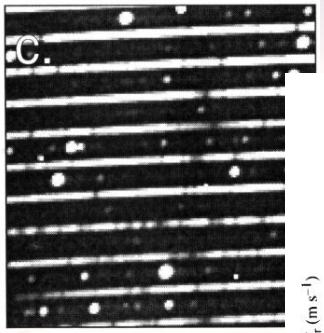


Kabáth et al. 2021, v přípravě

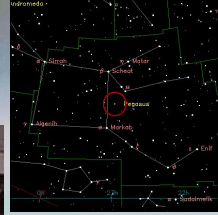
Objev první exoplanety (1995)

51 Peg b, pozorování s 1.9m dalekohledem na observatoři Haute Provence ve Francii

Nobelova cena za Fyziku 2019



M. Mayor & D. Queloz

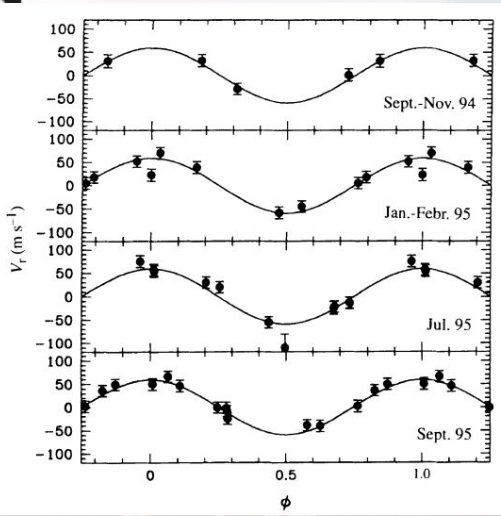


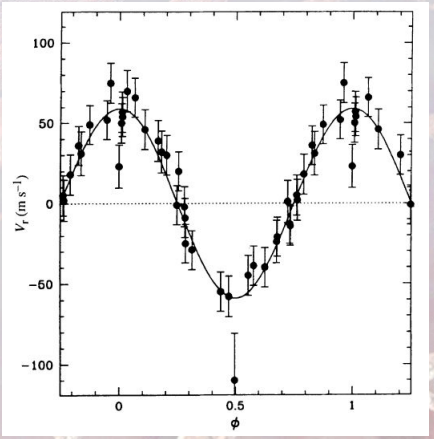
A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

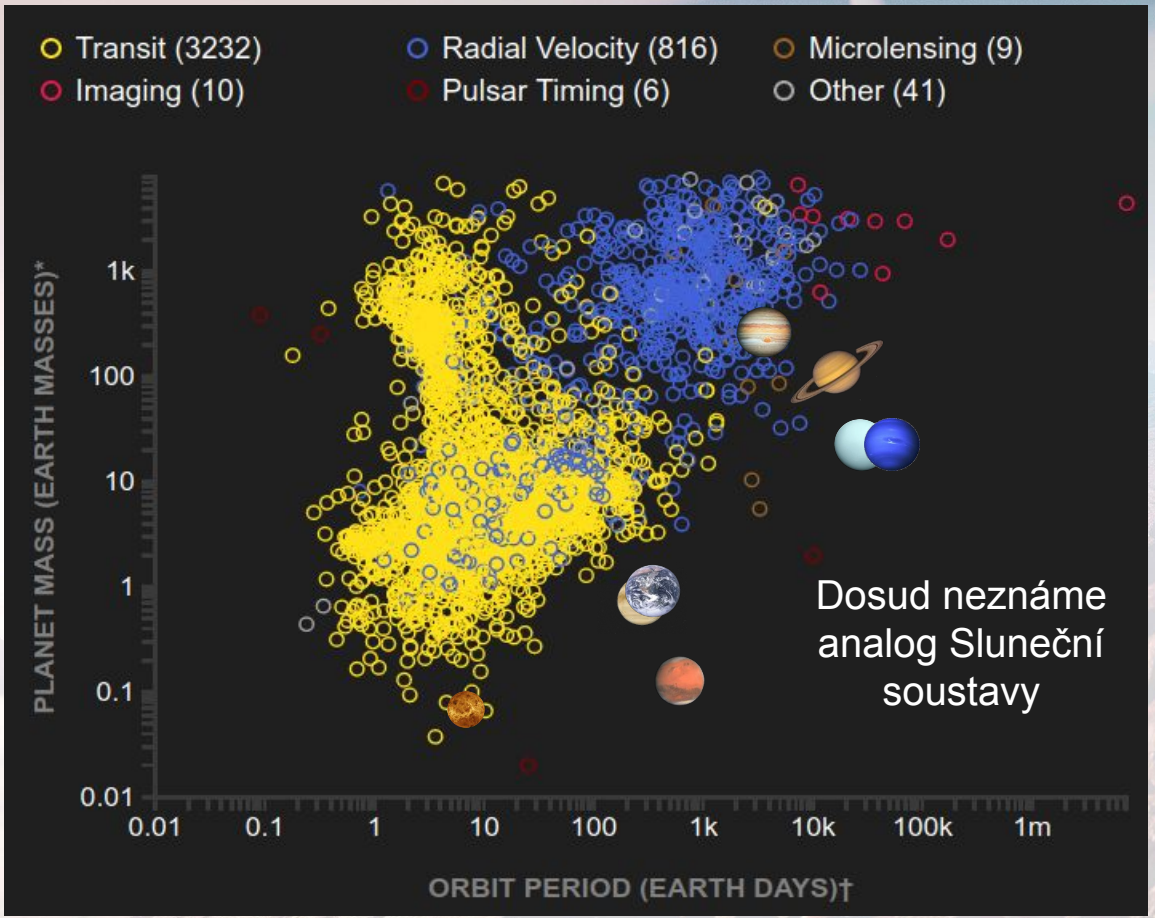
Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

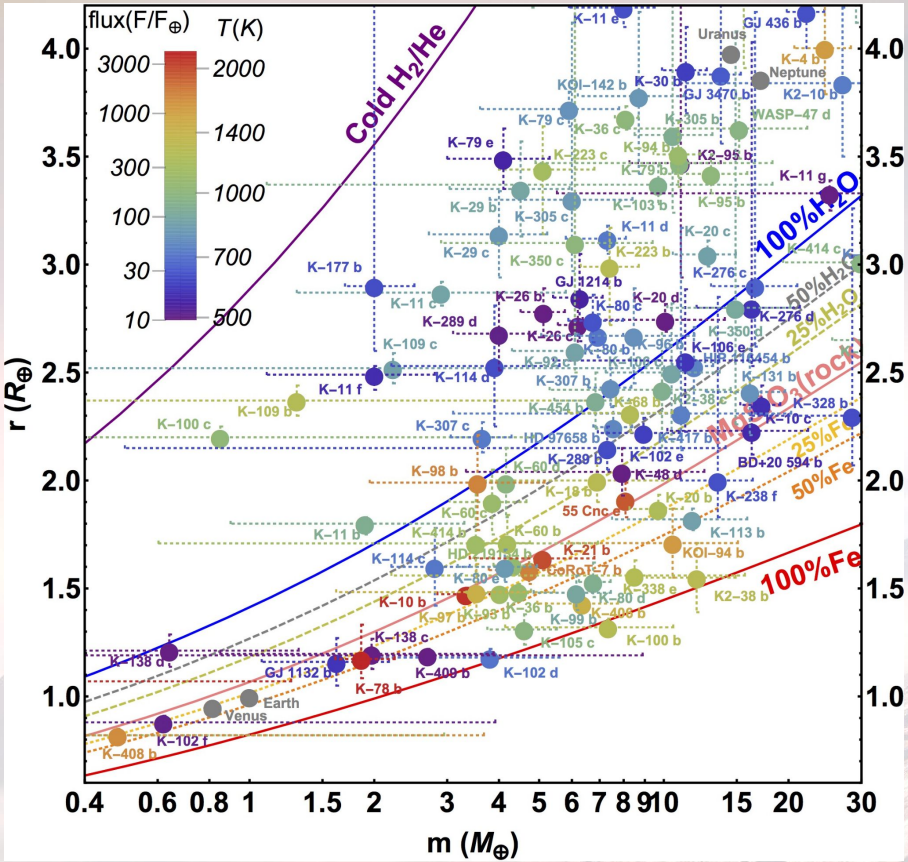


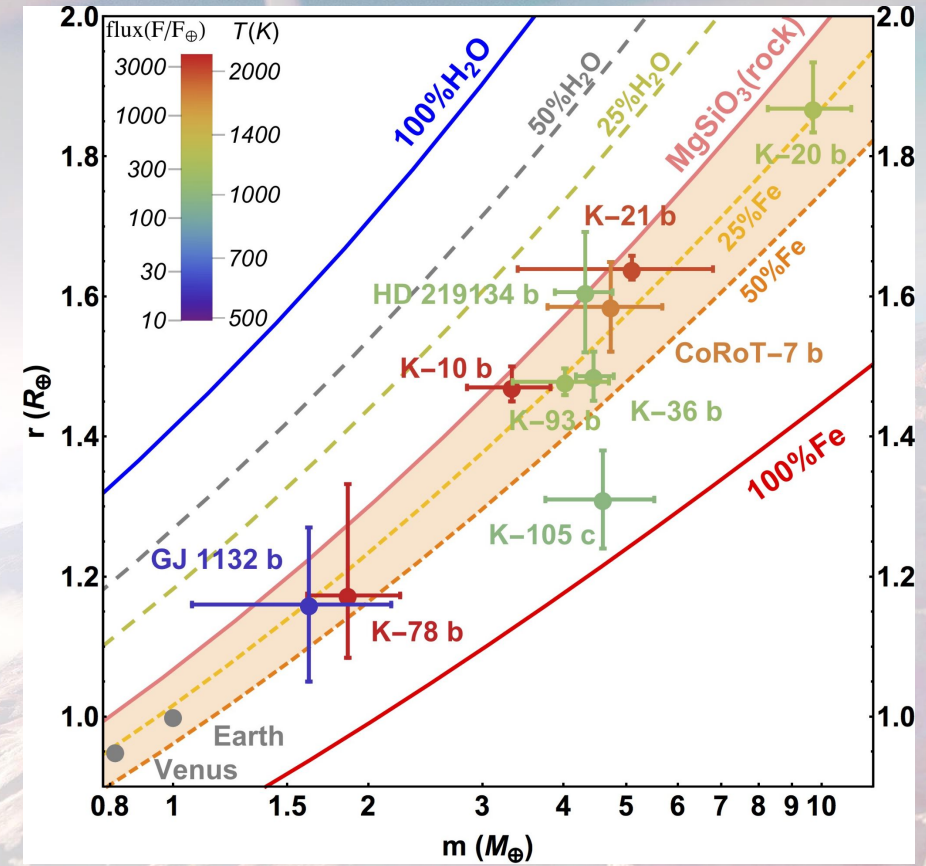


Současný stav poznání



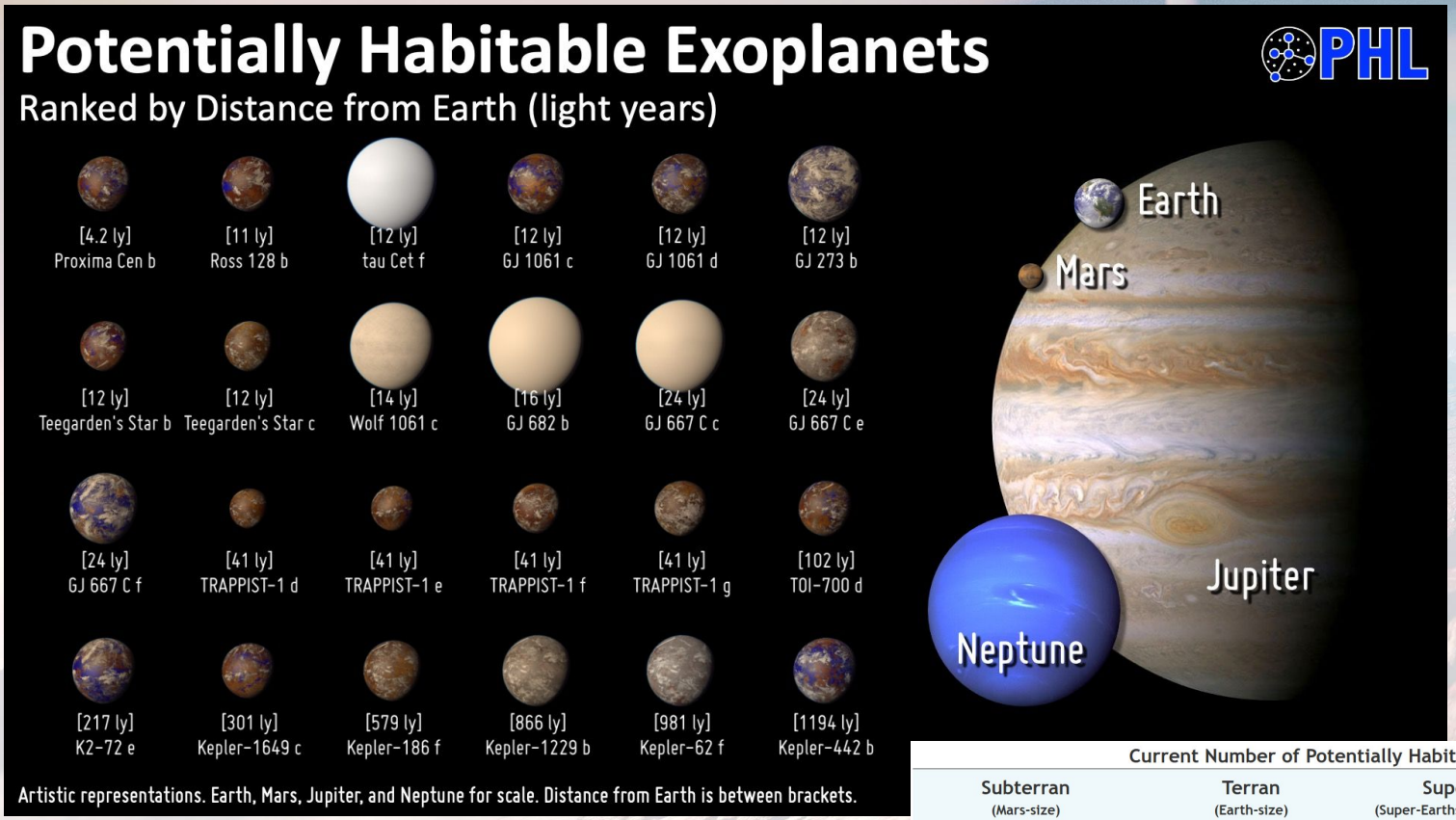
Současný stav poznání





Kaltenegger, L. 2017, ARA&A, 55, 453

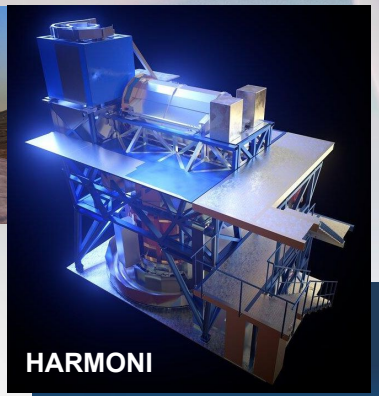
Současný stav poznání

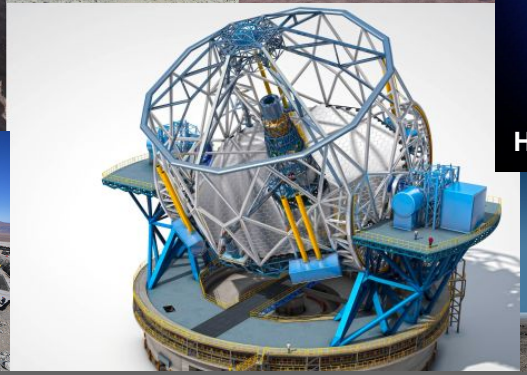


Current Number of Potentially Habitable Exoplanets			
Subterran (Mars-size)	Terran (Earth-size)	Superterran (Super-Earths or Mini-Neptunes)	Total
1	23	36	60

Budoucnost

Evropský extrémně velký dalekohled - E-ELT;
Průměr zrcadla 40 m!

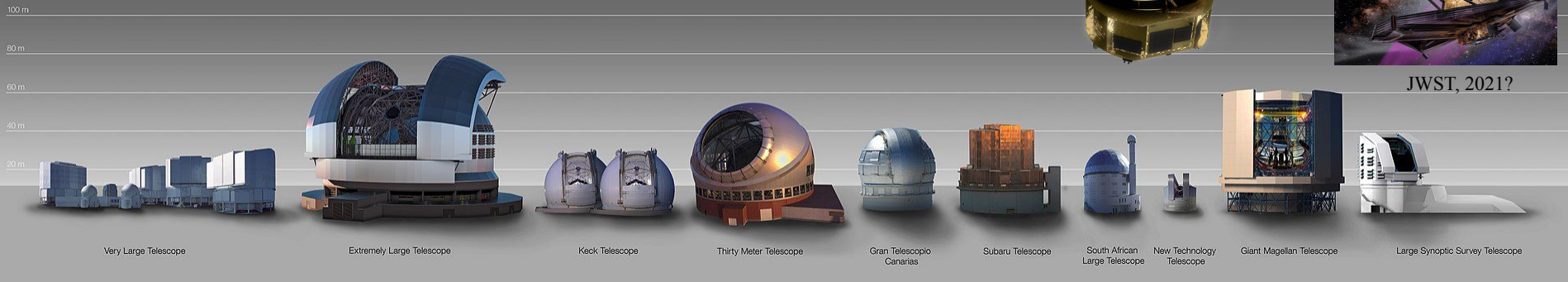




PLATOSpec@1.52m,
La Silla, Chile

ARIEL, 2031?

JWST, 2021?



Děkuji za pozornost

Dotazy?
Komentáře?