

F7514 Exoplanety

4-Měření radiálních rychlostí

Marek Skarka

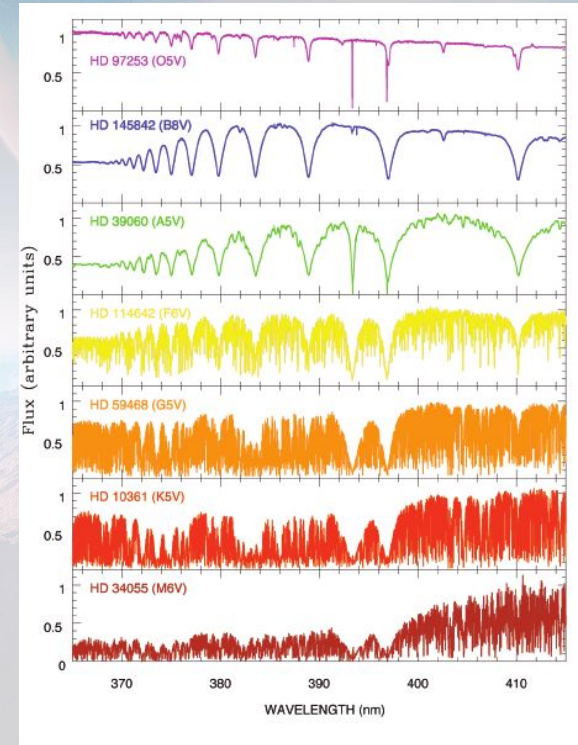
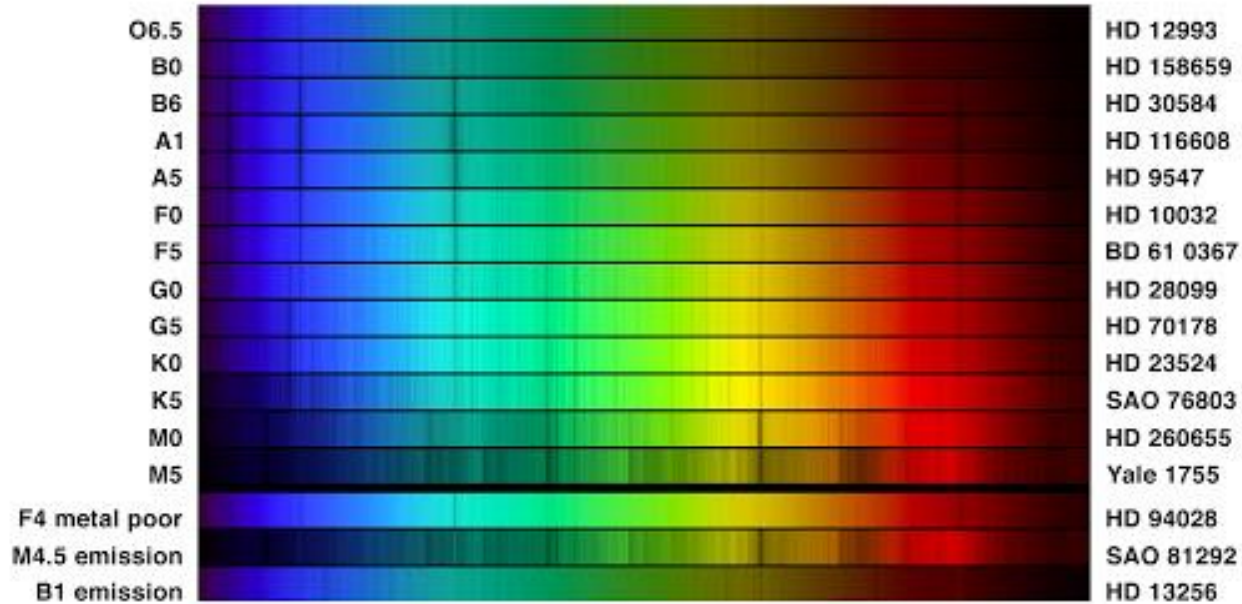
Dopplerův jev

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Posuv spektrálních čar $\Delta\lambda$ je nepřímo úměrný rychlosti světla => nutnost měřit velmi malé posuvy

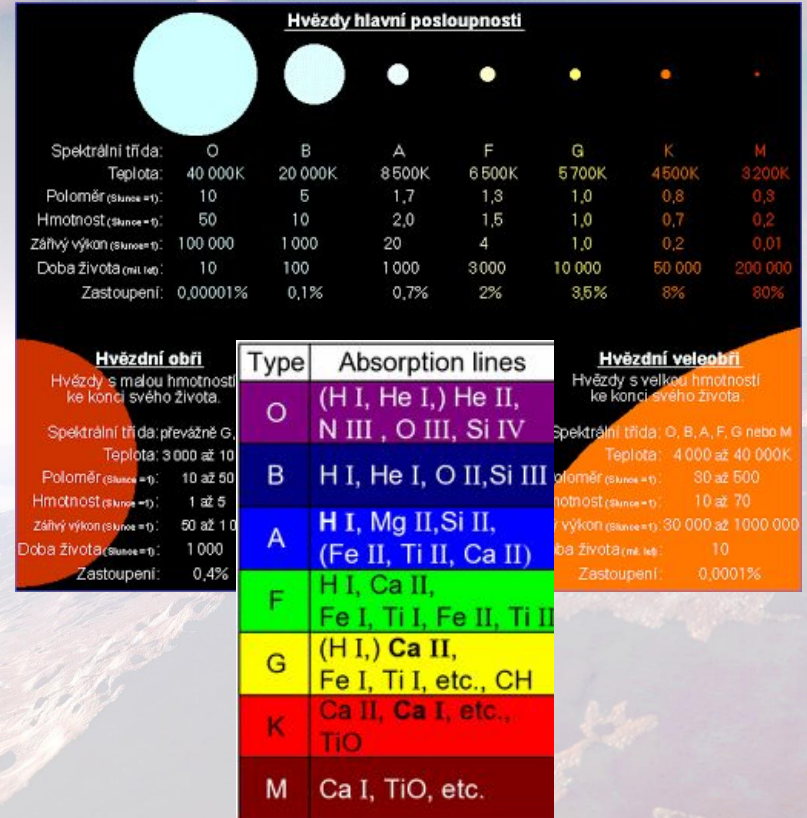
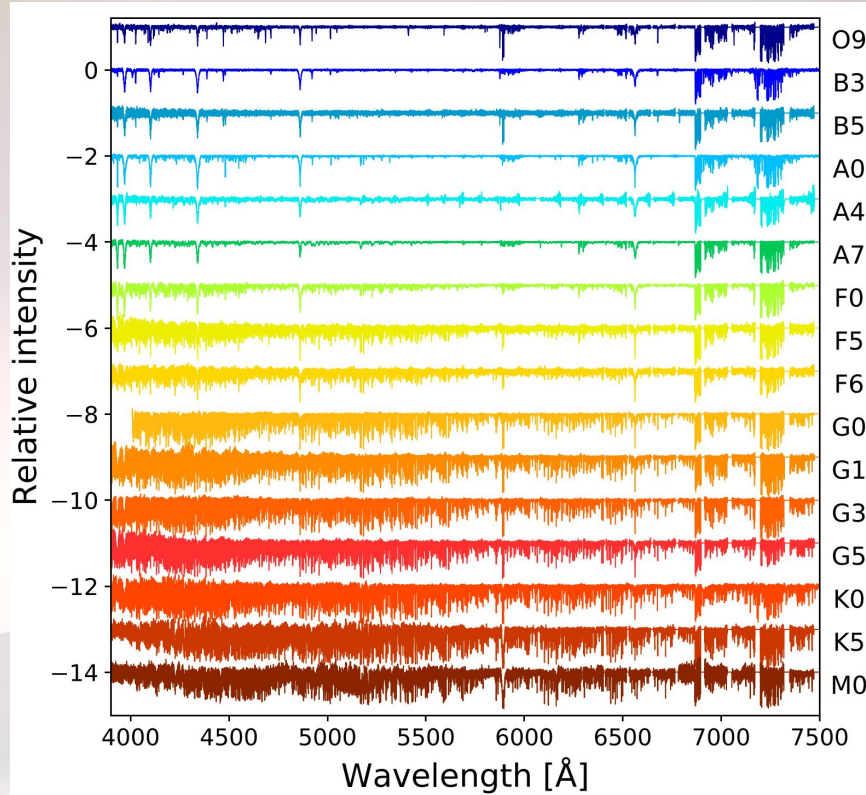
Amplitudy způsobené exoplanetami typicky $< 1 \text{ km/s}$ → na 400 nm posuv $\Delta\lambda$ 0.0013 nm !
=> Extrémní nároky na stabilitu spektrografu, zpracování dat a analytické metody

Spektrum hvězd



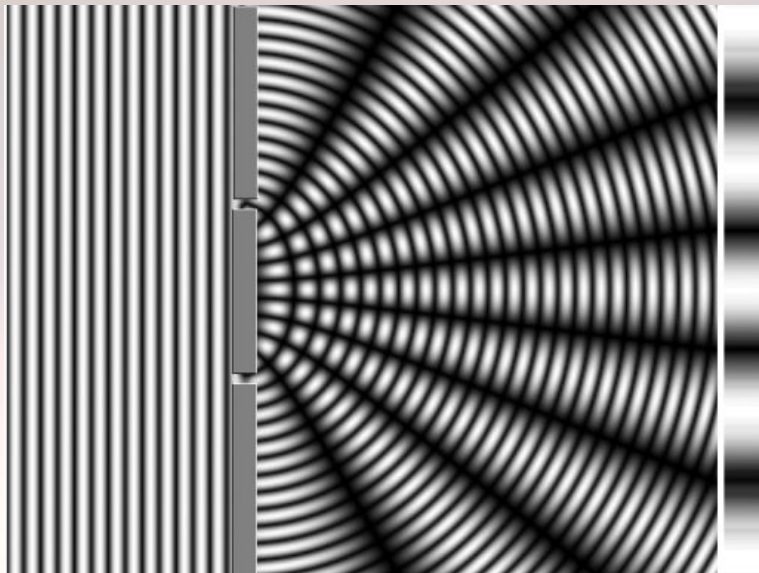
Spektra různých typů hvězd se liší jak v průběhu spektra a jeho intenzitě, tak v přítomnosti, počtu a síle absorpčních/emisních čar => dáno především teplotou => spektrální klasifikace hvězd

Spektrum hvězd



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

Mřížka a její vlastnosti



Destruktivní interference
=> minimum

Konstruktivní interference
=> maximum

Konstruktivní interference nastává v místech, kde platí mřížková rovnice:

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

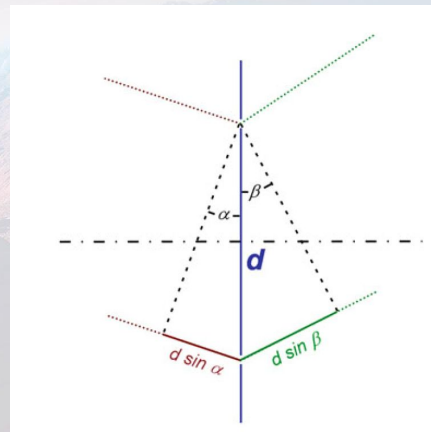
řád

vlnová délka

vzdálenost mezi vrypy

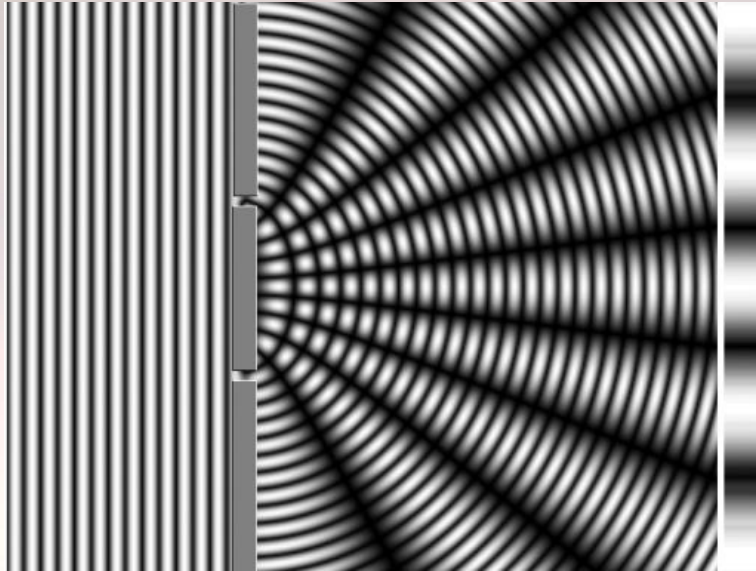
úhel dopadu

úhel lomu/odrazu



$g=1/d$ mřížková konstanta

Mřížka a její vlastnosti



Destruktivní interference
=> minimum

Konstruktivní interference
=> maximum

Konstruktivní interference nastává v místech, kde platí mřížková rovnice:

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

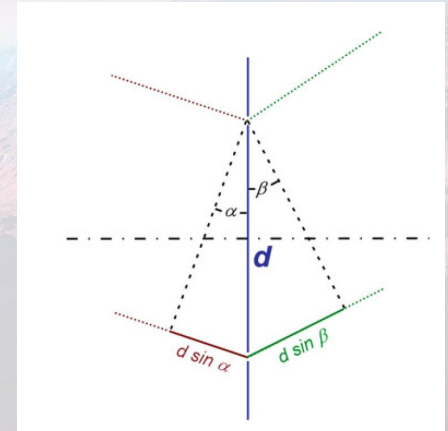
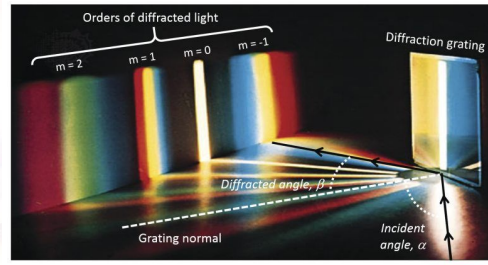
řád

vlnová délka

vzdálenost mezi vrypy

úhel dopadu

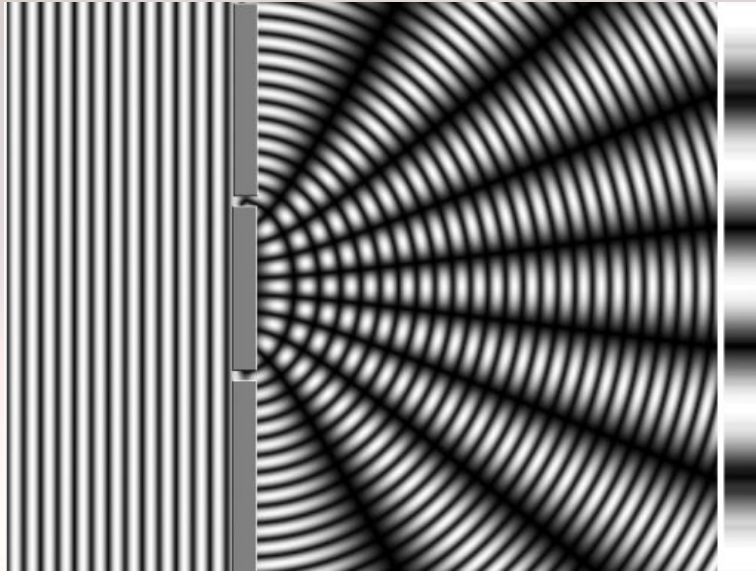
úhel lomu/odrazu



- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d

$g=1/d$ mřížková konstanta

Mřížka a její vlastnosti



Destruktivní interference
=> minimum

Konstruktivní interference
=> maximum

Konstruktivní interference nastává v místech, kde platí mřížková rovnice:

$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

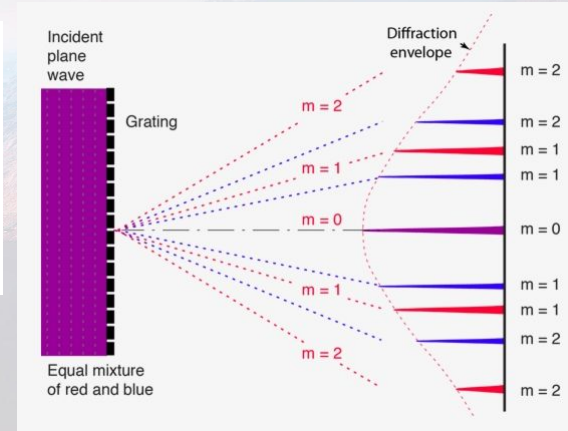
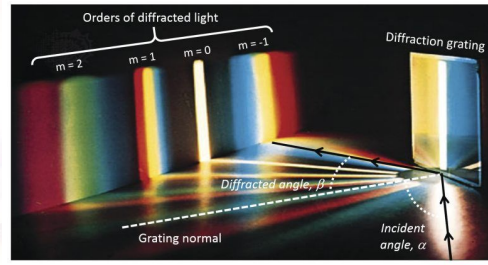
řád

vlnová délka

vzdálenost mezi vrypy

úhel dopadu

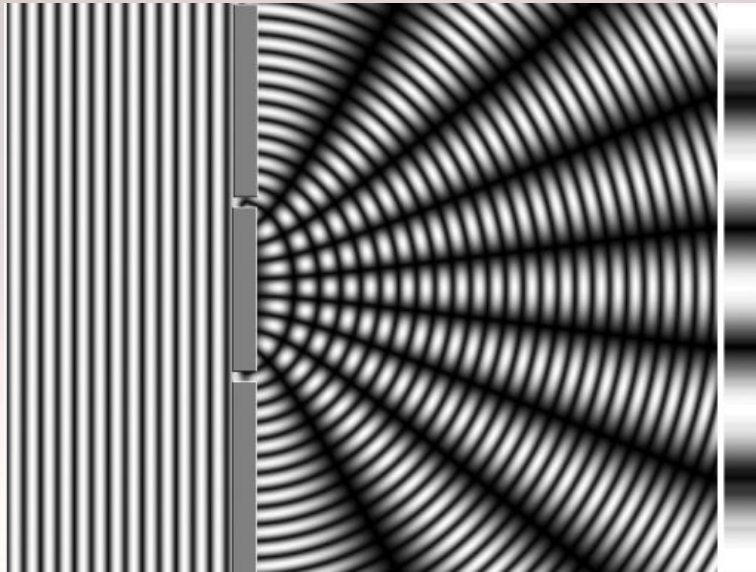
úhel lomu/odrazu



- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}$$

Mřížka a její vlastnosti



Destruktivní interference
=> minimum

Konstruktivní interference
=> maximum

Konstruktivní interference nastává v místech, kde platí mřížková rovnice:

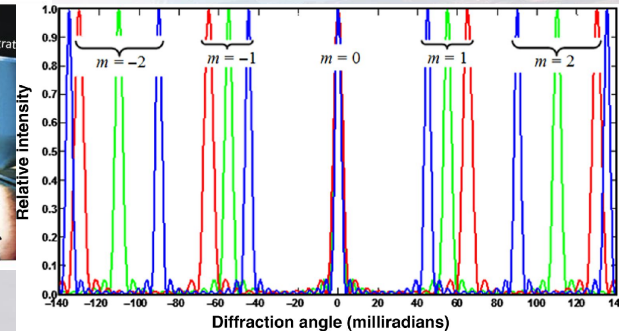
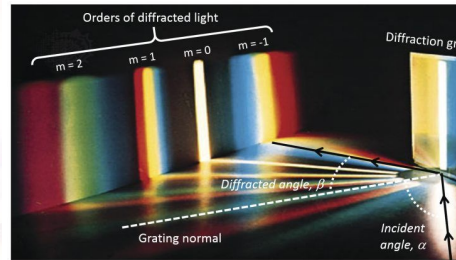
$$m\lambda = d(\sin \alpha + \sin \beta)$$

řád

vlnová délka

vzdálenost mezi vrypy

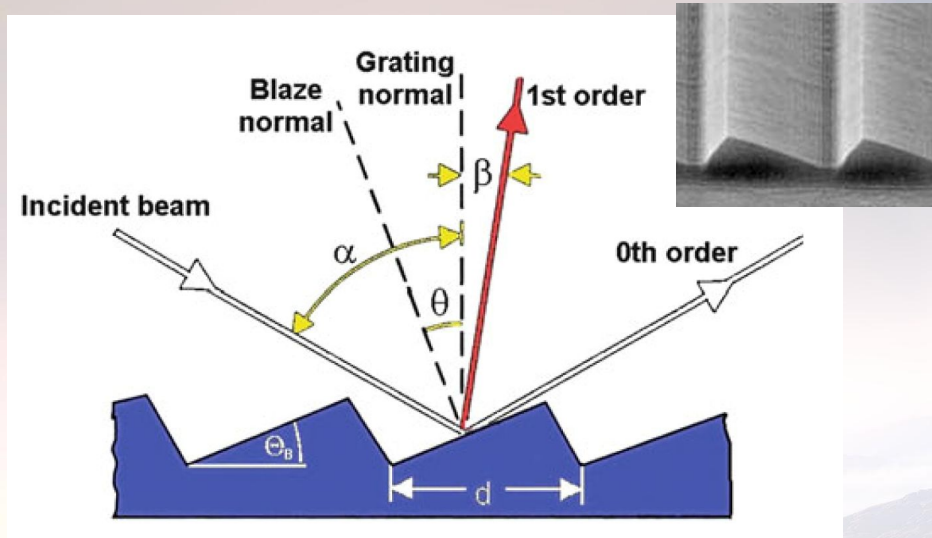
úhel dopadu úhel lomu/odrazu



- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi
- Vyšší řády se překrývají => nutnost použití filtru nebo clon

$$\lambda_c(m) = \frac{d}{m} (\sin \alpha + \sin \beta_c)$$

Mřížka a její vlastnosti



- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi
- Vyšší řády se překrývají => nutnost použití filtru nebo clon
- Pro tzv. Littrow konfiguraci lze mřížkou s nakloněnými vrypky dosáhnout větší disperze

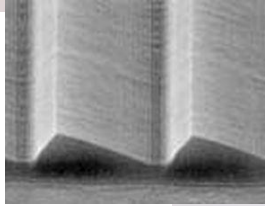
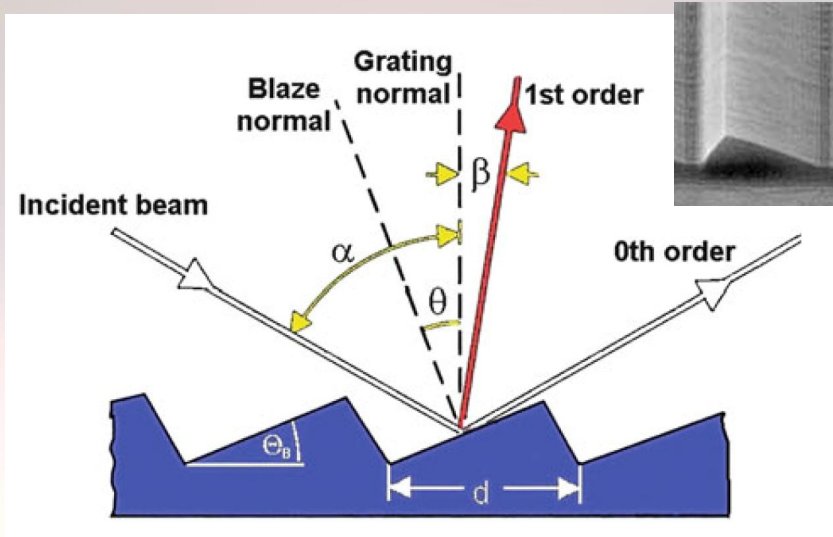
$$\alpha = \beta = \Theta_B$$

Typicky se používají mřížky se sklonem 63.4° a 75.9°
(Blaze angle, R2 a R4 mřížky)

Se vzrůstajícím sklonem prudce roste disperze a tedy i rozlišení!

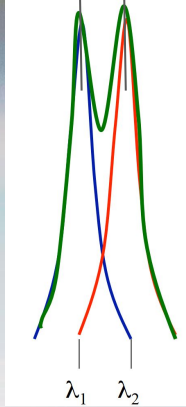
$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} \longrightarrow \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \Theta_B$$

Mřížka a její vlastnosti



Spektrální rozlišení - "jaký nejmenší rozdíl vlnových délek jsem schopný rozlišit"

$$\delta\lambda = \delta\beta \cdot \frac{d \cos \beta}{m} = \frac{\lambda}{B_{\text{grat}}} \cdot \frac{\cos \beta}{g \cdot m} = \frac{\lambda}{N} \cdot \frac{\cos \beta}{m}$$



- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi
- Vyšší řády se překrývají => nutnost použití filtru nebo clon
- Pro tzv. Littrow konfiguraci lze mřížkou s nakloněnými vrypů dosáhnout větší disperze

$$\alpha = \beta = \Theta_B$$

Typicky se používají mřížky se sklonem 63.4° a 75.9°
(Blaze angle, R2 a R4 mřížky)

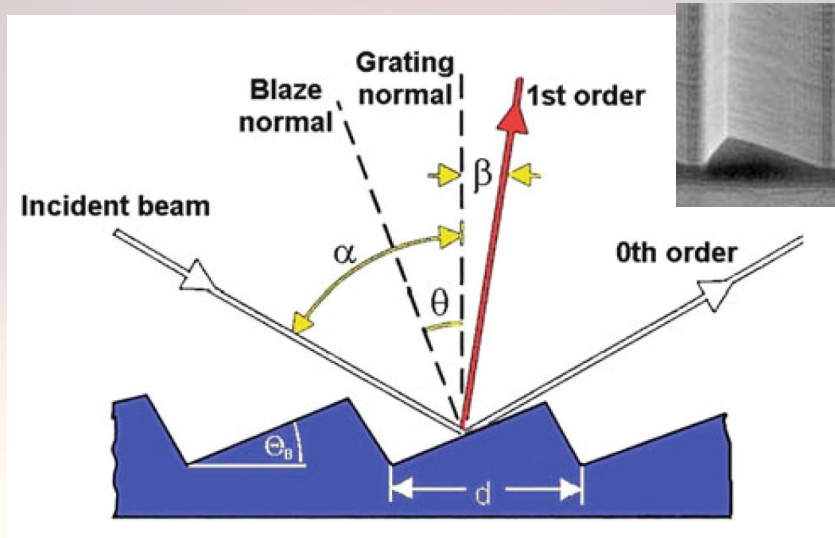
Se vzrůstajícím sklonem prudce roste disperze a tedy i rozlišení!

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}$$

→

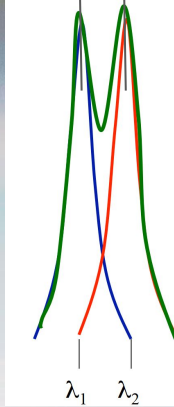
$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \Theta_B$$

Mřížka a její vlastnosti



Spektrální rozlišení - "jaký nejmenší rozdíl vlnových délek jsem schopný rozlišit"

$$\delta\lambda = \delta\beta \cdot \frac{d \cos \beta}{m} = \frac{\lambda}{B_{\text{grat}}} \cdot \frac{\cos \beta}{g \cdot m} = \frac{\lambda}{N} \cdot \frac{\cos \beta}{m}$$



Rozlišovací schopnost - "kolik spektrálních elementů jsem schopný rozlišit na dané vlnové délce"
Pro přesná měření RV typicky $R \sim 10^4 - 5$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{N \cdot m}{\cos \beta}$$

- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi
- Vyšší řády se překrývají => nutnost použití filtru nebo clon
- Pro tzv. Littrow konfiguraci lze mřížkou s nakloněnými vrypky dosáhnout větší disperze

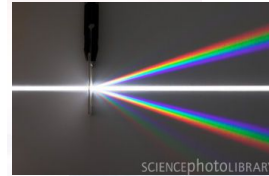
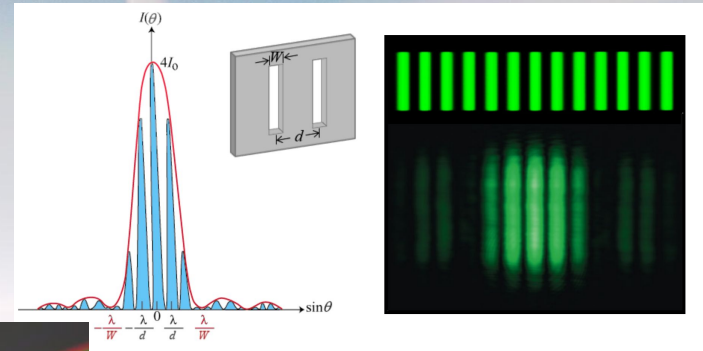
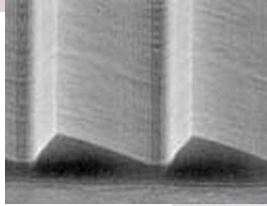
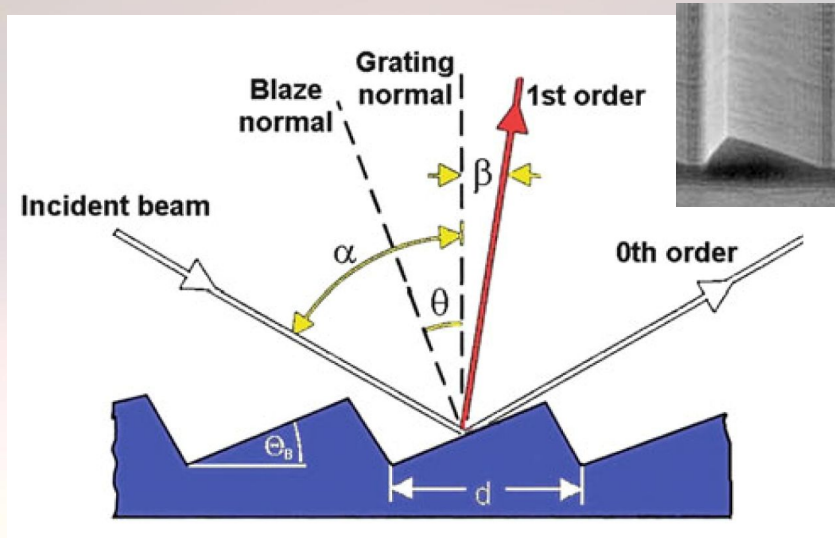
$$\alpha = \beta = \Theta_B$$

Typicky se používají mřížky se sklonem 63.4° a 75.9°
(Blaze angle, R2 a R4 mřížky)

Se vzrůstajícím sklonem prudce roste disperze a tedy i rozlišení!

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta} \longrightarrow \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \Theta_B$$

Mřížka a její vlastnosti



- Intenzita mezi řády není nulová ($I \sim \text{sinc}^2$)
- Intenzita řádů klesá s narůstajícím m

- V nultém řádu nedochází k disperzi
- Stejného řešení lze dosáhnout pro malé m a d , a velké m a d
- Delší vlnové délky se lámou více
- Ve vyšších řádech je vyšší disperze
- Hustší mřížka má vyšší disperzi
- Vyšší řády se překrývají => nutnost použití filtru nebo clon
- Pro tzv. Littrow konfiguraci lze mřížkou s nakloněnými vrypy dosáhnout větší disperze

$$\alpha = \beta = \Theta_B$$

Typicky se používají mřížky se sklonem 63.4° a 75.9°
(Blaze angle, R2 a R4 mřížky)

Se vzrůstajícím sklonem prudce roste disperze a tedy i rozlišení!

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \beta}$$

→

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \Theta_B$$

Mřížka a její vlastnosti

Z hlediska použité mřížky je přesnost měření radiálních rychlostí (RV) závislá v prvé řadě na

1. Počtu osvětlených vrypů
 2. Rozlišovací schopnosti
- Široká mřížka, vysoký řád, velký úhel sklonu vrypů



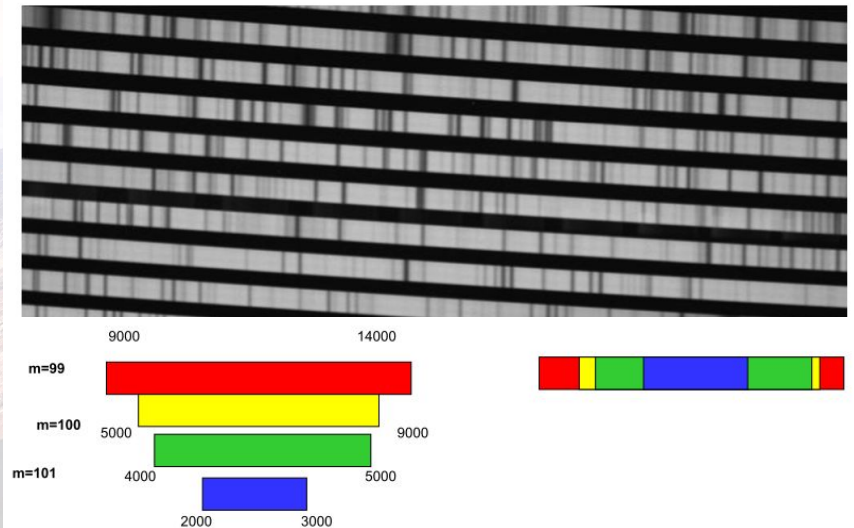
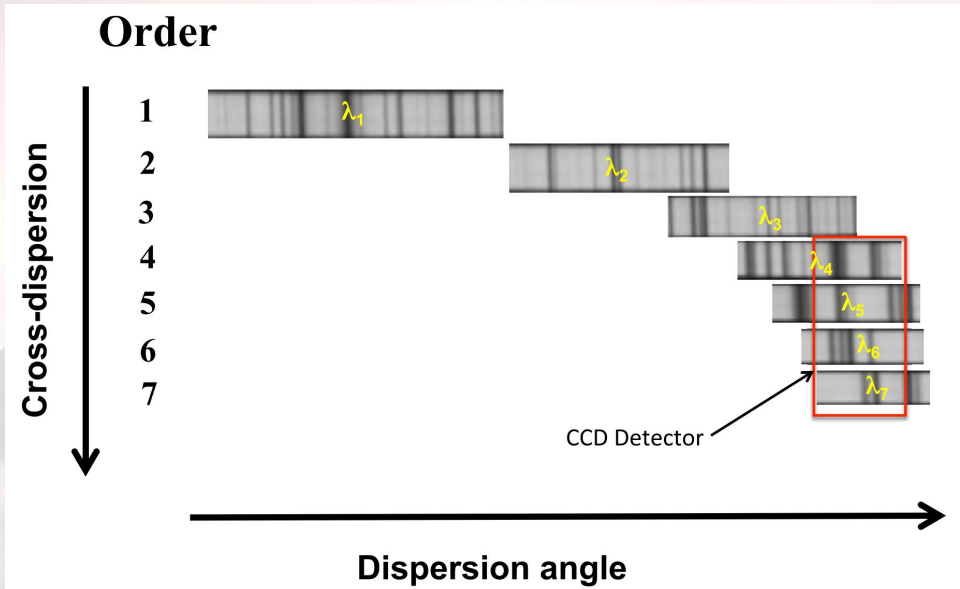
Mřížka a její vlastnosti

Z hlediska použité mřížky je přesnost měření radiálních rychlostí (RV) závislá v prvé řadě na

1. Počtu osvětlených vrypů
 2. Rozlišovací schopnosti
- Široká mřížka, vysoký řád, velký úhel sklonu vrypů

→ Vysoké m

=> Nutnost rozseparovat jednotlivé překrývající se řády - cross-disperser -> echelletová spektroskopie

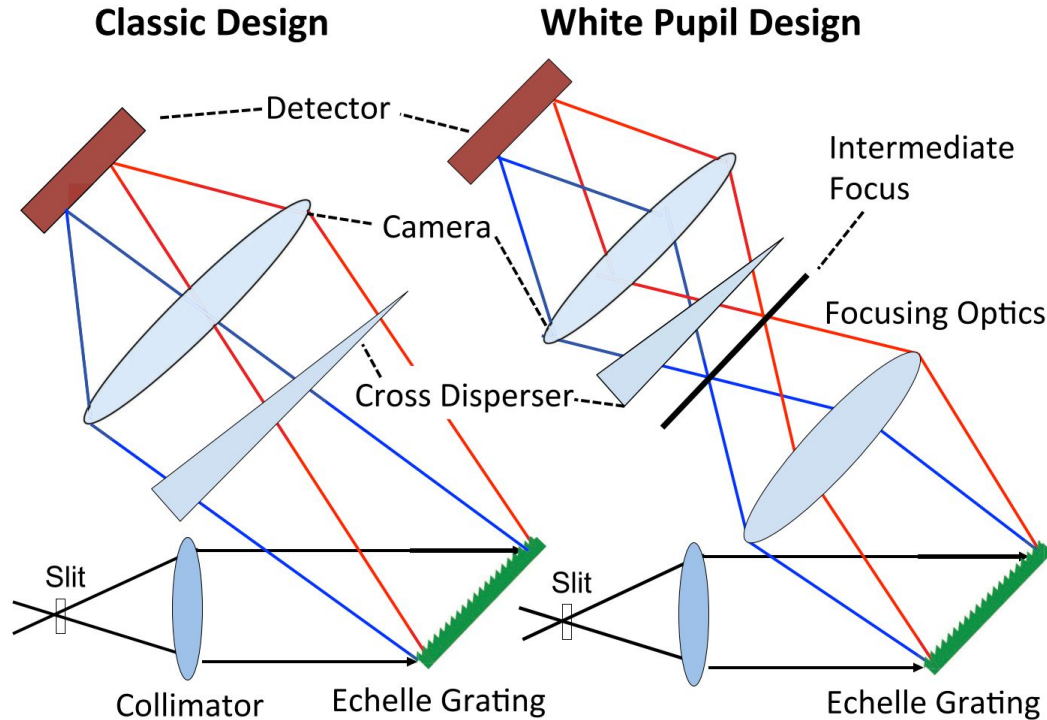


Echelleový spektrograf

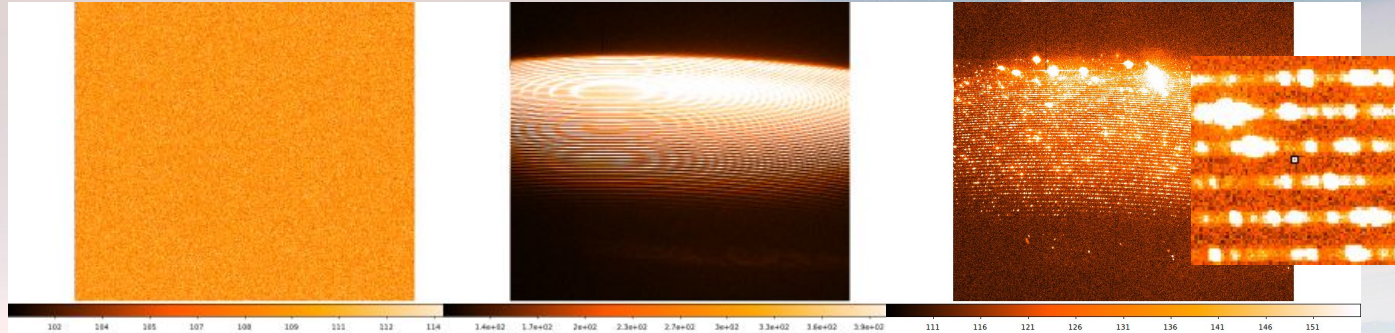
$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{N \cdot m}{\cos \beta}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{2 \tan \Theta_B}{d_{\text{obj}}} \frac{f_{\text{tel}}}{w_{\text{slit}}} \frac{d_{\text{col}}^2}{D_{\text{tel}}}$$

Jednotlivé elementy spektrografu musí být dobře sladěny



Zpracování a analýza - vlivy

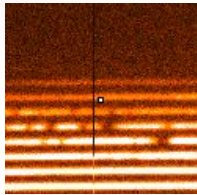


Bias → mbias

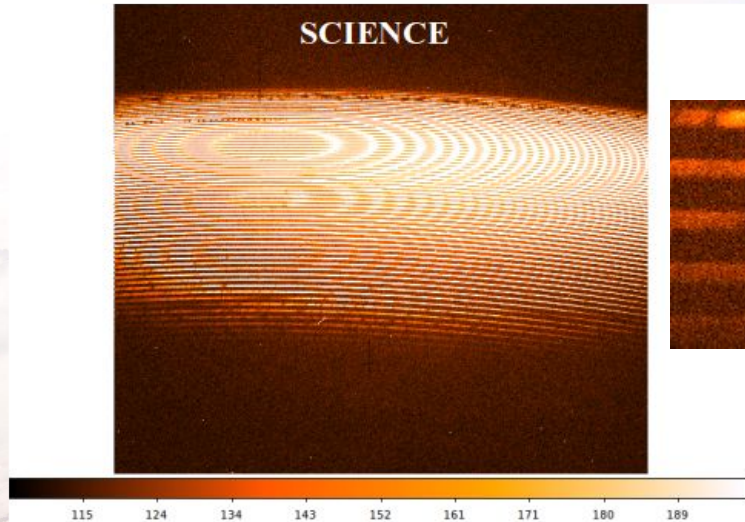
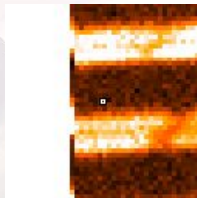
flat → mflat

comp

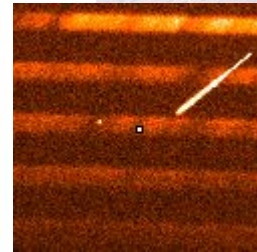
Vadné pixely



okraje

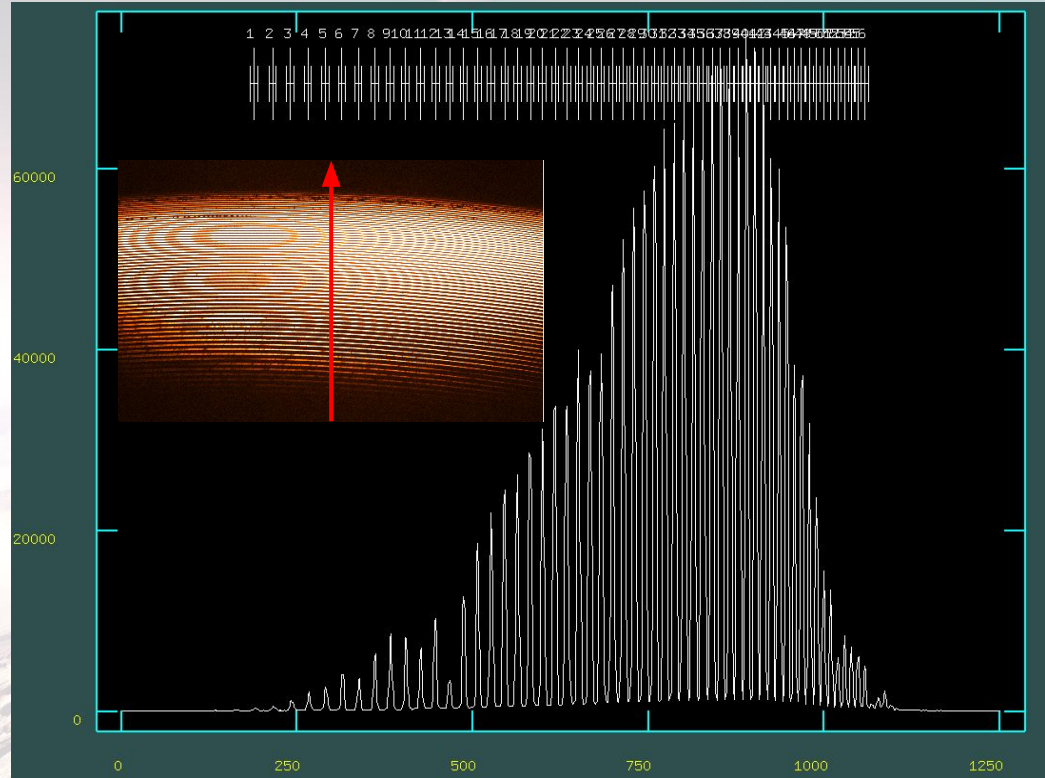
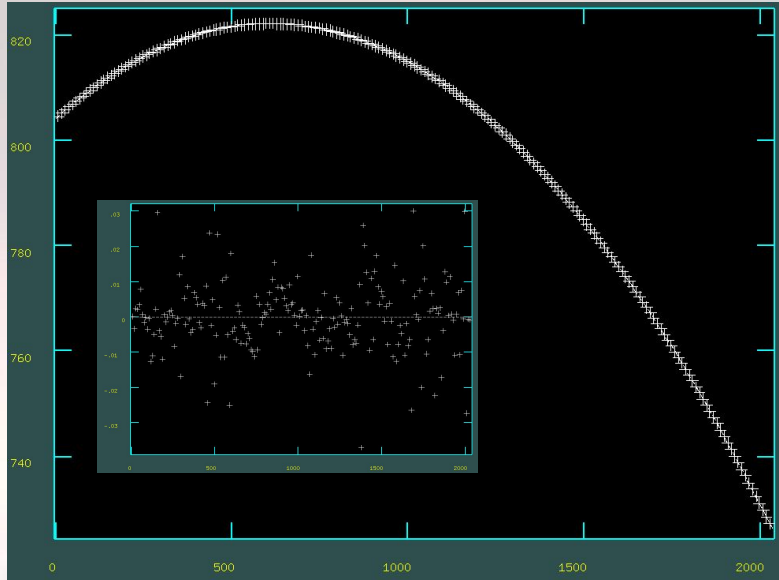


kosmíky



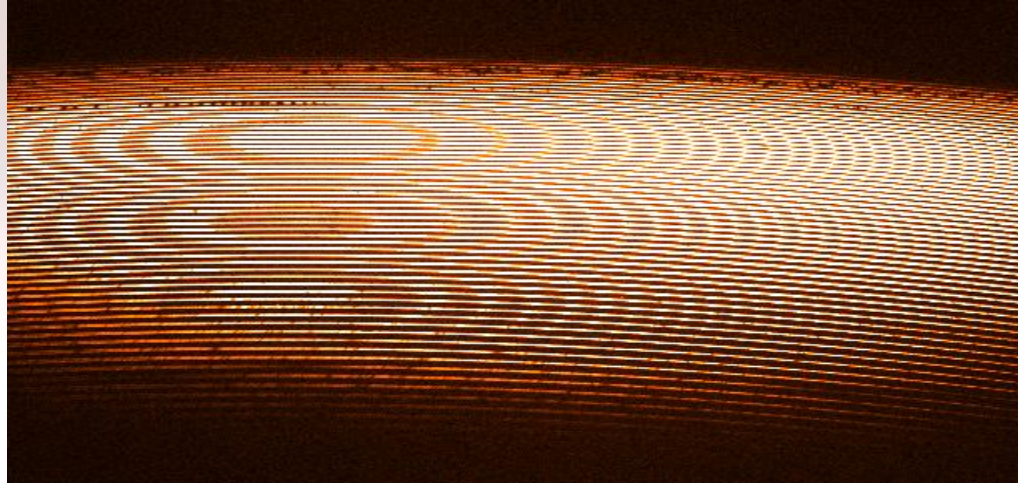
Zpracování a analýza - vlivy

Extrakce apertur - identifikovat řády a extrahovat tok v jednotlivých řádech - klíčové pro S/N



Zpracování a analýza - vlivy

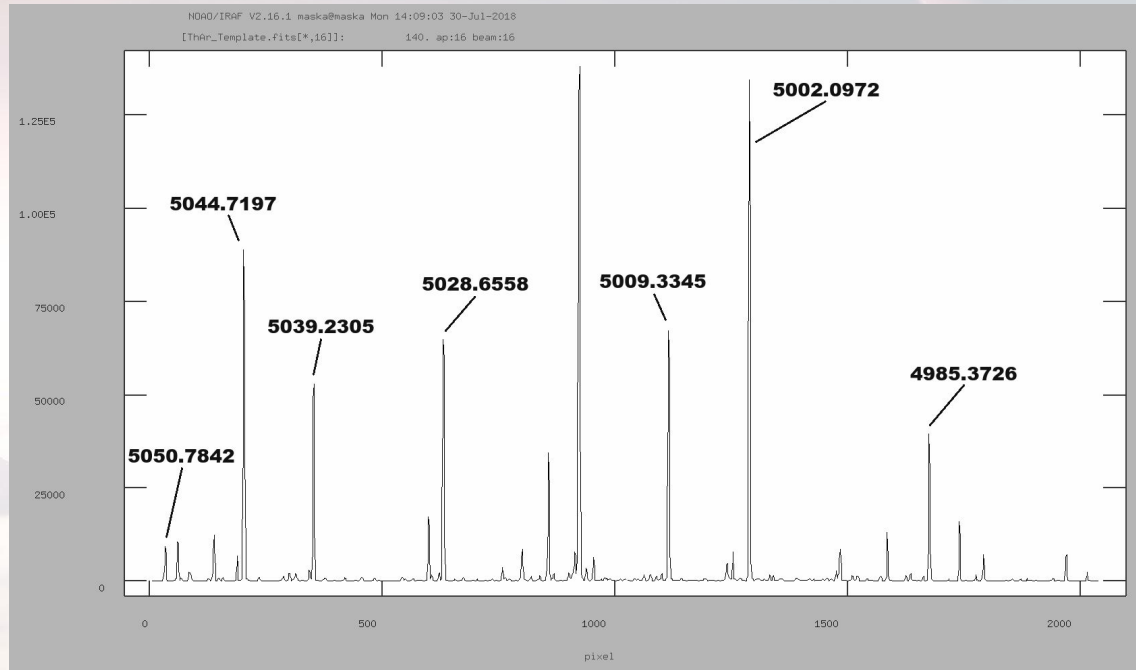
Extrakce apertur



Zpracování a analýza - vlivy

Vlnová kalibrace: px -> vlnové délky

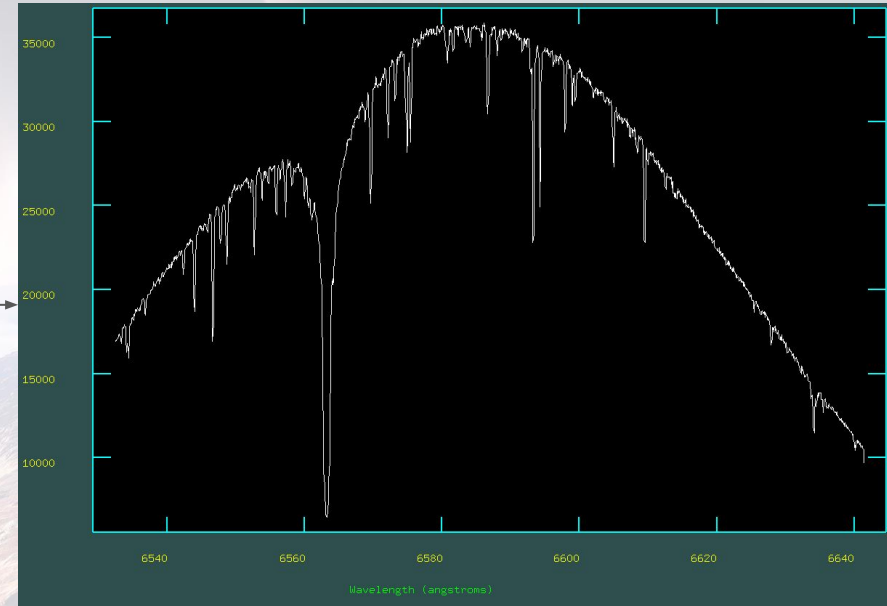
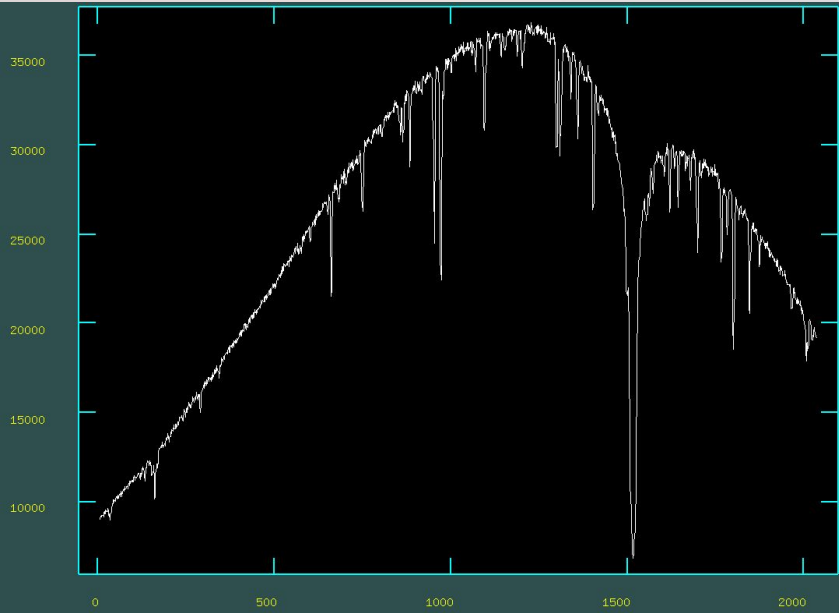
Pomocí ThAr spektra. Je nutné identifikovat desítky čar přes celé spektrum, nejlépe v každém řádu.



Zpracování a analýza - vlivy

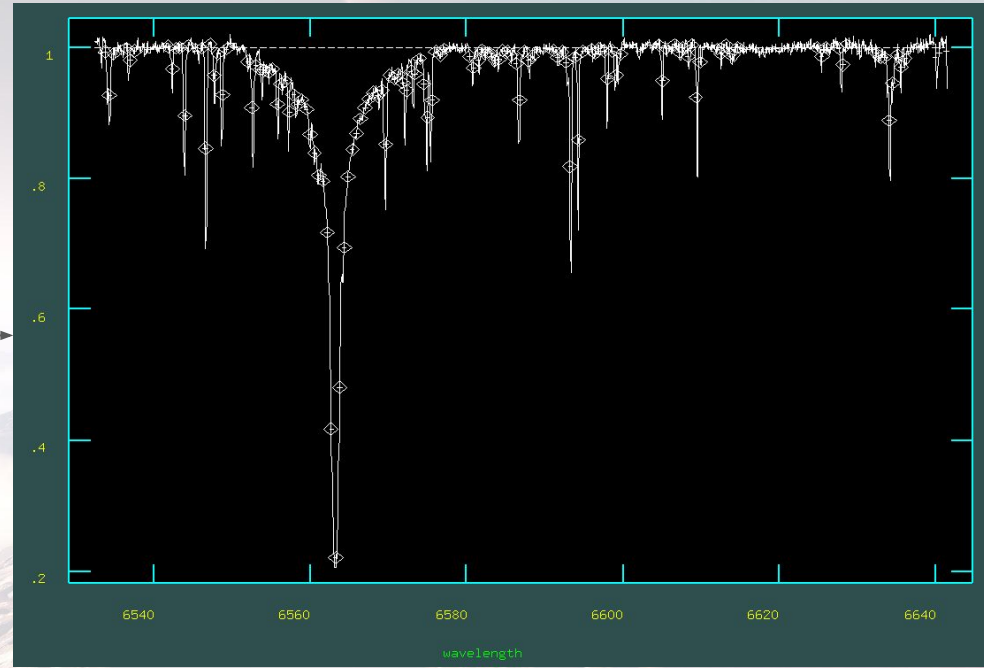
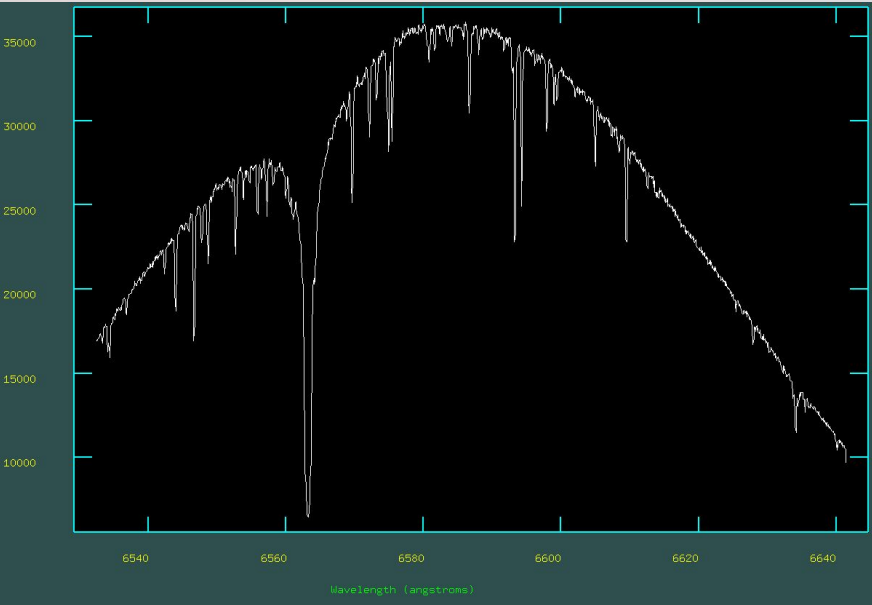
Vlnová kalibrace: px -> vlnové délky

Pomocí ThAr spektra. Je nutné identifikovat desítky čar přes celé spektrum, nejlépe v každém řádu.



Zpracování a analýza - vlivy

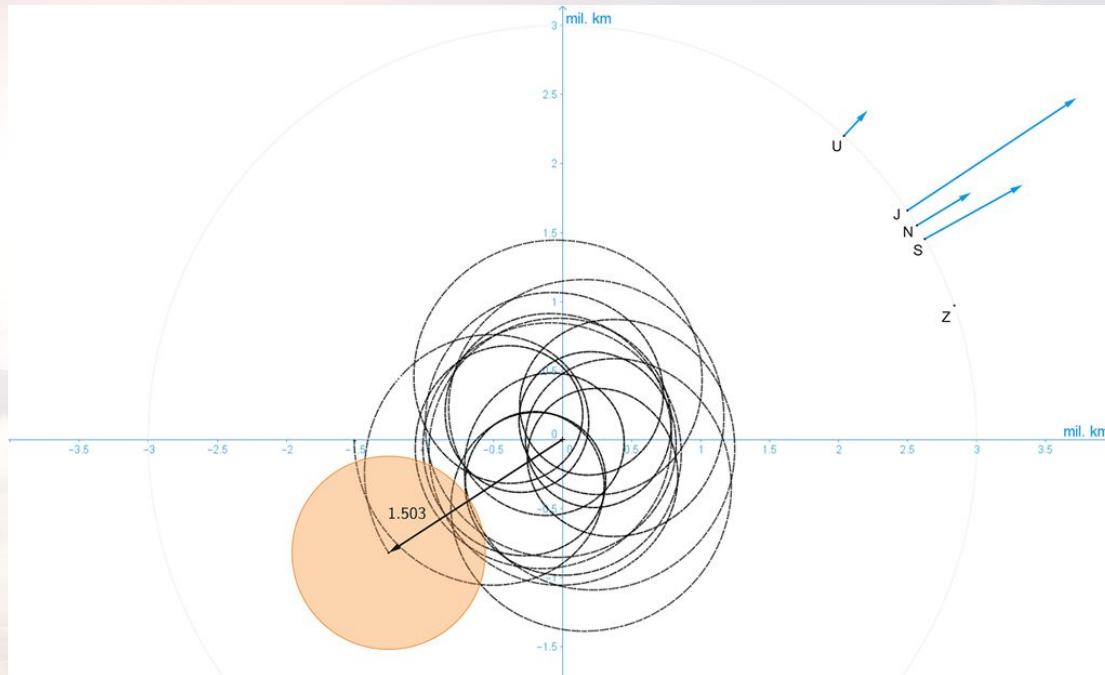
Normalizace kontinua - problém u širokých čar a u širokých absorpcí



Zpracování a analýza - vlivy

Heliocentrická korekce - odstranění vlivů pohybu Země okolo Slunce (~ 30 km/s), rotace Země (~ 460 m/s)
U přesnějších měření nutná i barycentrická korekce - odstranění vlivu plane (přesun do barycentra SS, cca max 15 m/s)

Závisí na poloze a nadmořské výšce pozorovatele, aktuální poloze na obloze

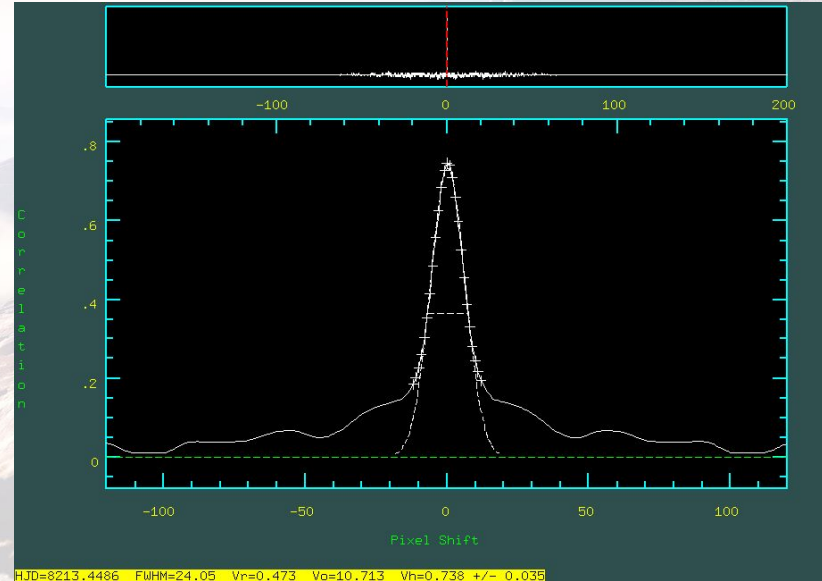
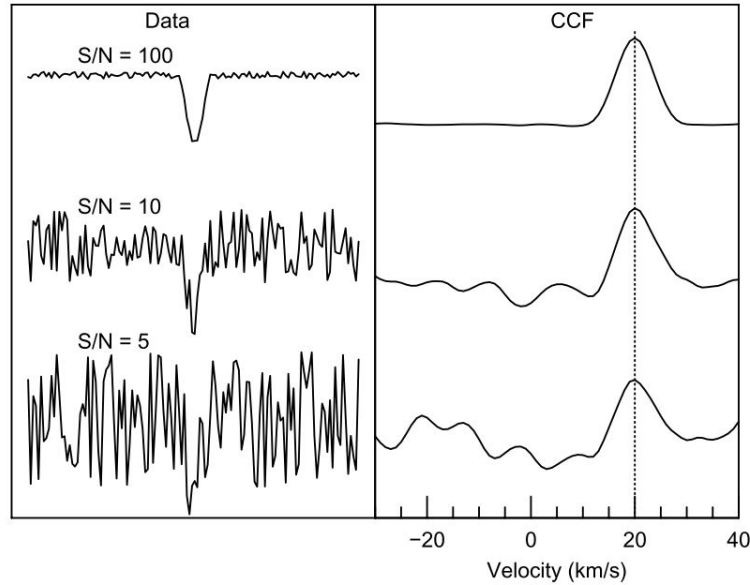


Zpracování a analýza - vlivy

Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”

$$\text{CCF}(\Delta x) = s(\Delta x) \otimes t(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x)t(x + \Delta x)dx$$

$$\text{CCF}(\Delta x) = \sum_{x=1}^N s(x)t(x + \Delta x)dx$$

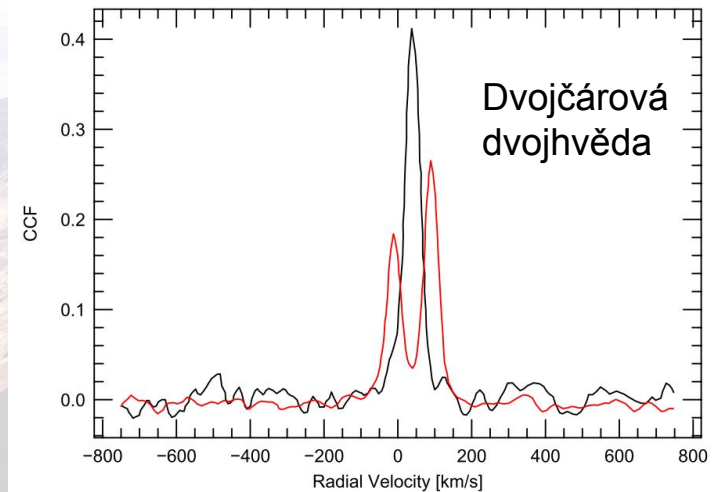
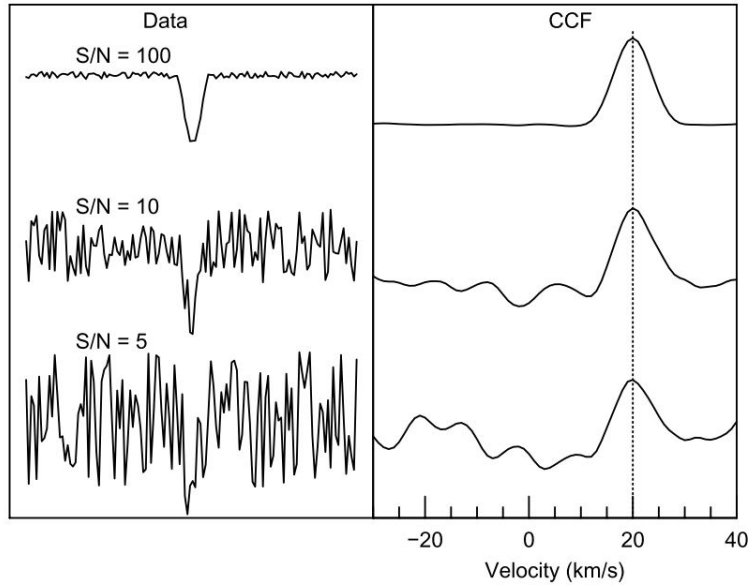


Zpracování a analýza - vlivy

Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”

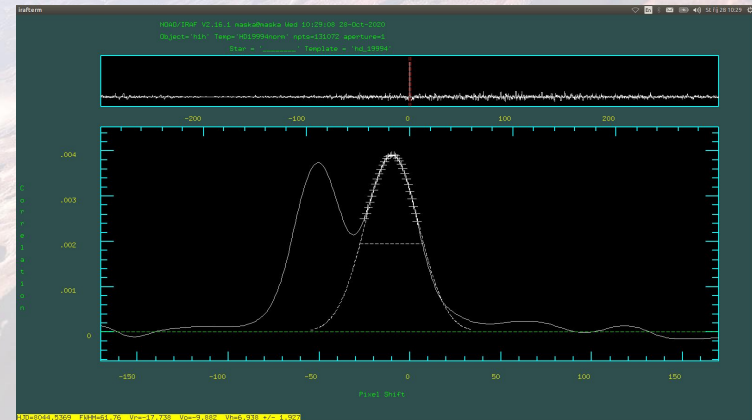
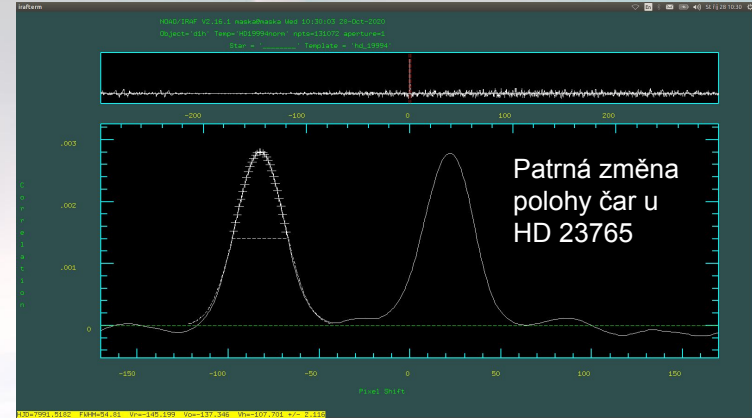
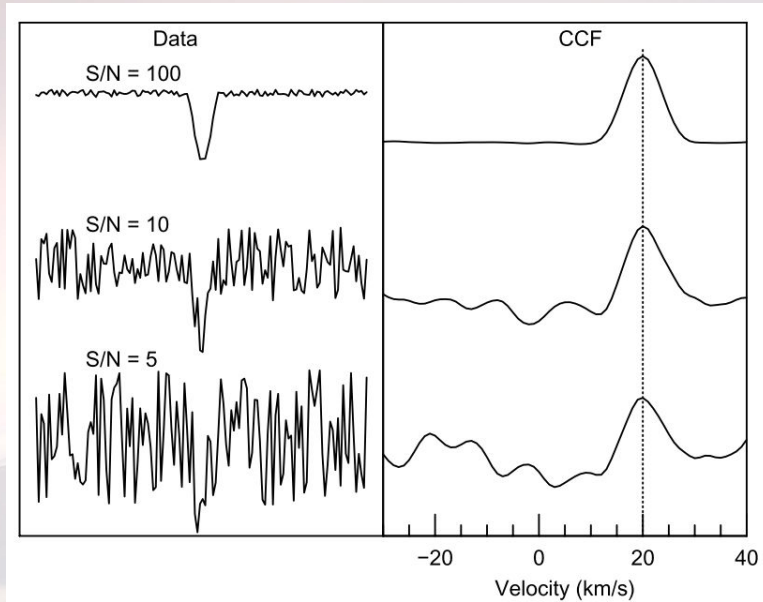
$$\text{CCF}(\Delta x) = s(\Delta x) \otimes t(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(x)t(x + \Delta x)dx$$

$$\text{CCF}(\Delta x) = \sum_{x=1}^N s(x)t(x + \Delta x)dx$$



Zpracování a analýza - vlivy

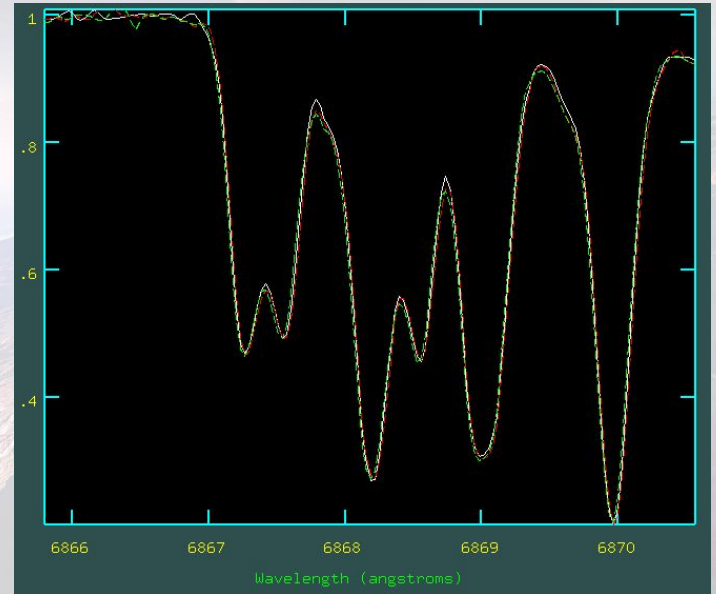
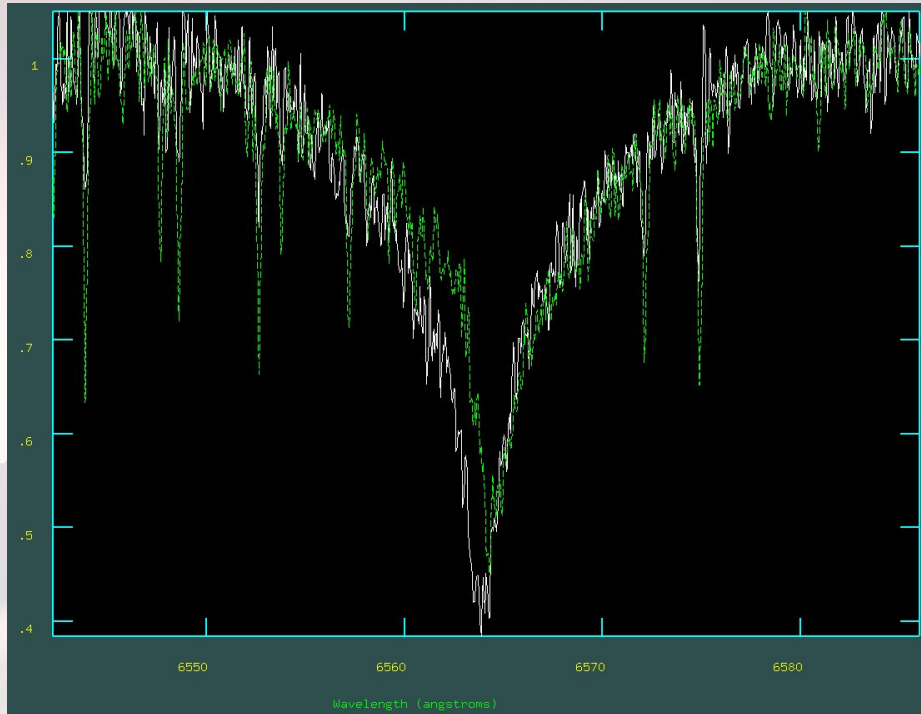
Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”



Zpracování a analýza - vlivy

Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”

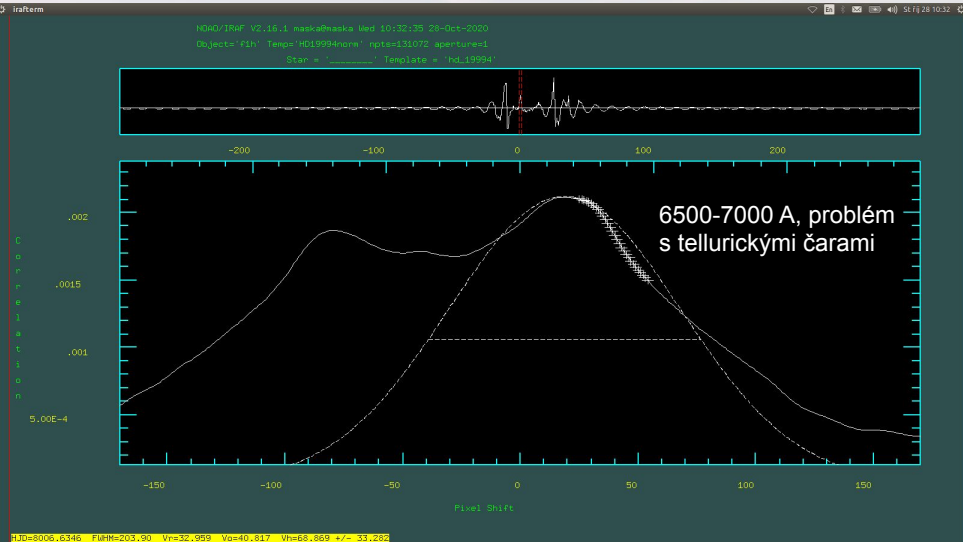
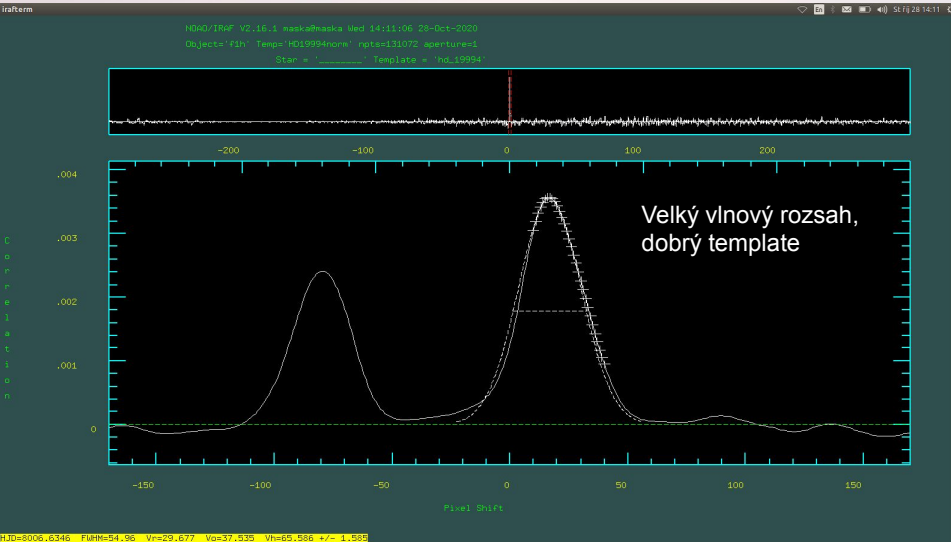
- Je nutné odstranit instrumentální posuvy (tellurické čáry, I₂, simultánní ThAr)



Zpracování a analýza - vlivy

Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”

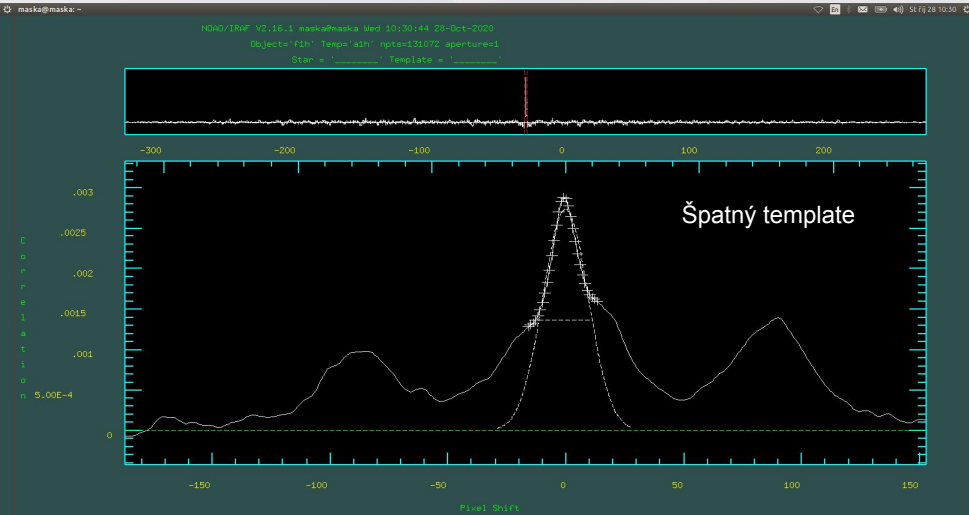
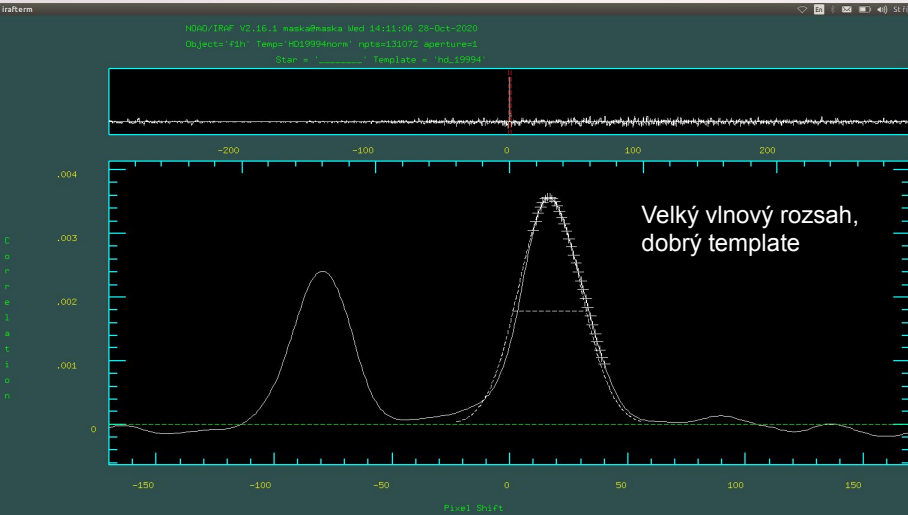
- Je nutné odstranit instrumentální posuvy (tellurické čáry, I_2 , simultánní ThAr)
- Je nutné mít dobrý template pro cross-korelaci (stejný spektrální typ, vysoký S/N)
- Pro absolutní kalibraci je nutné pozorovat standardní stabilní hvězdu se známou RV
- Je dobré použít regiony bez tellurických čar nebo je odstranit



Zpracování a analýza - vlivy

Určení radiálních rychlostí - cross-correlace - “jak moc jsou čáry posunuté”

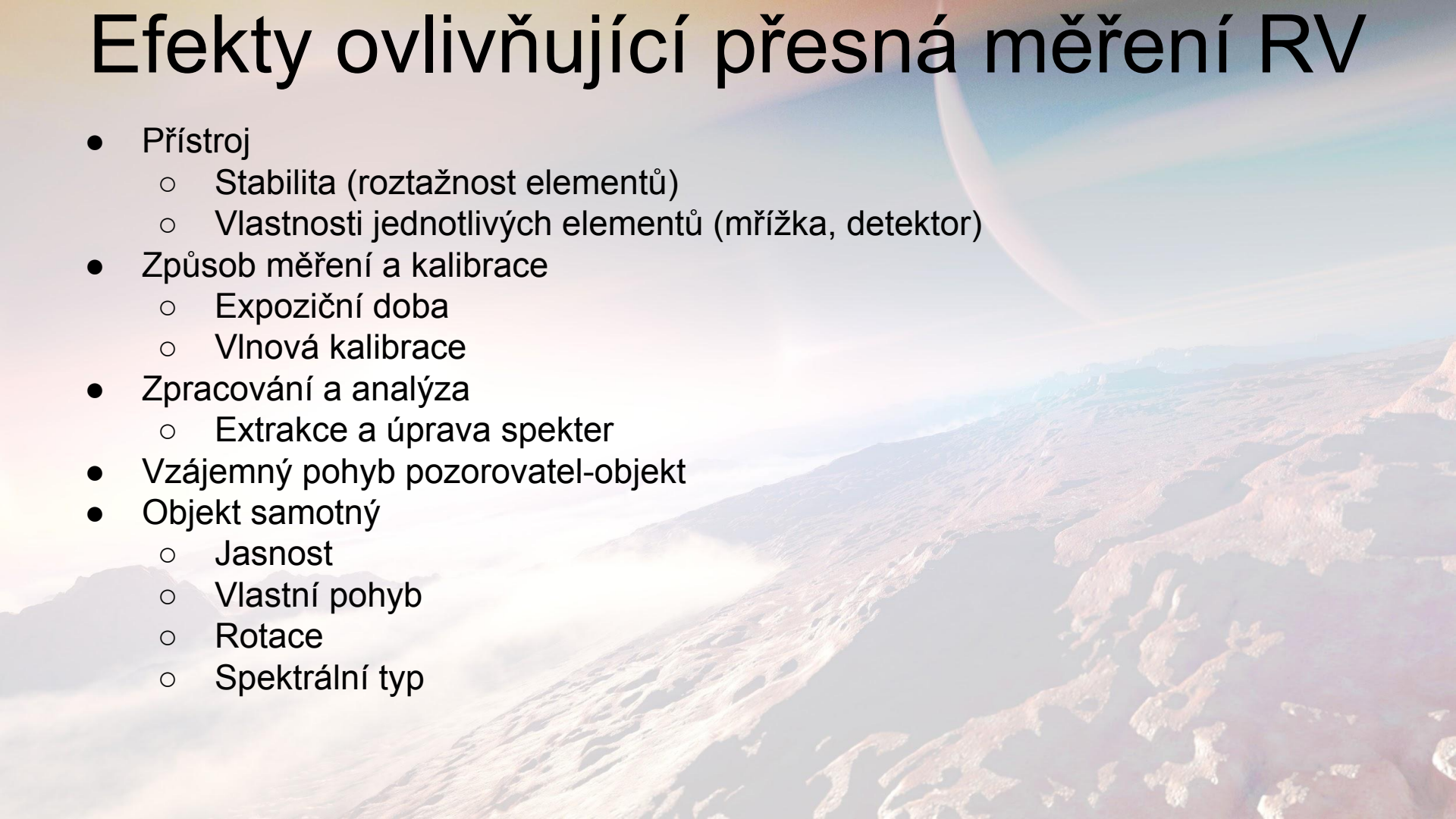
- Je nutné odstranit instrumentální posuvy (tellurické čáry, I_2 , simultánní ThAr)
- Je nutné mít dobrý template pro cross-korelaci (stejný spektrální typ, vysoký S/N)
- Pro absolutní kalibraci je nutné pozorovat standardní stabilní hvězdu se známou RV
- Je dobré použít regiony bez tellurických čar nebo je odstranit



HJde8006.6346 FWHM=54.96 Vrs=29.677 Vrs=37.535 vhw=65.586 +/- 1.085

HJde8006.6346 FWHM=39.50 Vrs=0.430 Vrs=-0.467 vhw=27.585 +/- 0.605

Efekty ovlivňující přesná měření RV



- Příklad
 - 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

Přístroj - chyby

- Stabilita s ohledem na roztažnost
 - Přístroje izolovány, ve “vakuu”, teplotně stabilní

HARPS@3.6mLaSilla:
 $\delta T \sim 0.01$ K, $p \sim 10^{-5}$ bar

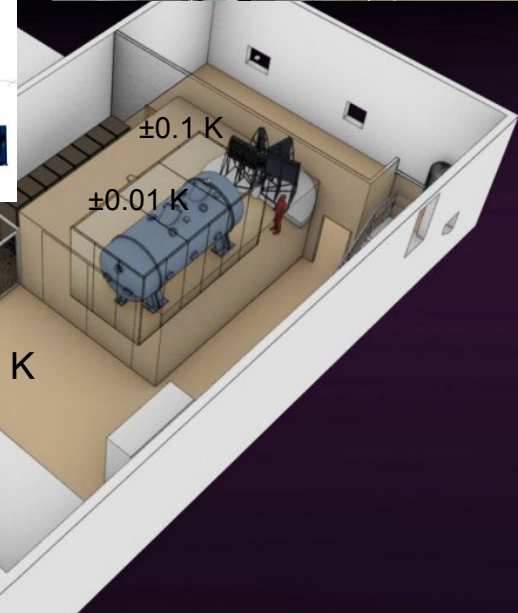
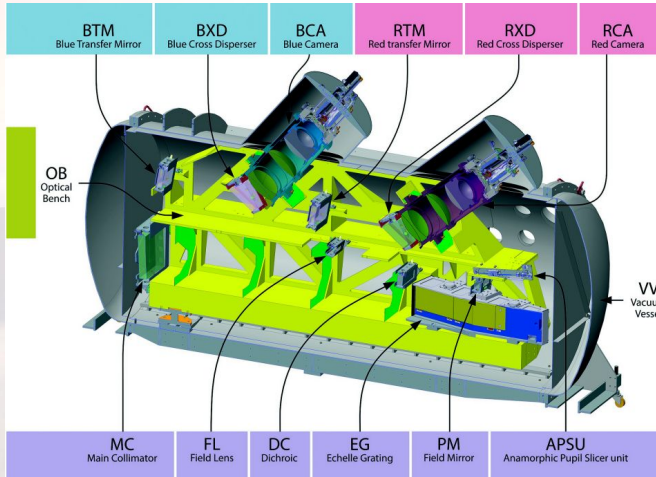
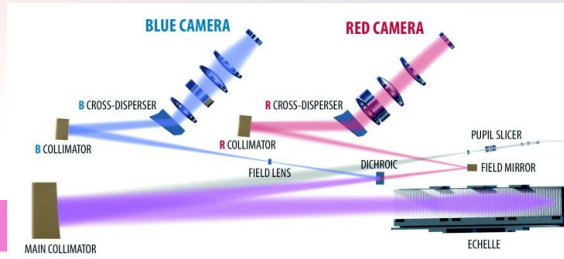


Přístroj - chyby

- Stabilita s ohledem na roztažnost
 - Přístroje izolovány, ve “vakuu”, teplotně stabilní

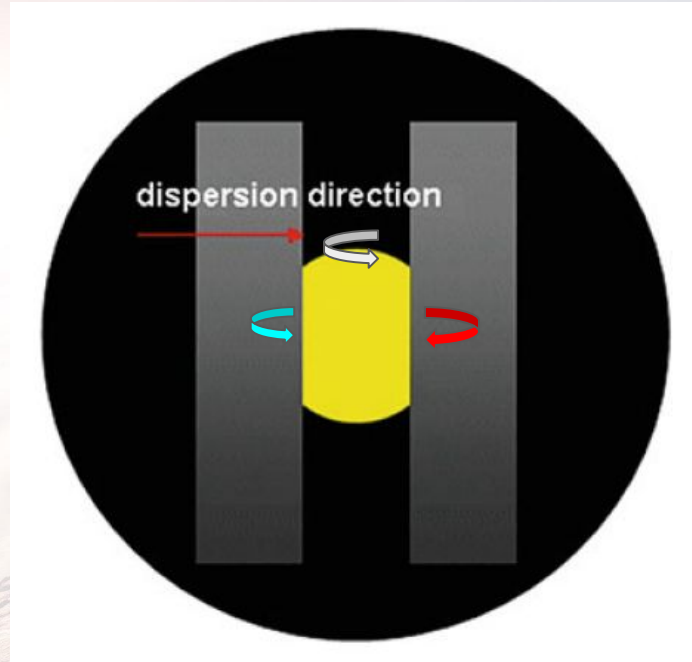
HARPS@3.6mLaSilla:
 $\delta T \sim 0.01 \text{ K}$, $p \sim 10^{-5} \text{ bar}$

ESPRESSO@VLT:
 $\delta T \sim 1 \text{ mK}$, $p \sim 10^{-8} \text{ bar}$



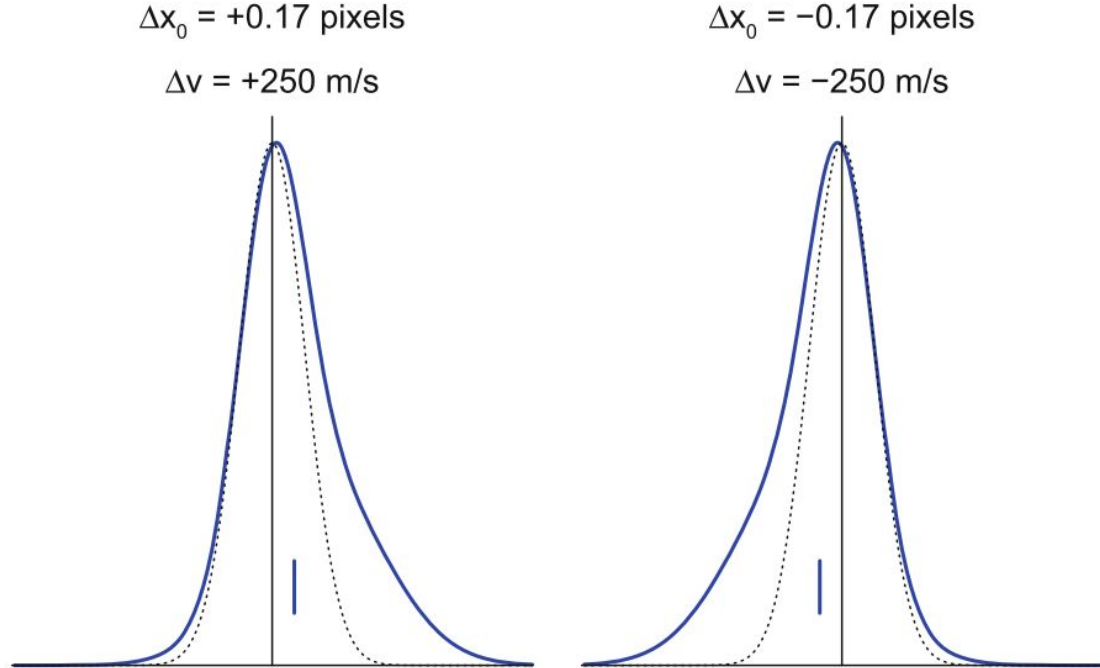
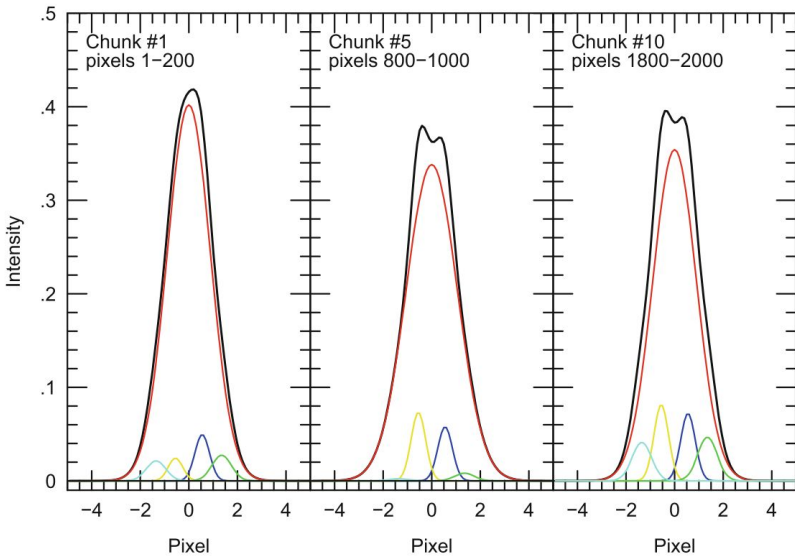
Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
 - Kvůli rotaci hvězdy je potřeba, aby hvězda stabilně centrovaná na štěrbině/vlákně
 - Problém u slabých hvězd



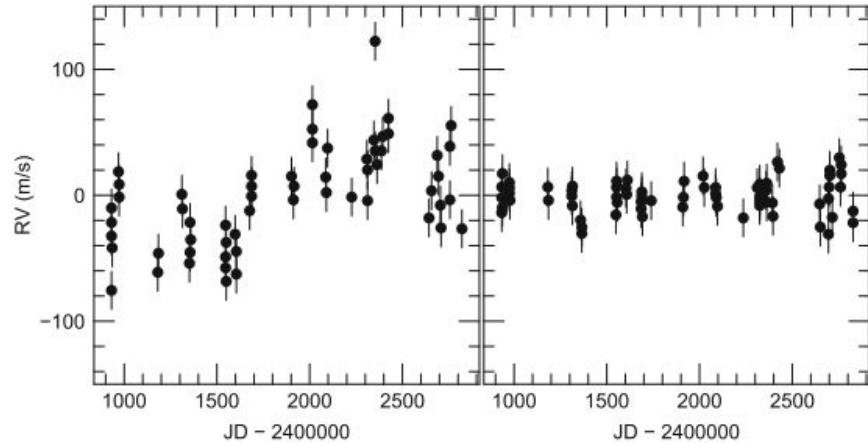
Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
 - Monochromatické záření by v ideálním případě vyprodukovalo spektrální čáry jako δ -funkce
 - Díky optickým vadám deformovaná Gaussova křivka



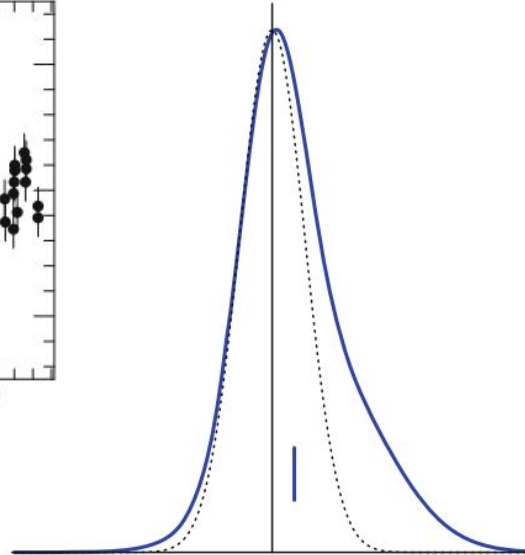
Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
 - Monochromatické záření by v ideálním případě vyprodukovalo spektrální čáry jako δ -funkce
 - Díky optickým vadám deformovaná Gaussova křivka



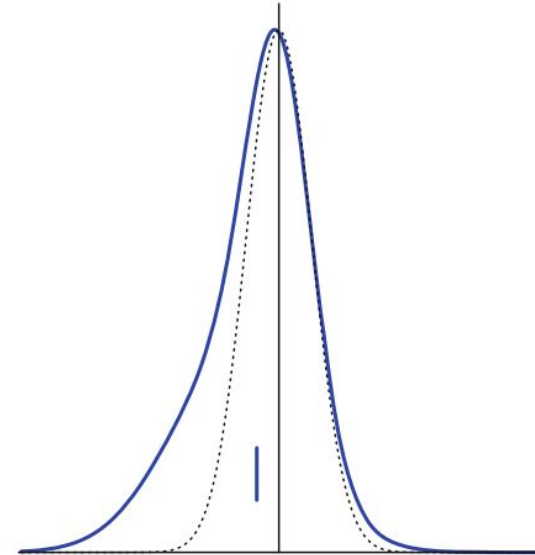
$$\Delta x_0 = +0.17 \text{ pixels}$$

$$\Delta v = +250 \text{ m/s}$$



$$\Delta x_0 = -0.17 \text{ pixels}$$

$$\Delta v = -250 \text{ m/s}$$



Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
- Rozlišení

- Čím větší rozlišení, tím
 - Více čar
 - Lépe popsán tvar čar
 - Posun na více px
 - Menší vlnový rozsah

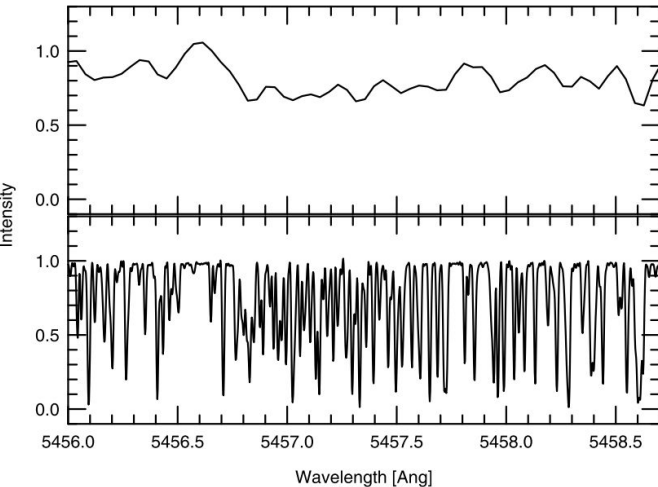


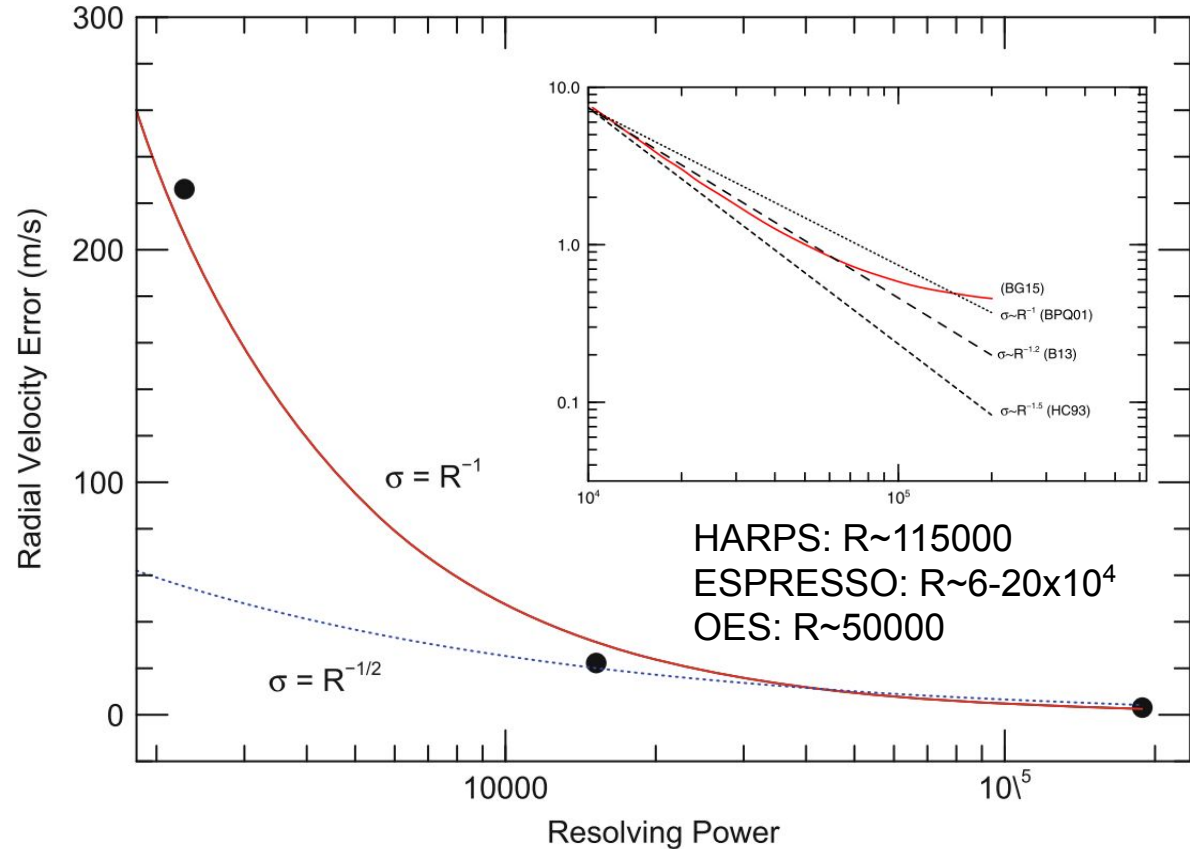
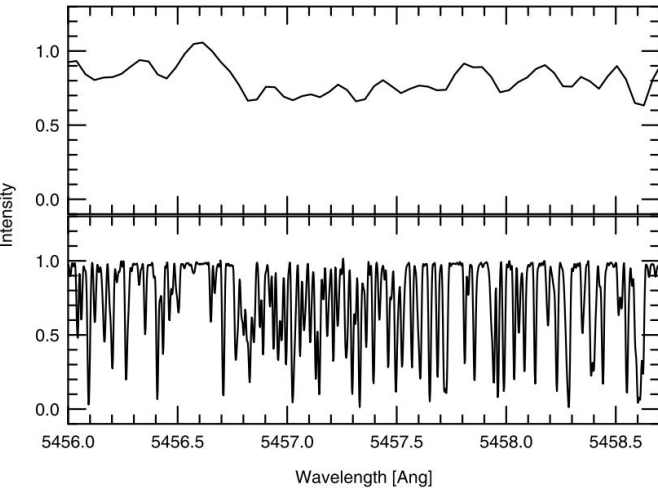
Table 3.1. The Doppler Shift of 1 m s^{-1} for Different Resolving Powers

Resolving Power	Dispersion ($\text{\AA}/\text{pixel}$)	Velocity Resolution ($\text{m s}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$)	Shift in Pixels	Shift at Detector (mm)
1000	2.5	150,000	6.7×10^{-6}	10^{-7}
5000	0.5	30,000	3.3×10^{-5}	5.0×10^{-7}
10,000	0.25	15,000	6.7×10^{-5}	1.0×10^{-6}
25,000	0.10	6000	1.7×10^{-4}	2.5×10^{-6}
50,000	0.05	3000	3.3×10^{-4}	5.0×10^{-6}
100,000	0.025	1500	6.7×10^{-4}	1.0×10^{-5}
200,000	0.0125	750	1.4×10^{-3}	2.0×10^{-5}
500,000	0.005	300	3.3×10^{-3}	5.0×10^{-5}

Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
- Rozlišení

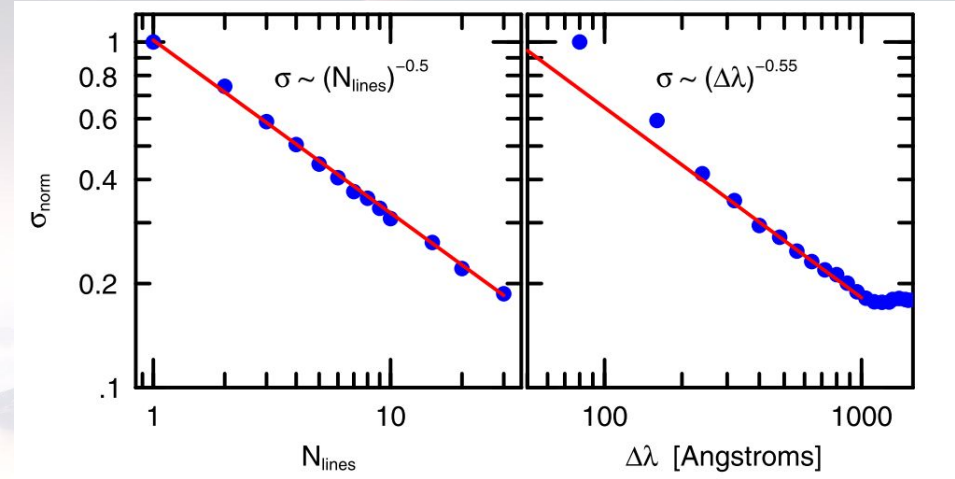
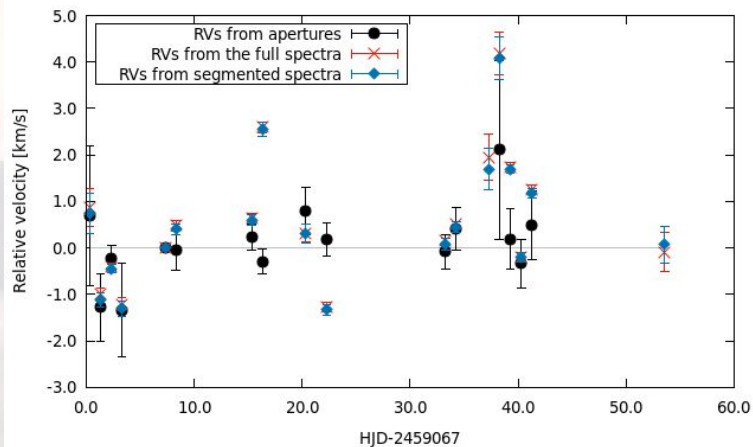
- Čím větší rozlišení, tím
 - Více čar
 - Lépe popsán tvar čar
 - Posun na více px
 - Menší vlnový rozsah



Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
- Rozlišení
- Spektrální rozsah
 - Čím větší rozsah, tím více čar

$$\sigma_{N_{\text{lines}}} = \sigma_{1\text{line}} / \sqrt{N_{\text{lines}}}$$

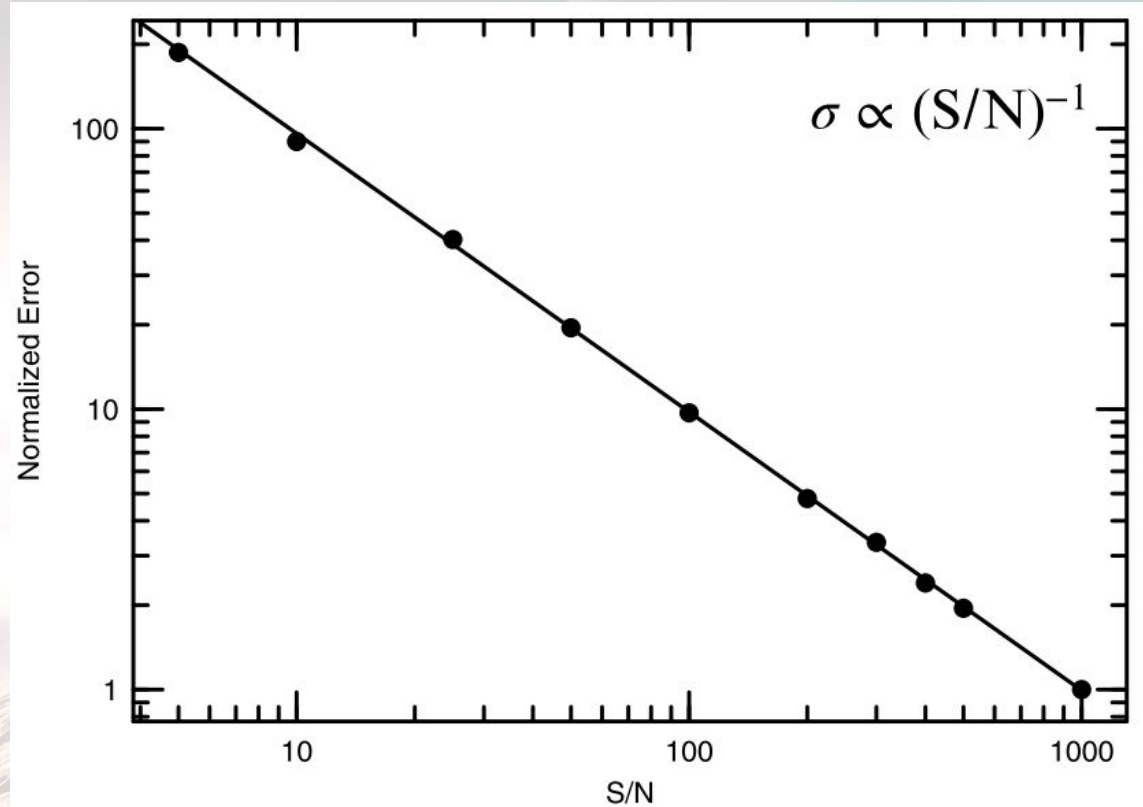


Přesnější výsledky dává kroskorelace na jednotlivých aperturách

Přístroj - vlivy

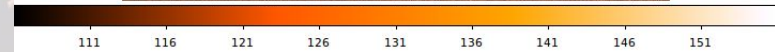
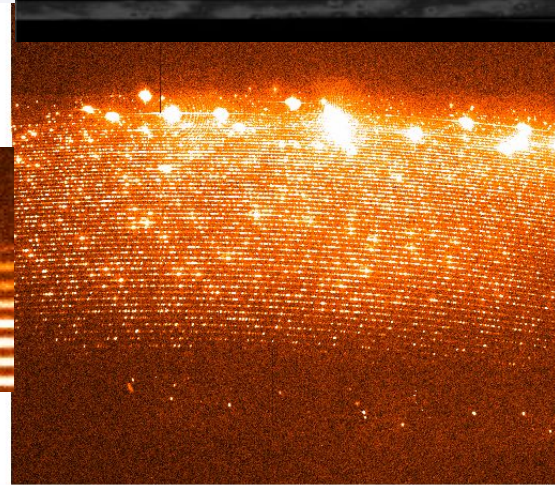
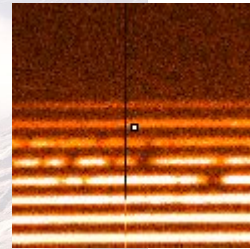
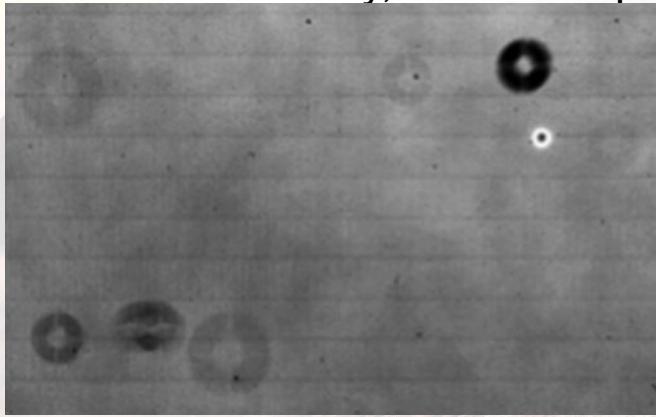
- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
- Rozlišení
- Spektrální rozsah
- Účinnost
 - Čím více světla, tím nižší šum

$$\sigma_p = \sqrt{N_p}$$



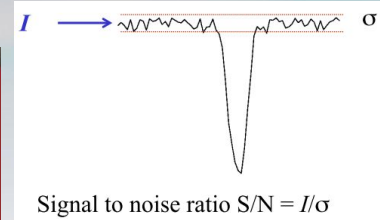
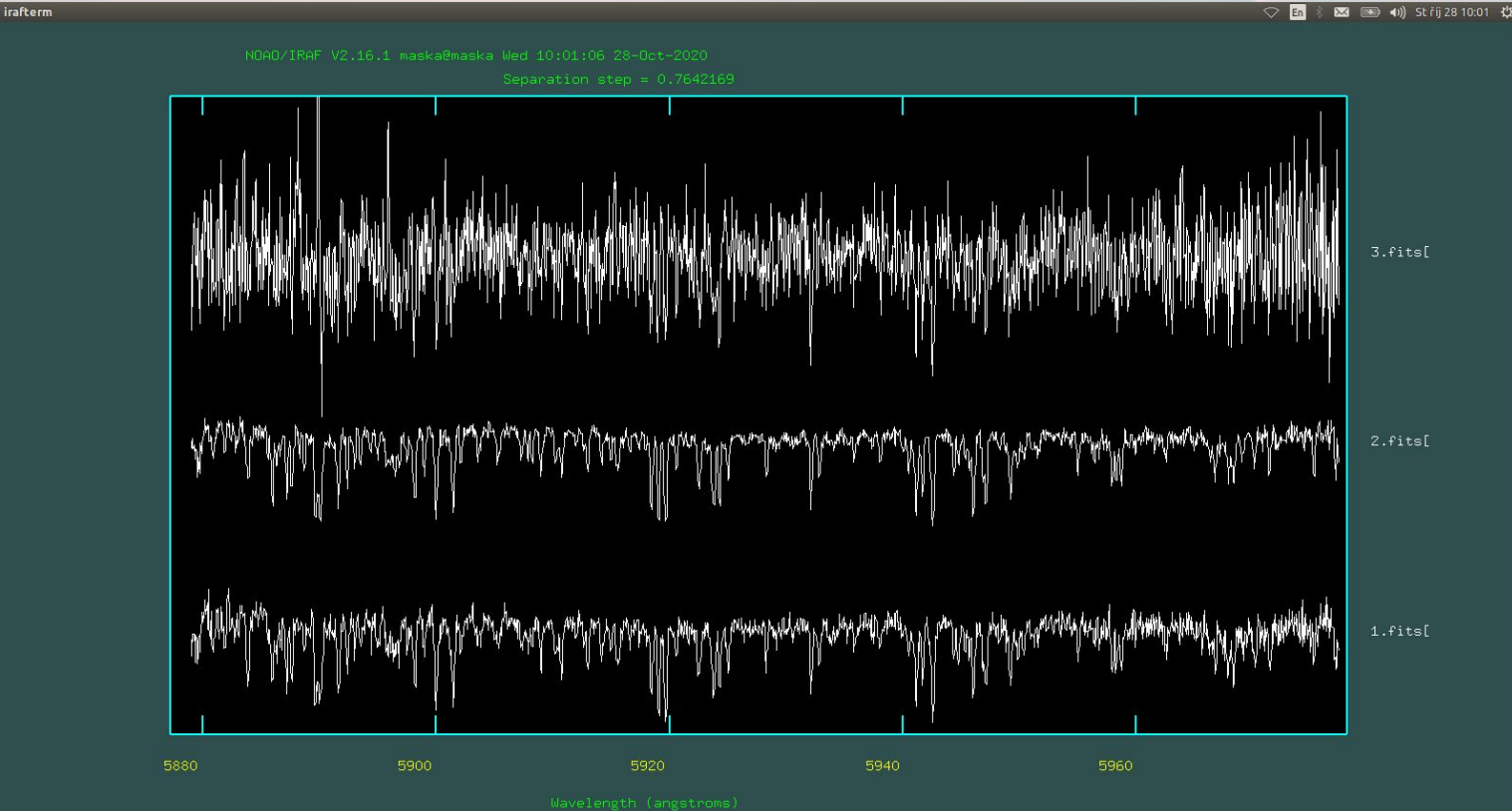
Přístroj - vlivy

- Stabilita s ohledem na roztažnost
- Guiding
- Instrumentální profil
- Rozlišení
- Spektrální rozsah
- Účinnost
- Vlastnosti čipu
 - Špatné pixely, blooming
 - Fringing (interference na čipu)
 - Nečistoty, rozdílnost pixelů



Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)



12 mag, 3600 s

0 mag, 30 s

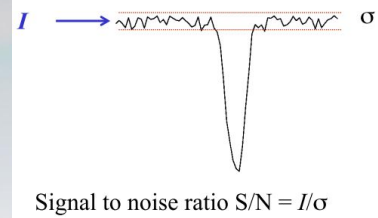
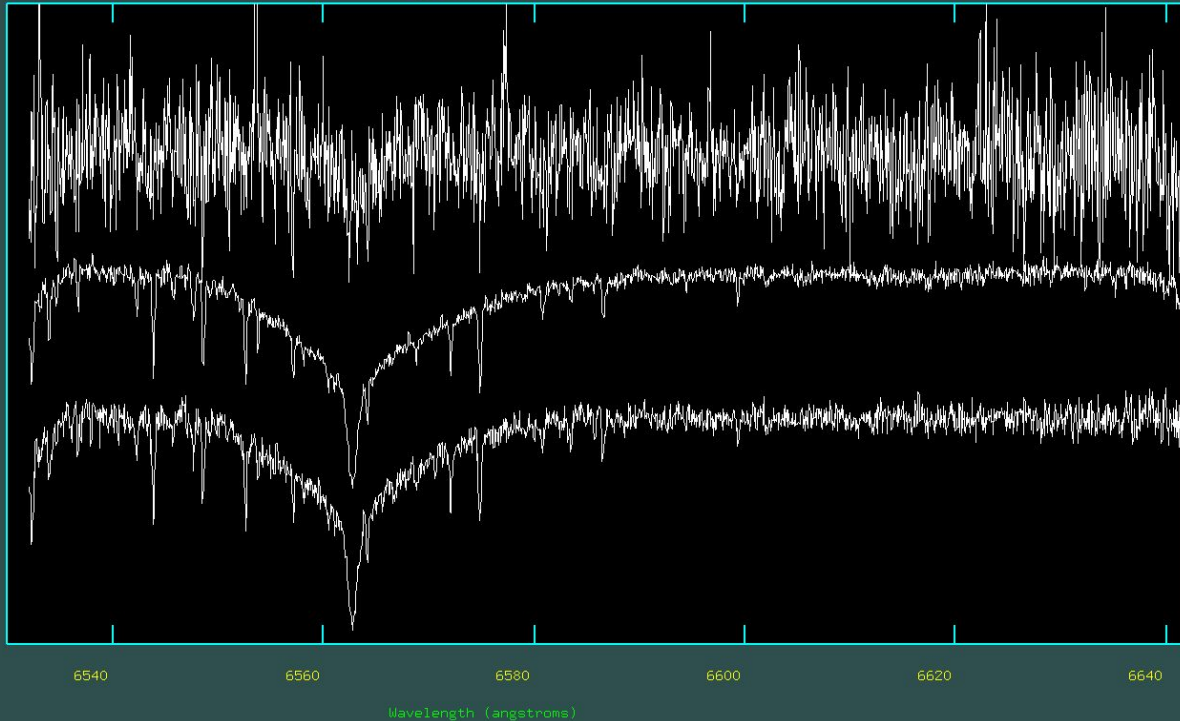
0 mag, 10 s

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)

irafterm

NDAD/IRAF V2.16.1 maska@maska Wed 10:04:19 28-Oct-2020
Separation step = 0.5



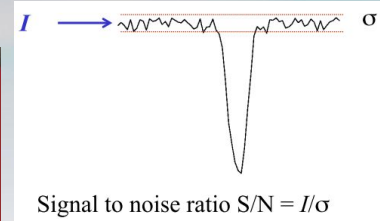
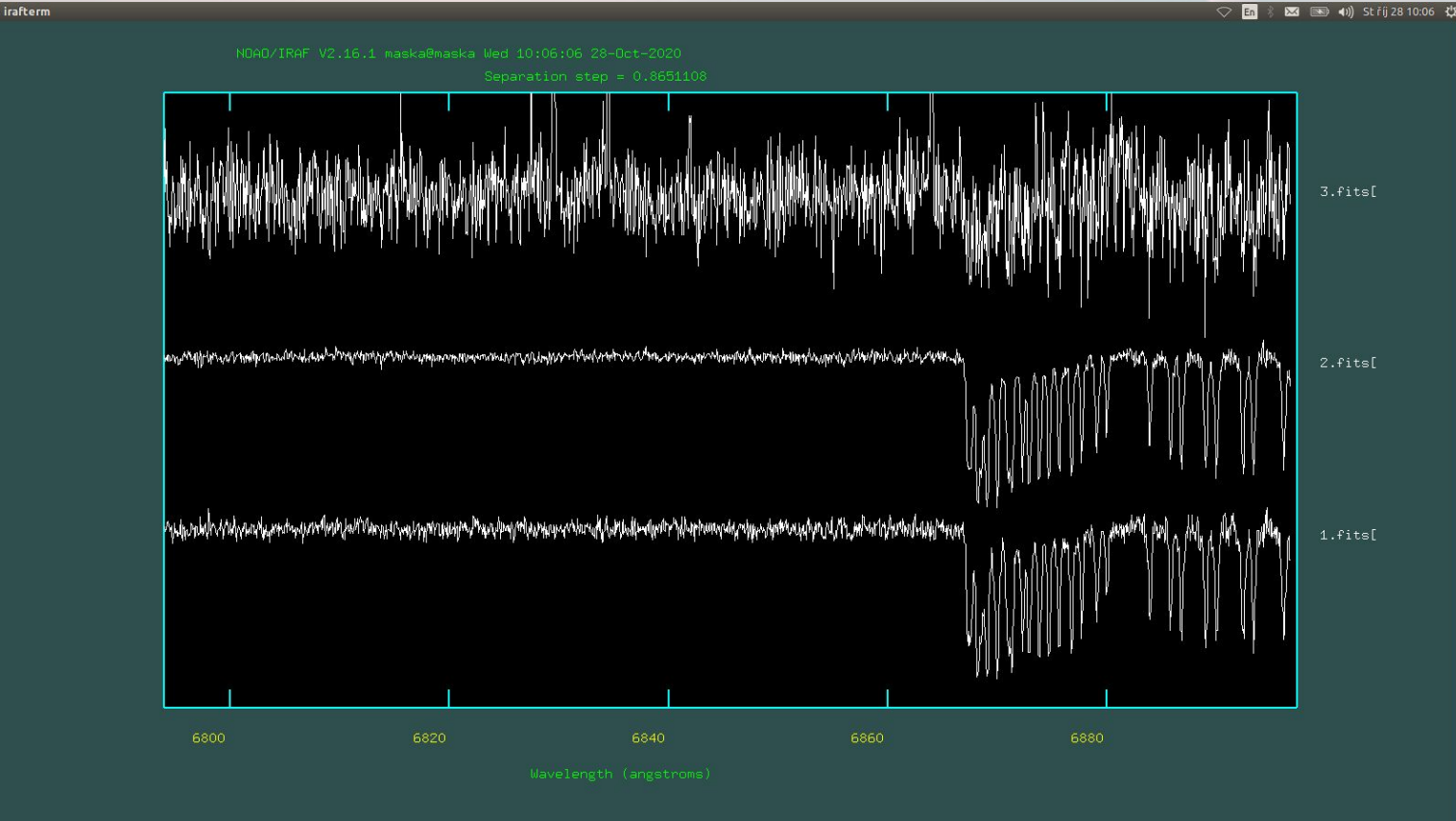
12 mag, 3600 s

0 mag, 30 s

0 mag, 10 s

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)



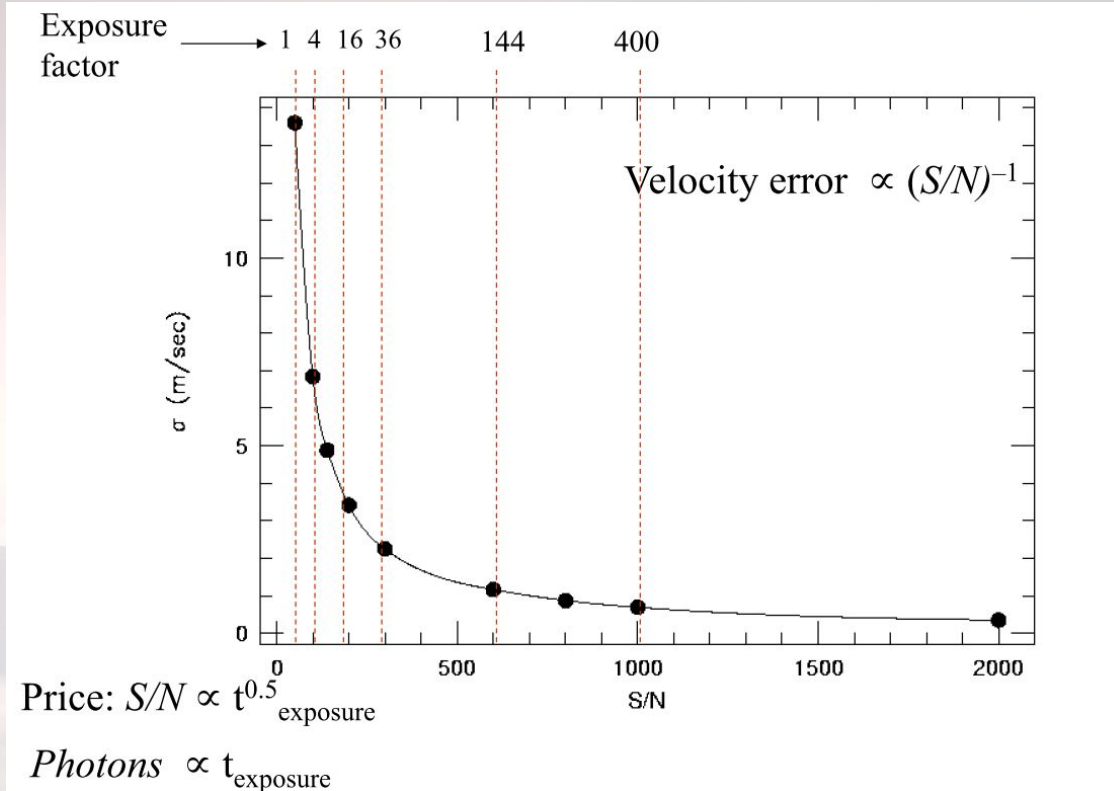
12 mag, 3600 s

0 mag, 30 s

0 mag, 10 s

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)

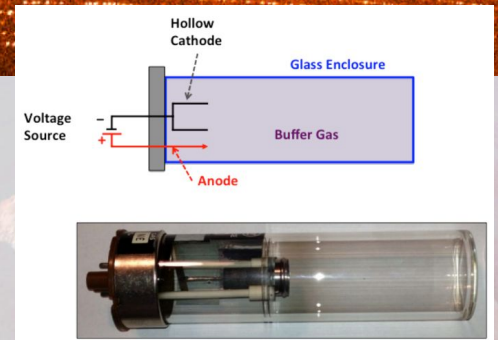
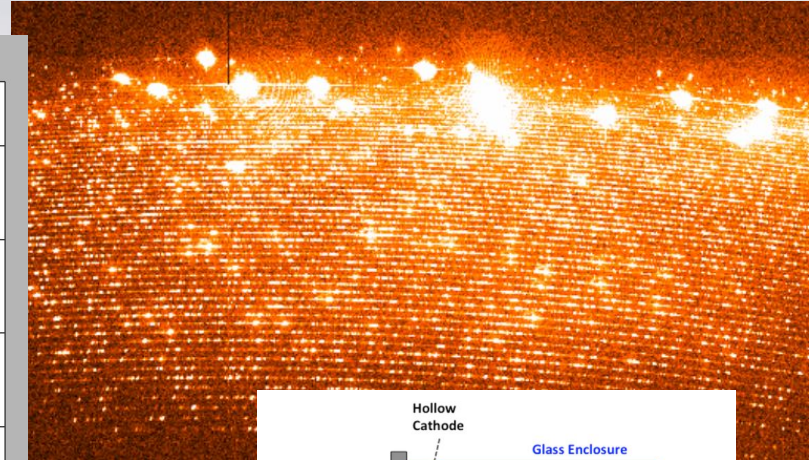
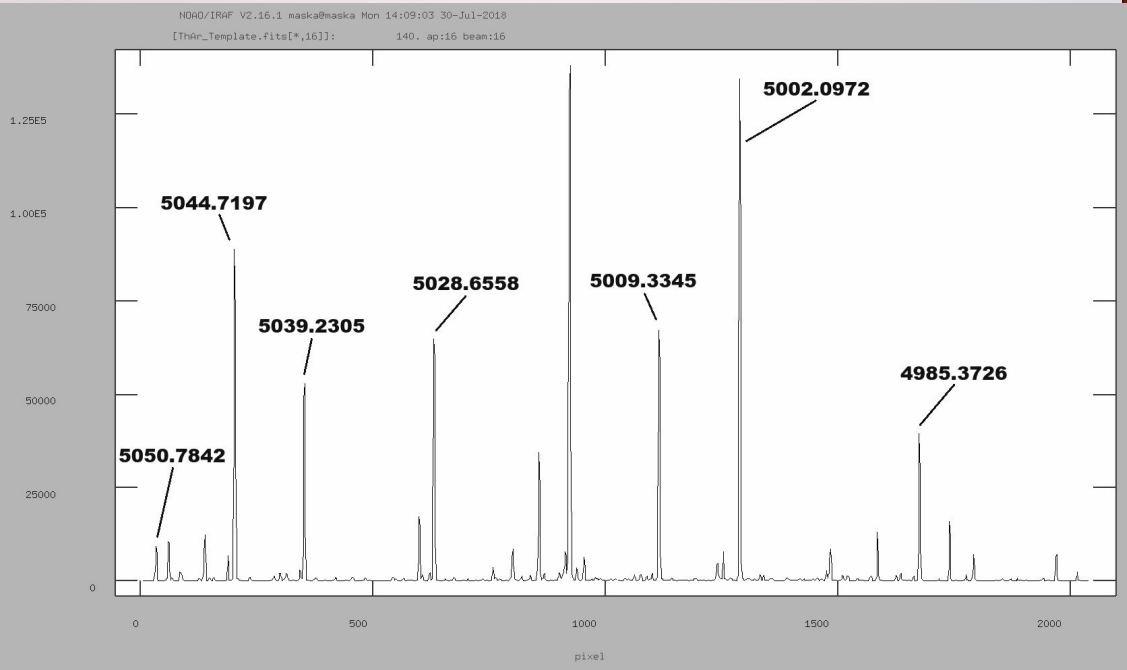


Kvalitu spektra mohou zvýšit prodloužením expoziční doby

Pro přesná měření a krátké periody není vhodné dělat expozice v délce desítek minut - rotace Země

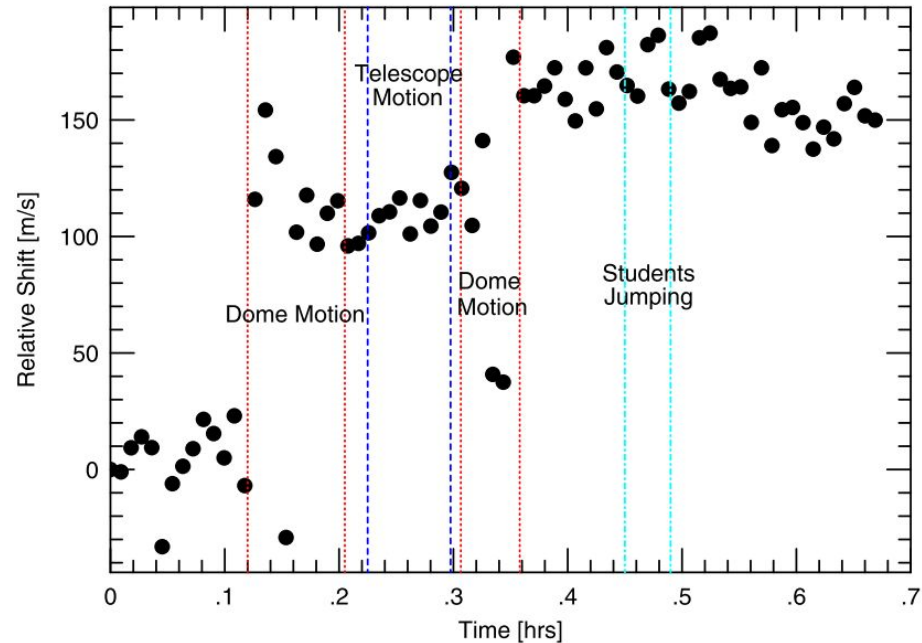
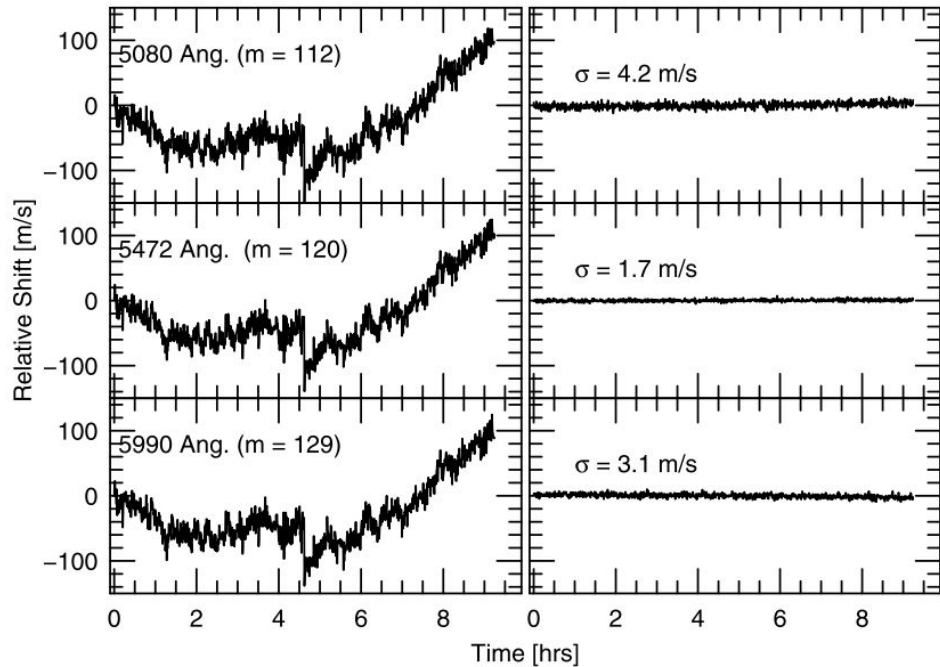
Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)



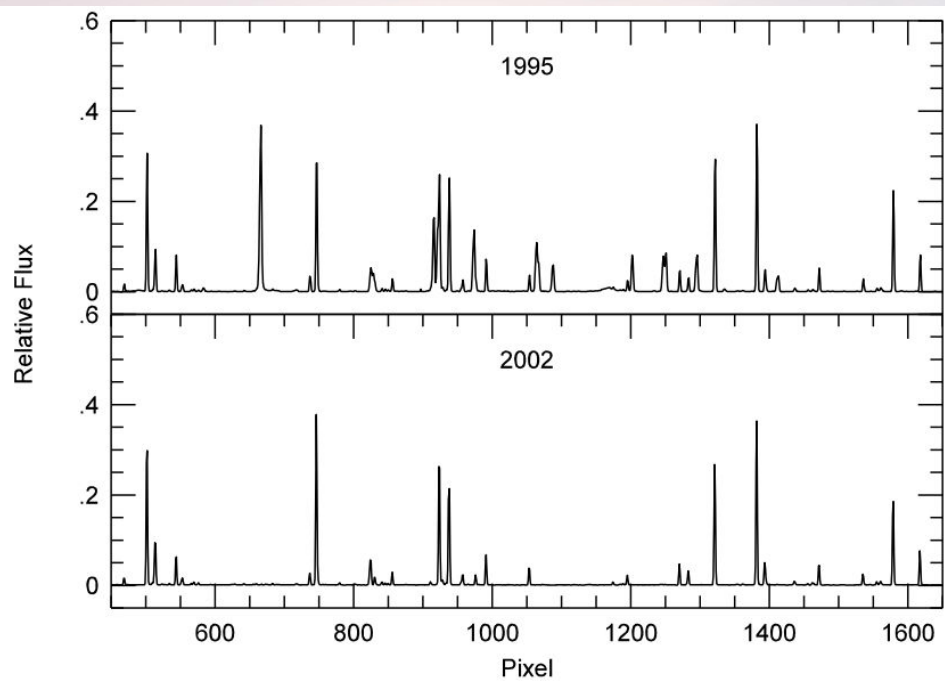
Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)



Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)



Výhody:

- neztrácí se světlo
- velmi vysoký rozsah čar $\sim 2000 \text{ \AA}$
- nekombinuje se světlo objektu s kalibračním
- dlouhodobé zkušenosti

Nevýhody:

- mezi spektrem objektu a srovnávacím mohou být posuvy
- spektrum se zobrazuje na jiném místě čipu
- spektrální čáry mají různou intenzitu
- čáry mají velkou šířku a blendují - nemožnost modelovat IP
- je potřeba vysokého napětí - citlivost na stabilitu napájení
- lampy časem degradují
- je obtížné je nakoupit

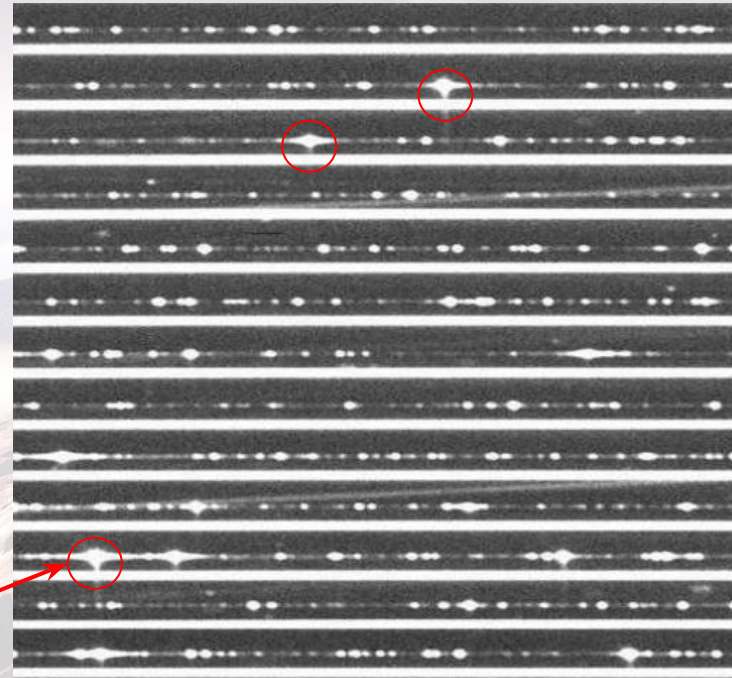
Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici

HARPS, ELODIE, CARMENES
souběžně, přesnost až jednotky m/s

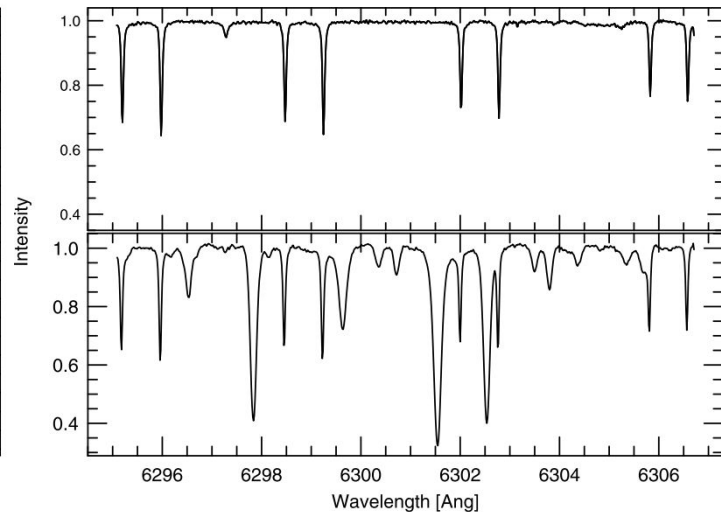
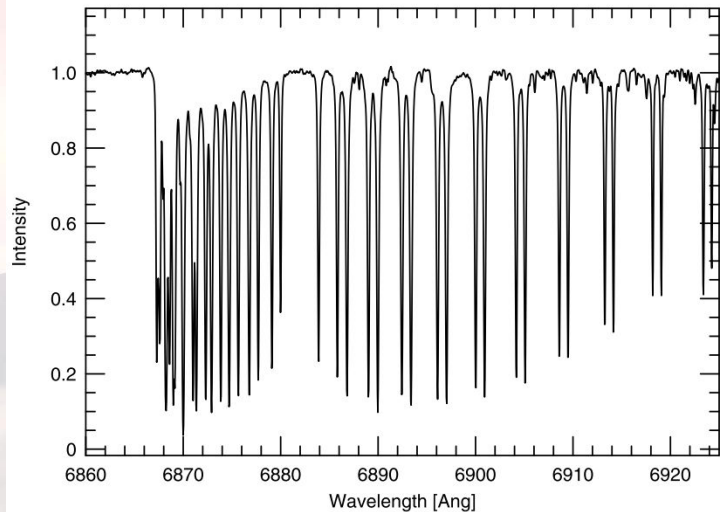
Stále však není kalibrační spektrum
zobrazeno na tom samém místě jako
měřený objekt - možné systematické
chyby

Kontaminace měřeného spektra



Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici
 - Světlo prochází plynem a zanechává absorpční čáry na přesně definovaných vlnových délkách (tellurické čáry, HF, I₂)



Tellurické čáry

Výhody:

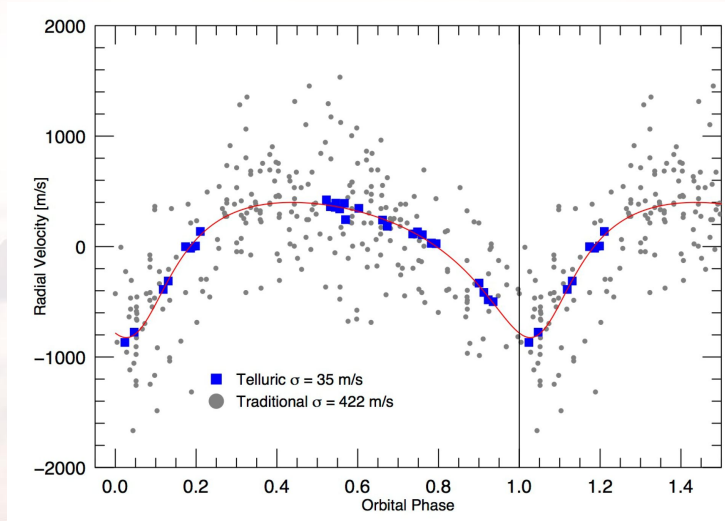
- přesnost ~20 m/s
- kontaminace spektra
- ve spektru “zadarmo”

Problémy:

- velmi limitovaný vlnový rozsah
- nestálost atmosféry
- pohyby v atmosféře

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici
 - Světlo prochází plynem a zanechává absorpční čáry na přesně definovaných vlnových délkách (tellurické čáry, HF, I₂)



Tellurické čáry

Výhody:

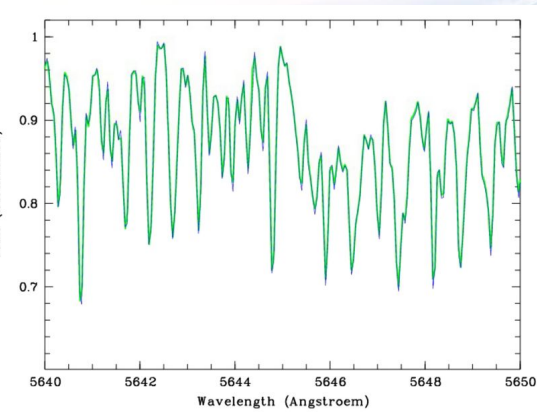
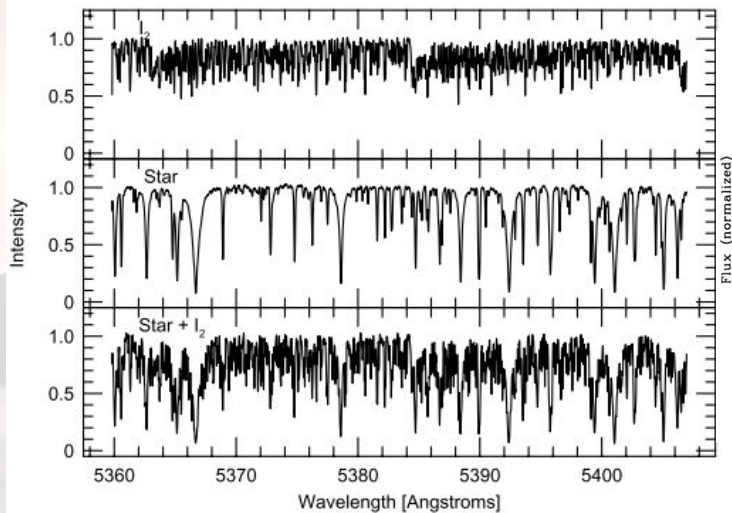
- přesnost ~ 20 m/s
- kontaminace spektra
- ve spektru “zadarmo”

Problémy:

- velmi limitovaný vlnový rozsah
- nestálost atmosféry
- pohyby v atmosféře

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici
 - Světlo prochází plynem a zanechává absorpční čáry na přesně definovaných vlnových délkách (tellurické čáry, HF, I₂, jiné plyny)



Výhody I₂:

- přesnost jednotky m/s
- široký spektrální rozsah ~1000 Å
- stabilita časová i teplotní/tlaková
- pracovní teplota ~50 °C
- možnost modelovat IP (úzké čáry)

Nevýhody:

- vlnový rozsah ~5000-6000 Å
- kontaminace spektra
- ztráta světla 20-50 %

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici
 - Světlo prochází plynem a zanechává absorpční čáry na přesně definovaných vlnových délkách (tellurické čáry, HF, I₂)

Spectrograph	Slit Fiber	R ($\lambda/\delta\lambda$)	Calibrator	σ_{200} (m s^{-1})	Median (m s^{-1})	Predicted (m s^{-1})
CARMENES	f	94,600	HCL/FP	1.3	3.5	2.0
CHIRON	f	90,000	Iodine	1.0	2.5	4.0
Hamilton	s	50,000	Iodine	3.0	7.5	8.0
HARPS	f	115,000	Th-Ar	0.8	2.5	2.0
HARPS-N	f	115,000	Th-Ar	0.8	3.5	2.0
HIRES	s	55,000	Iodine	1.5	5.0	7.0
HRS	s	60,000	Iodine	3.0	7.0	6.5
LEVY	s	110,000	Iodine	1.5	3.5	3.0
PARAS	f	67,000	Th-Ar	1.0	2.5	4.0
PFS	s	76,000	Iodine	1.2	3.0	5.0
SOPHIE	f	75,000	Th-Ar	1.1	3.0	3.5
SONG	s	90,000	Iodine	2.0	5.0	4.0
UCLES	s	45,000	Iodine	3.0	5.5	9.0
TCES	s	67,000	Iodine	1.9	9.0	6.0
Tull	s	60,000	Iodine	5.0	6.5	6.5

Měření a kalibrace - vlivy

- Kvalita spektra (S/N - expoziční doba, jasnost hvězdy, podmínky)
- Vlnová kalibrace
 - Měřím v px, potřebuji vlnové délky - srovnávací spektrum (ThAr, CuAr, HeNe...)
 - Souběžně vs. před/po expozici
 - Světlo prochází plynem a zanechává absorpční čáry na přesně definovaných vlnových délkách (tellurické čáry, HF, I₂)
 - Laserová kalibrace - píky s přesnými polohami



Např. HARPS, ESPRESSO

Výhody:

- známe vlnové délky - odpadá nutnost kalibrace
- dlouhodobá stabilita
- přesnost limitovaná pouze referenčním signálem

Nevýhody:

- drahé
- technologicky náročné

Vlastnosti objektu

- Projekce rotační rychlosti $v \sin i$ - u rychle rotujících hvězd silné rozšíření

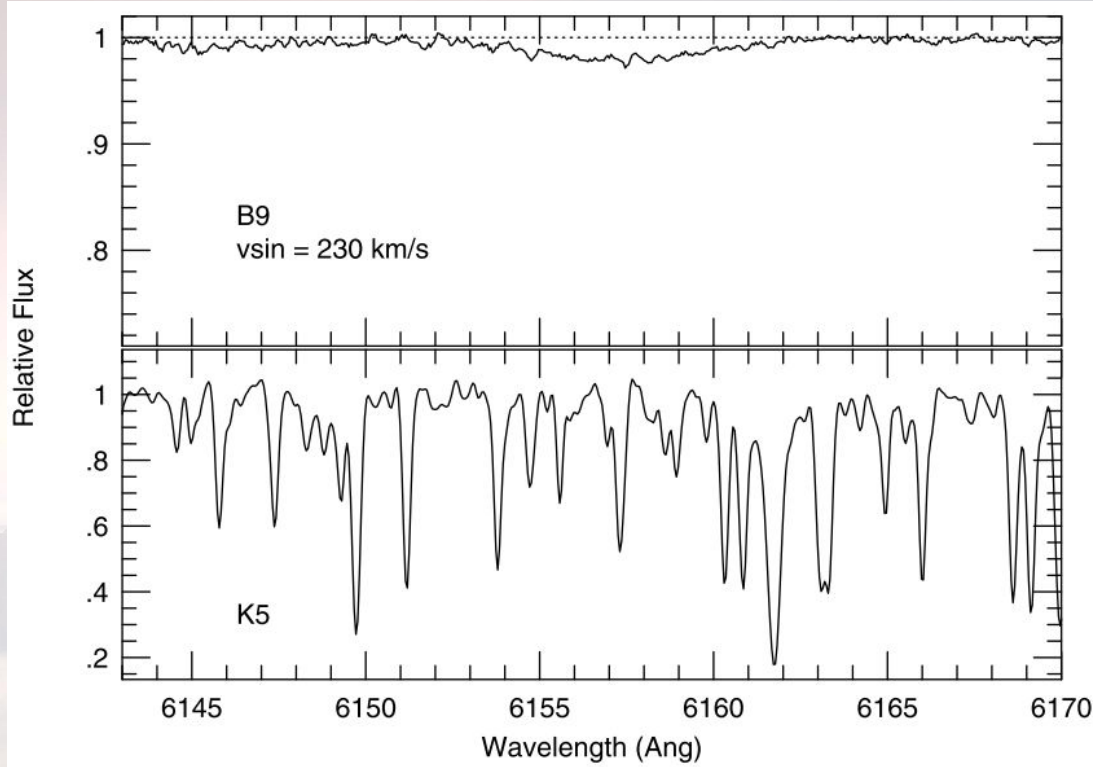
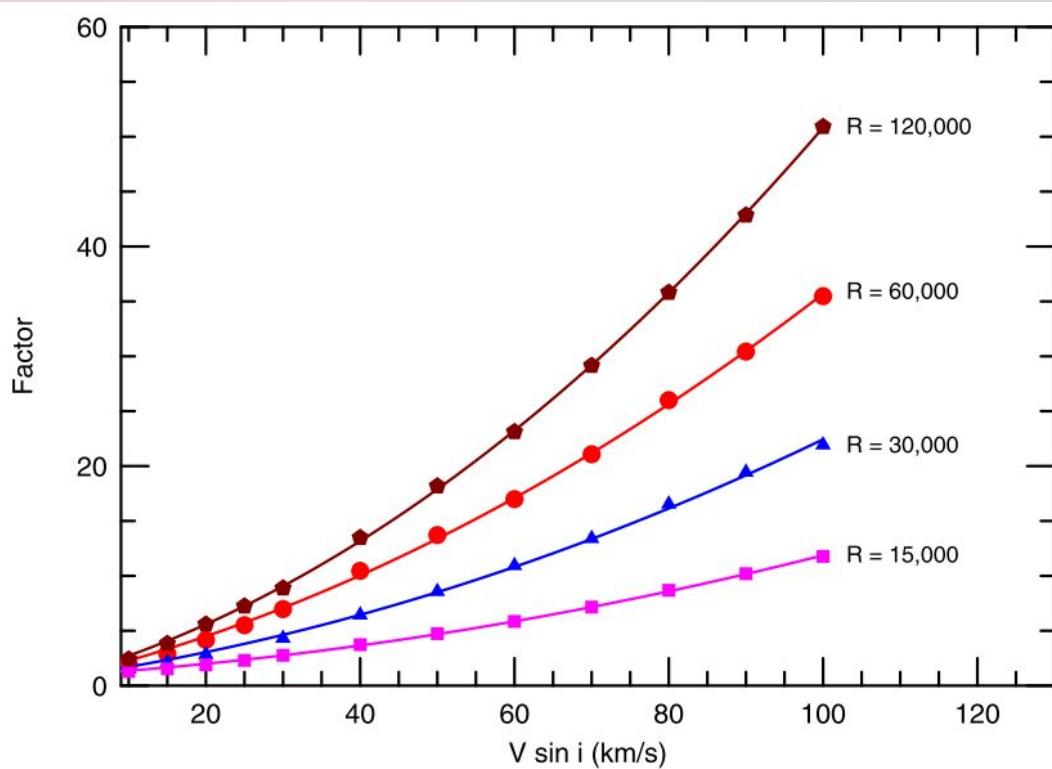


Table 3.2. Median Rotational Velocities of Stars

Spectral Type	$v \sin i$ (km s ⁻¹)
O4	110
O9	105
B5	108
A0	82
A5	80
F0	44
F5	11
G0	4
G5	3
K0	3
K5	2
M0	10
M4	16
M9	10

Vlastnosti objektu

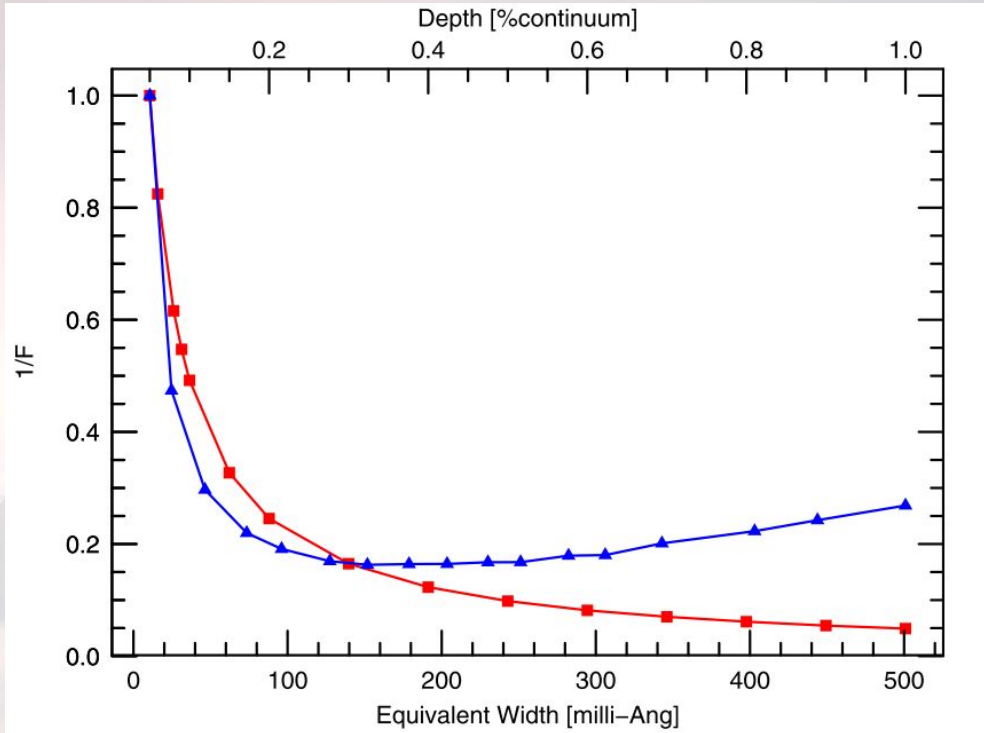
- Projekce rotační rychlosti $v \sin i$ - u rychle rotujících hvězd silné rozšíření



S rostoucím rozlišením roste vliv chyby způsobené rotací hvězdy

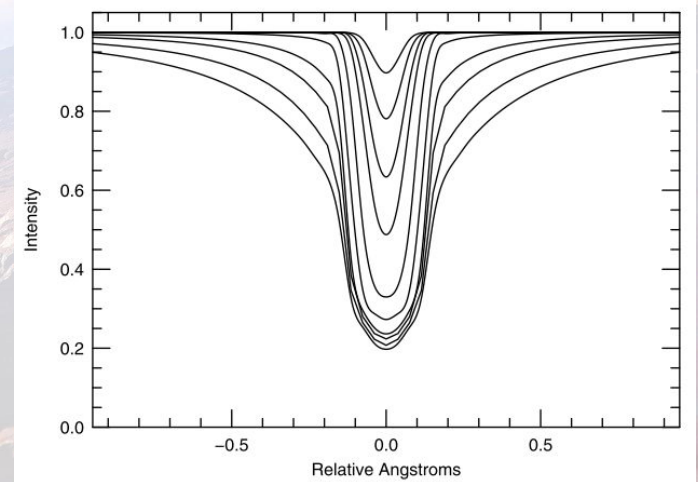
Vlastnosti objektu

- Projekce rotační rychlosti
- Síla spektrálních čar



S rostoucí hloubkou čar roste přesnost určení RV

S rostoucí silou reálných klesá přesnost přestože roste i hloubka čar (roste i šířka)

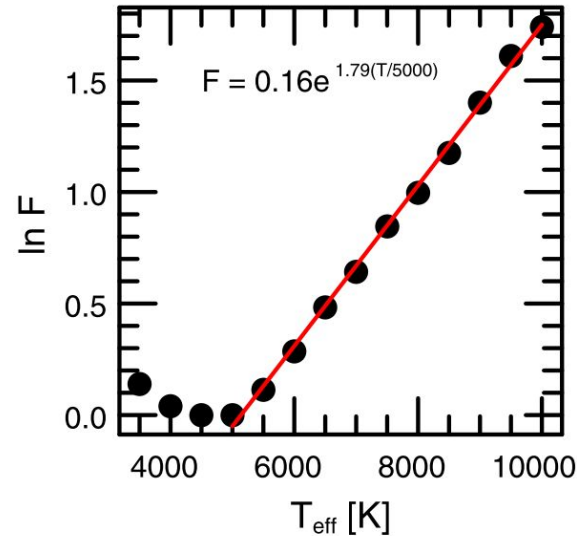
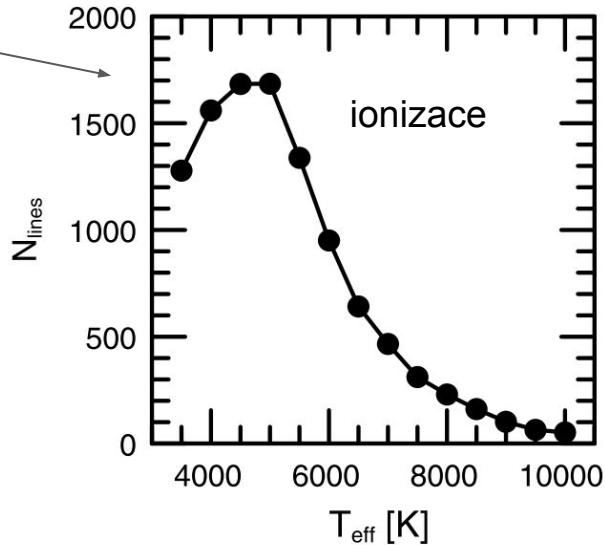


Vlastnosti objektu

- Projekce rotační rychlosti
- Síla spektrálních čar
- Počet spektrálních čar

4000–7500 Å

Blending,
Špatně definované
kontinuum

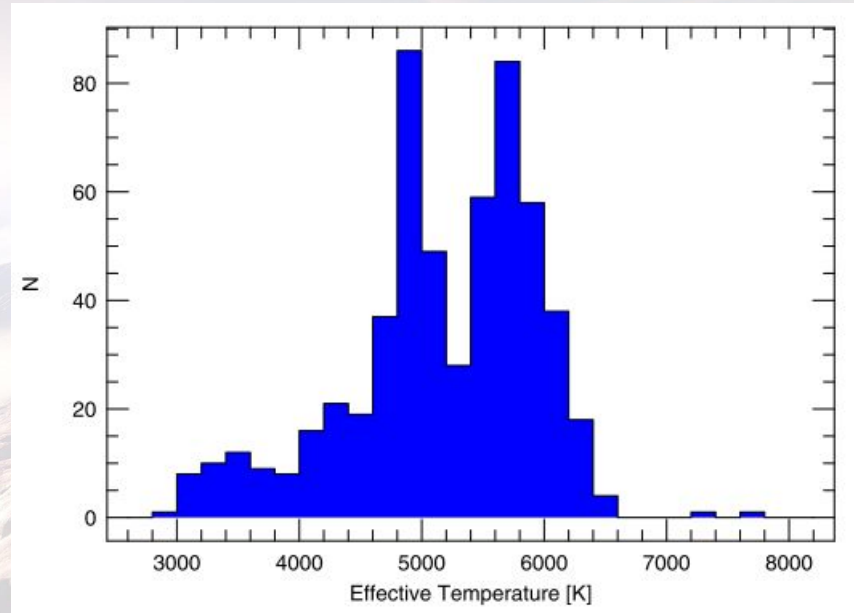
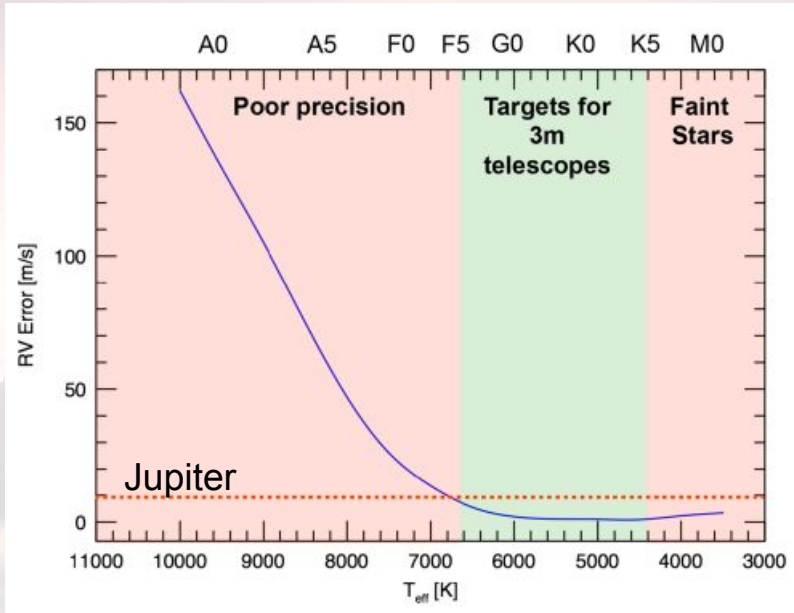


Přesnost určení
radiální rychlosti
hvězdy s $T=8000$ K
Bude $\sim 2.8x$ menší
než pro hvězdu s
 $T=5000$ K

Vlastnosti objektu

- Projekce rotační rychlosti
- Síla spektrálních čar
- Počet spektrálních čar

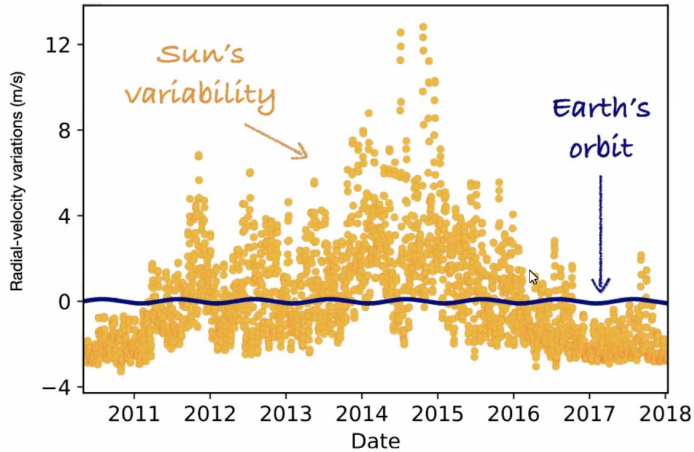
$\frac{2}{3}$ všech planet objevených u hvězd s T mezi 4500 a 6500 K



Vlastnosti objektu

- Pohyby atmosféry hvězdy (pulzace, granulace)

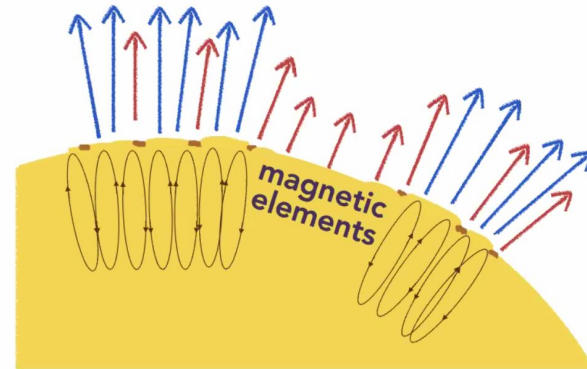
Estimating solar RV variations from spatially resolved images:



Haywood et al. (in review at ApJ, arXiv:2005.13386)

We identified the dominant process responsible for solar RV variability:

Magnetic elements suppress convective blueshift.



Haywood et al. (2016)
Meunier et al. (2010a,b)
Dumusque et al. (2014)

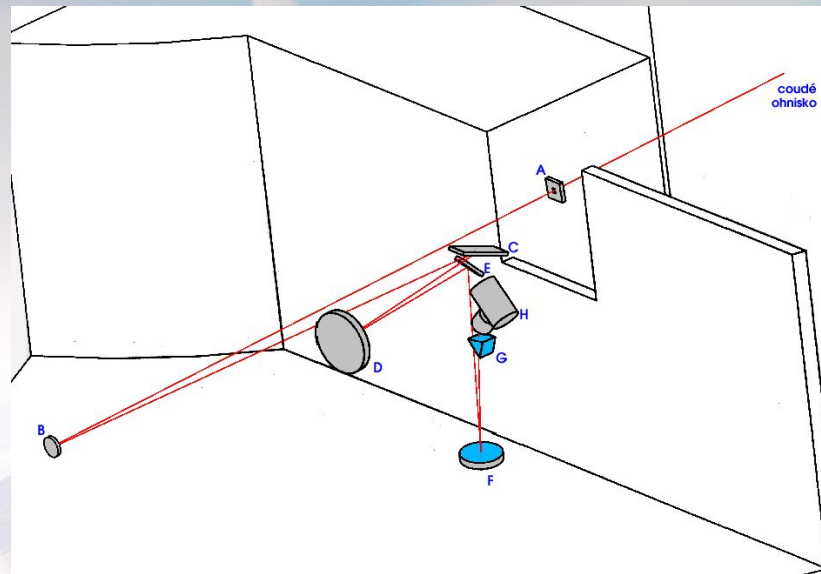
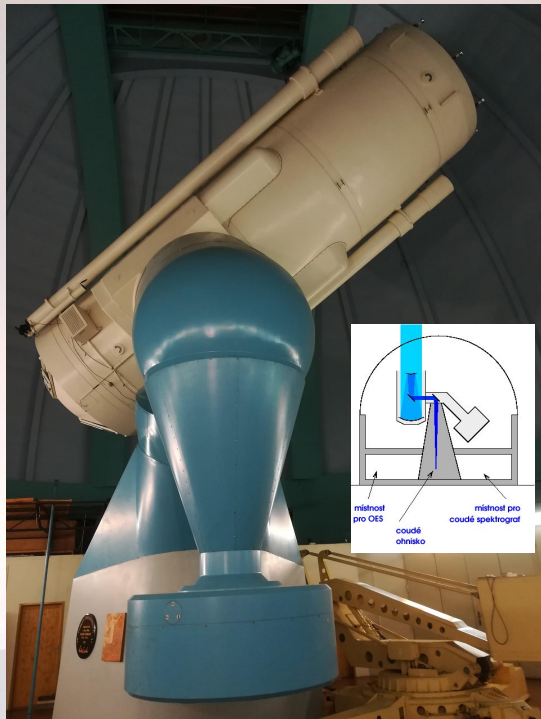
Obecný vzorec pro chybu RV

Zohledňuje vlastnosti přístroje, kvalitu spektra, vlastnosti pozorované hvězdy

$$\sigma \text{ [m/s]} \propto \Delta\lambda^{-1/2}(S/N)^{-1}R^{-1.2}f(V)(0.16e^{1.79(T/5000)})$$

$$f(V) \propto 0.62 + (0.21 \log R - 0.86)V + (0.00260 \log R - 0.0103)V^2$$

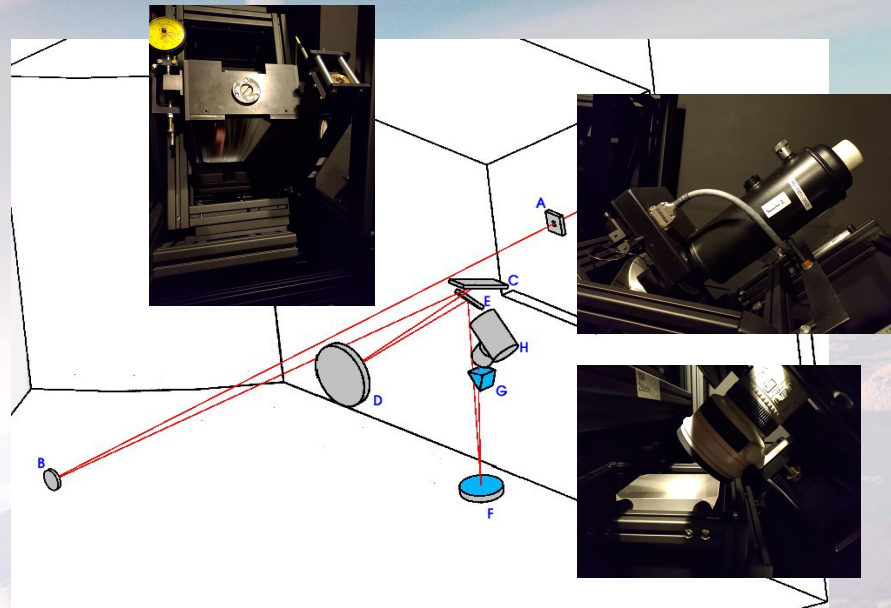
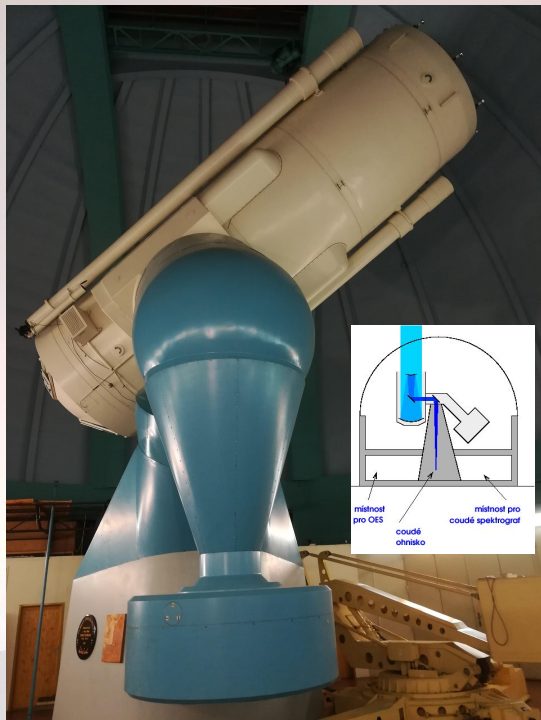
Onřejov Echelle Spectrograph - OES



- A - stěrbina 0.6 mm
- B, F - kolimátory
- C - mřížka (420×165 mm, 54.5 mm^{-1} , $\Theta_B = 69^\circ$)
- D - parabolické zrcadlo
- E - rovinné zrcadlo
- G - Cross dispersor (hranol)
- H - objektiv (CANON EF 200 f1.8)+ detektor (CCD EEV 2048)

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

Onřejov Echelle Spectrograph - OES

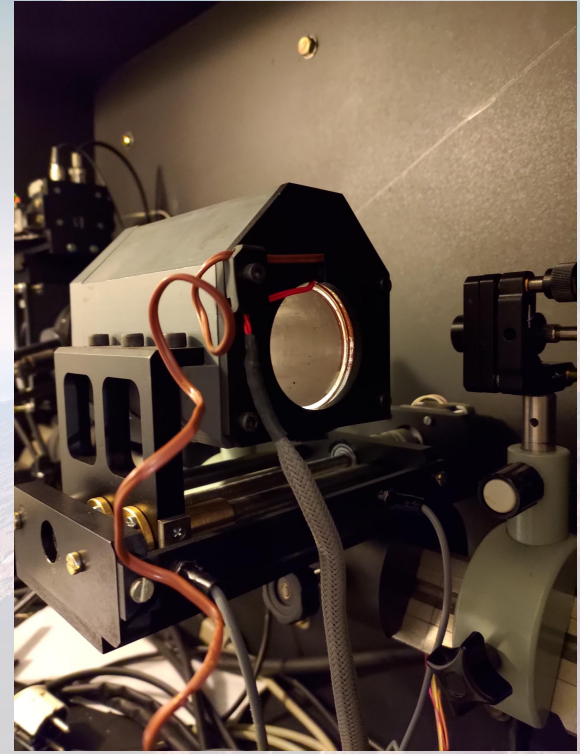
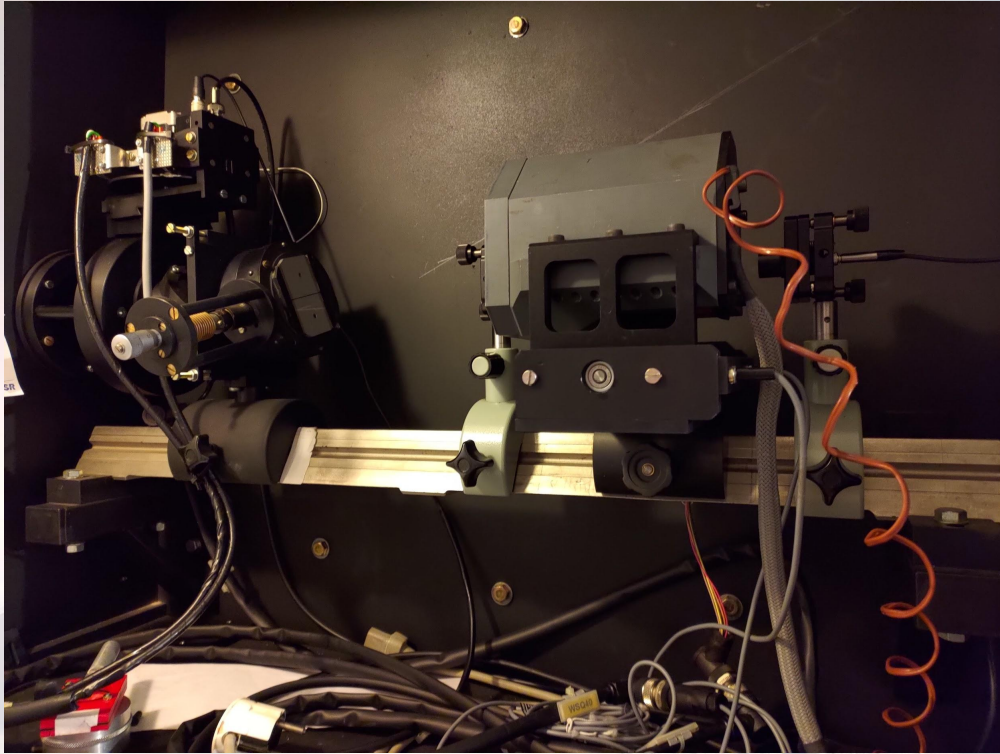


- chlazen dusíkem
- stabilní ± 0.5 K
- 50.-91. Řád (3870-7134 Å)
- na 12.3 mag, 3600 s,
S/N~10-40
- R~44000-77000

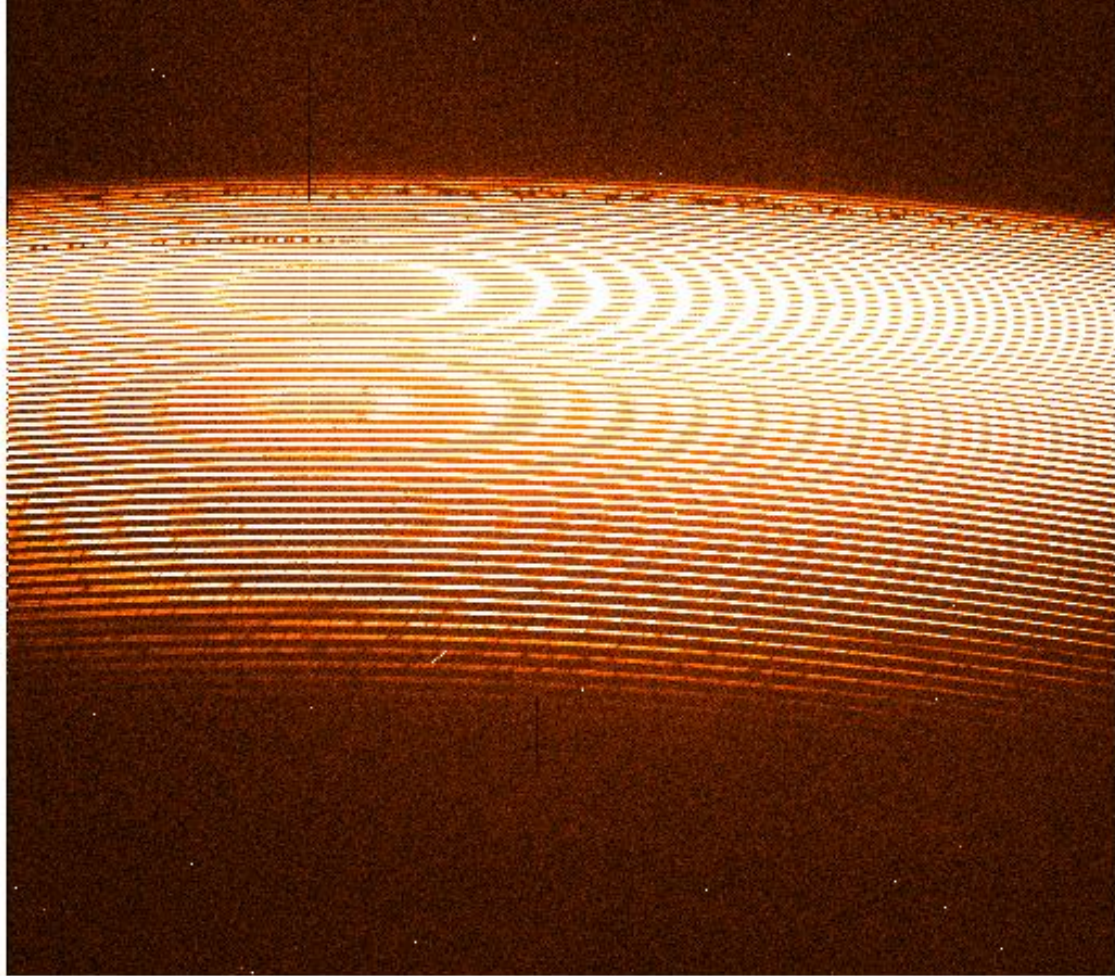
- A - stěrbina 0.6 mm
- B, F - kolimátory
- C - mřížka (420×165 mm, 54.5 mm^{-1} , $\Theta_B = 69^\circ$)
- D - parabolické zrcadlo
- E - rovinné zrcadlo
- G - Cross dispersor (hranol)
- H - objektiv (CANON EF 200 f1.8)+ detektor (CCD EEV 2048)

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

Onřejov Echelle Spectrograph - OES



Jódová baňka



115

124

134

143

152

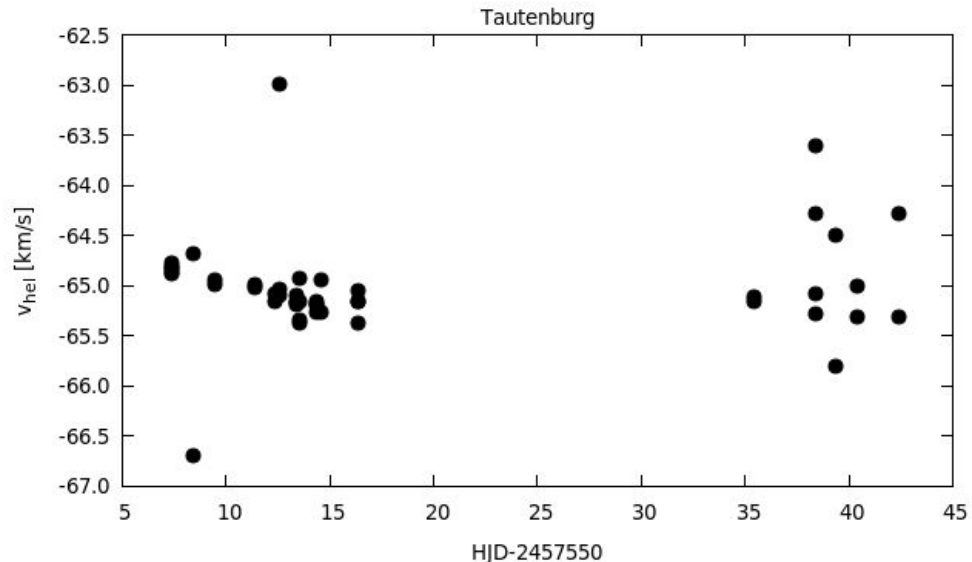
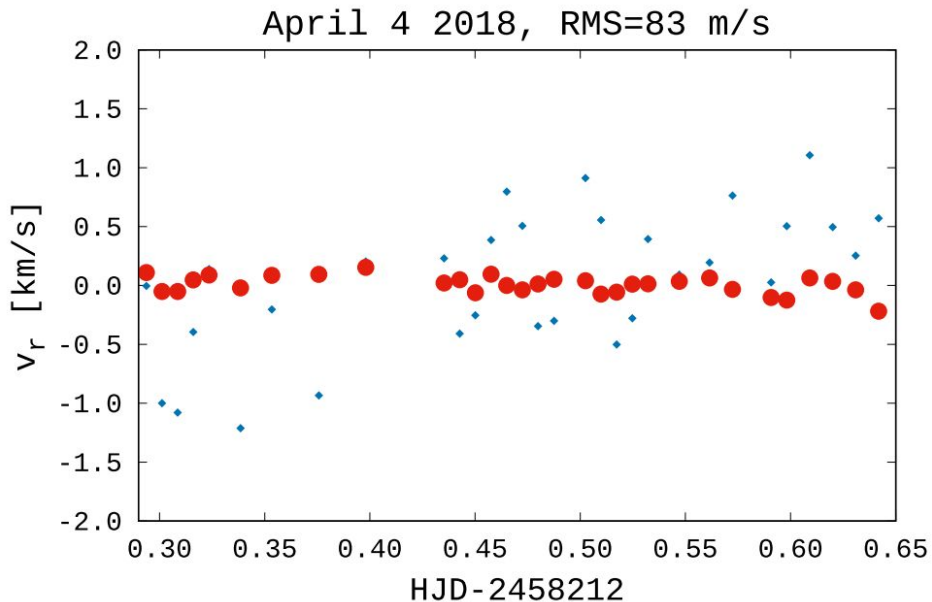
161

171

180

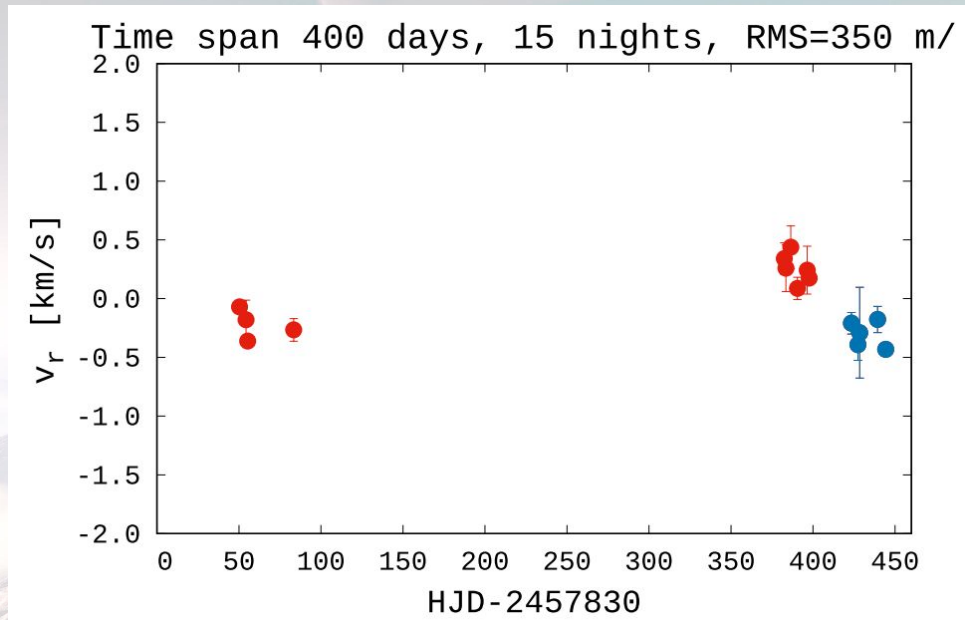
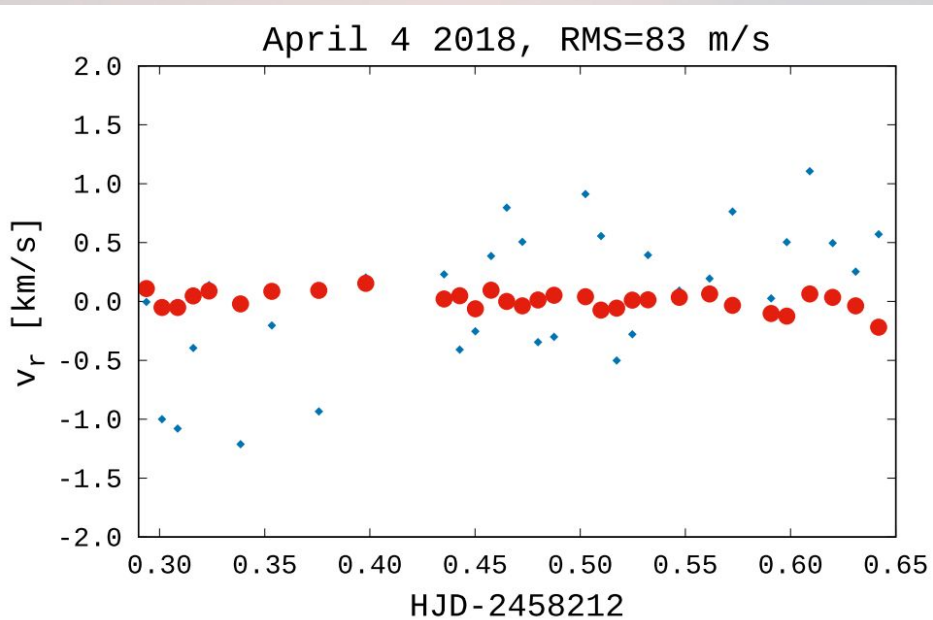
189

Onřejov Echelle Spectrograph - OES



U jasných hvězd stabilita cca 100 m/s během noci, dlouhodobě cca 400 m/s

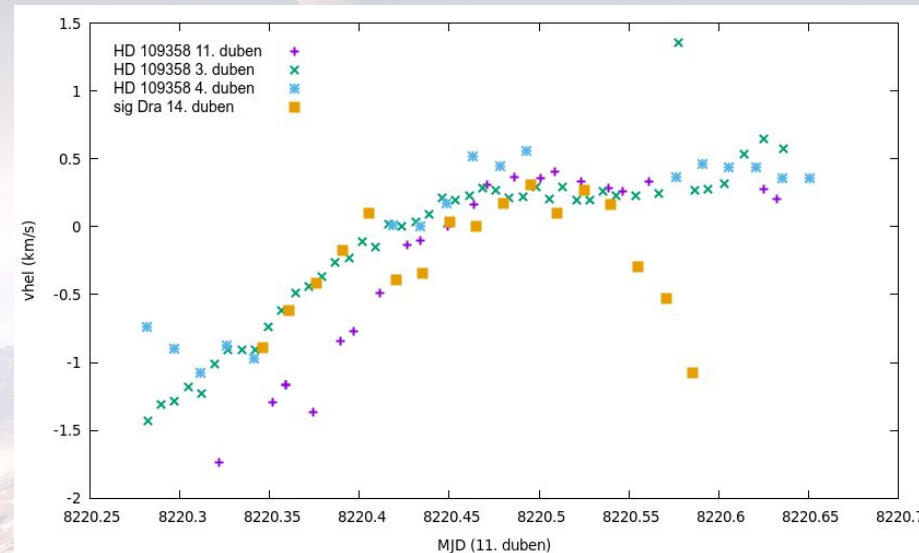
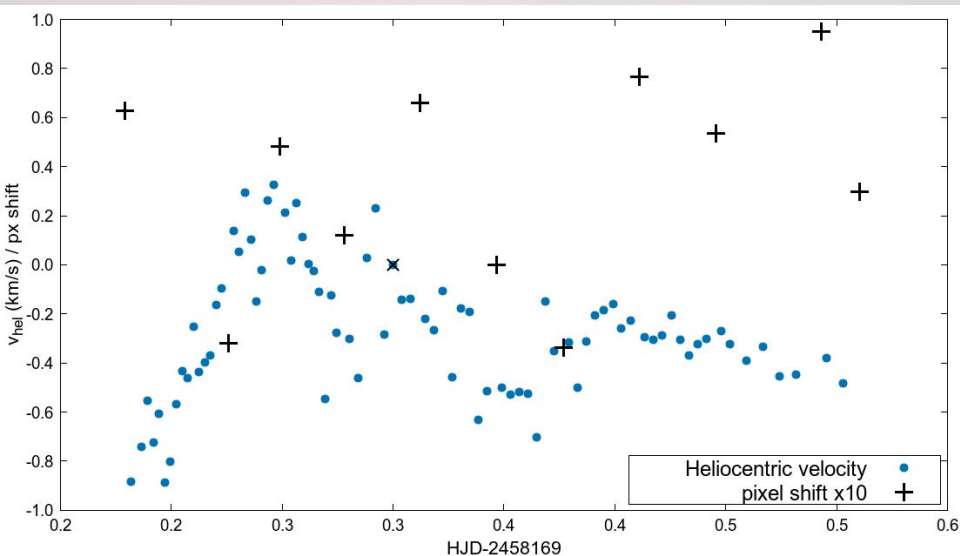
Onřejov Echelle Spectrograph - OES



U jasných hvězd stabilita cca 100 m/s během noci, dlouhodobě cca 400 m/s

Onřejov Echelle Spectrograph - OES

- Vyladit postupy pro konkrétní přístroj
- Zkušenosti se zpracováním



U OES nekoreluje posuv kalibračních spekter s výslednými rychlostmi

U OES vznikaly trendy

=> nutnost identifikovat problém a nalézt správný postup

Onřejov Echelle Spectrograph - OES

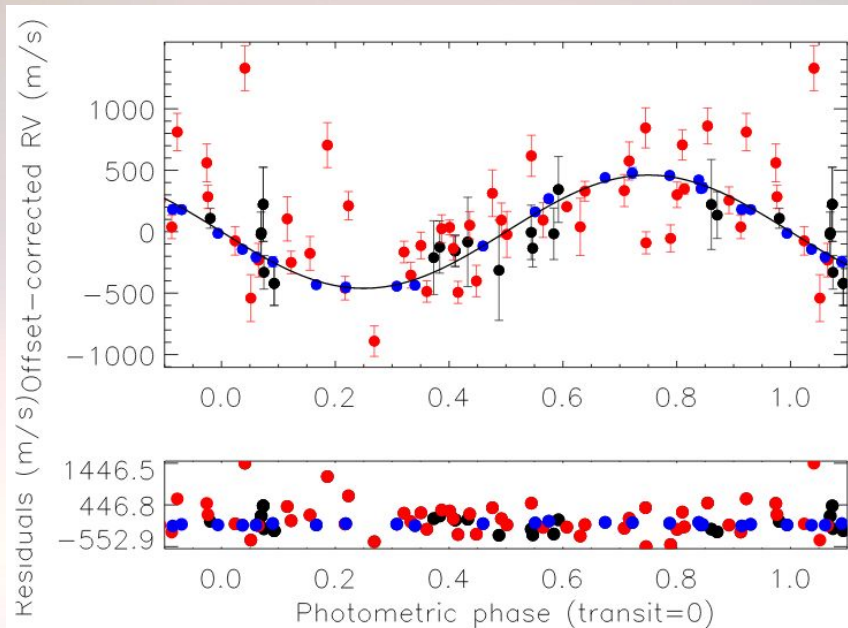


Figure 8. Upper panel: radial velocity measurements of TOI-1516 phase-folded. Black dots are Tull-measurements and their size are increased to show that their small error bars dominate the fit – their error bars are smaller than the size of the symbol; red dots are the Ondřejov-measurements while blue ones represent data points obtained at TCES. The black solid line shows the circular fit. Lower panel: residuals of the radial velocity fit (in m/s).

