

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Diplomová práce

Radek Ševčík

Spektroskopické studium dvojhvězdy V436 Per

Brno 2010

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně za použití uvedené literatury a podle metodických pokynů vedoucího a konzultanta práce.

Radek Ševčík

Chtěl bych poděkovat RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D. za vedení práce, užitečné rady, vstřícný přístup, čas a ochotu, doc. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D. za pomoc v problematice rozplétání spekter a v neposlední řadě také slečně Bc. Petře Audové, bez jejíž jazykové korektury, motivace a psychické podpory bych to asi nezvládl.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá studiem spektrálních čar binárního hvězdného systému V436 Per. Výstupem analytické části práce je analýza spektra zaměřená na čáry vodíku a helia. Na základě nově získaných spektroskopických měření byly ověřeny již dříve získané poznatky o vlastnostech studované dvojhvězdy. K analýze získaných spekter používám již ověřené a dříve použité programy jako Prekor6, SPEFO a KOREL. Porovnání rozpletených spekter se syntetickými vychází dobře a vzniklé odchylky jsou patrně způsobeny vysokým šumem nově naměřených spekter.

Klíčová slova:

dvojhvězda, spektroskopie, V436 Per, SPEFO, KOREL, syntetická spektra

Abstract

My diploma thesis deals with the study of spectral lines of the binary star system V436 Per. The output of the analytical part of my thesis is the spectral analysis focused on hydrogen and helium lines. Following the newly obtained spectroscopic measurement, the previously gained knowledge regarding the properties of the studied binary star was verified. For the analysis of gained spectra I use previously verified and used programmes, such as Prekor6, SPEFO and KOREL. The results gained by comparing disentangled and synthetic spectra are good and the incurred deviations are probably caused by high noises of newly measured spectra.

Key words:

binary star, spectroscopy, V436 Per, SPEFO, KOREL, synthetic spectra

Obsah:

1. Úvod	11
2. Základní pojmy spektrální analýzy	12
3. Spektrum vodíku	15
4. Spektrum helia.....	17
5. Princip činnosti spektrografu	19
6. Ešeleť (echellet)	20
7. Kosmiky (cosmics).....	22
8. Observatoře	24
9. Nová spektra.....	27
10. Použitý software	28
10.1. Prekor6	28
10.2. SPEFO	28
10.3. KOREL a VO-KOREL	28
10.4. GNUPlot.....	29
10.5. SpecView	30
11. Hvězdný systém V436 Persei.....	31
12. Zpracování hvězdných spekter	33
12.1. Prekor6	34
12.2. Přejmenování a SPEFO	35
12.3. Telurické čáry.....	36
12.4. Výpočet korekce radiálních rychlostí.....	39
12.5. Generování ASCII souborů	40
13. Rozplétání spekter pomocí programu KOREL	42
13.1. Spektrální čára $H\alpha$	42
13.2. Spektrální čára He I.....	47
14. Porovnání se syntetickým spektrem	49
14.1. Čára $H\alpha$	49
14.2. Čára He I	50
15. Určení radiální rychlosti.....	52
15.1. Určení radiálních rychlostí z čar $H\alpha$ a He I	53
15.2. Určení radiální rychlosti z čar sodíku.....	54
16. Závěr.....	57
Reference.....	59

1. Úvod

Na začátku byl volně v prostoru rozptýlený oblak sestavený z několika málo protonů, neutronů a elektronů, poskládaných tak, že tvořily rovnovážný stav – atomy vodíku. Pak se stalo něco, co tuto rovnováhu narušilo. Co to bylo, se nedozvíme, ale oblak přestal být v rovnováze, vytvořila se místa, kde začala narůstat hustota, a oblak se začal vlivem gravitace smršťovat až dosáhl úrovně, kdy v něm započaly termojaderné reakce a z vodíku postupně vznikaly těžší a těžší prvky. Během vývoje hvězdy se část hmoty dostala do volného prostoru a vlivem různých sil vytvořila planety nebo byla slunečním větrem odváta dále do vesmíru. Na jedné z těchto planet časem vznikl život a živočichové, kteří začali používat rozum, vytvořili civilizaci. Vlastně vytvořili postupem času několik civilizací, které vznikaly a zanikaly. A v jedné z těchto mnoha civilizací je zvykem psát diplomové práce.

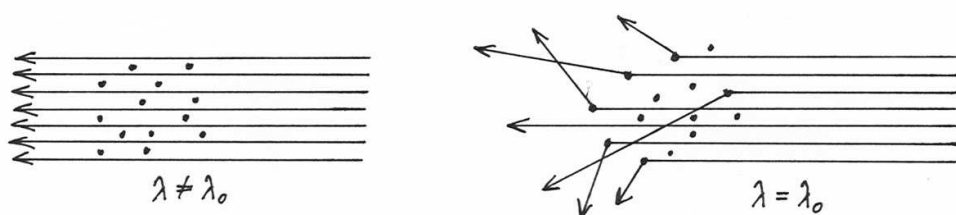
Čím nás hvězdy tolik přitahují a proč? Možná je to právě fakt, že počítač, na kterém právě píše tento úvod, papír, na kterém bude tato práce vytištěna, já samotný i všichni lidé, které znám, to vše je produktem reakcí ve hvězdách, resp. s největší pravděpodobností právě v té jedné – v našem Slunci. A možná, že právě tato skutečnost některé z nás tolik fascinuje a nutí zabývat se problémy a otázkami, které se těm ostatním zdají být naprosto nesmyslné a zbytečné. Proč jsou hvězdy takové jaké jsou? Co se v nich děje? A celá řada otázek, která ty zvědavější napadá, když se v noci podívají na oblohu plnou hvězd.

Ve své práci jsem se zabýval zpracováním starších (Ondřejov, Dominion Astrophysical Observatory, Tautenburg), ale i novějších spektroskopických měření pořízených na spektrografu 2m dalekohledu Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově s cílem objasnit rozdíl mezi teoreticky spočteným a rozpleteným (disentanglovaným) spektrem sekundární složky. Kromě starších spektroskopických měření byla zpracována i nová pozorování z Ondřejova a také nejnovější pozorování z observatoře UMK v Piwnici nedaleko Toruně ze začátku března letošního roku.

2. Základní pojmy spektrální analýzy

Základní metodou astrofyziky v posledních sto letech byla spektrální analýza světla hvězd. Hvězdná spektra mají společné rysy se spektry žhavých plynů. Od dlouhovlnného ke krátkovlnnému konci se prostírá spojité spektrum tepelného původu zvané kontinuum. V něm jsou tmavší místa menší intenzity tzv. absorpční čáry a někdy i místa s větší intenzitou tzv. emisní čáry. I když se mluví o spektrální „čáře“, jedná se mnohdy o oblast značně rozsáhlou, ve vlnových délkách může zaujímat interval např. 10 nm, často se složitým průběhem intenzity.

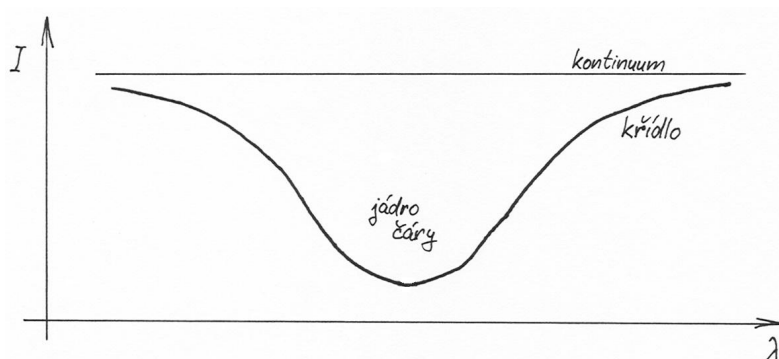
Čárové spektrum hvězdných atmosfér vzniká průchodem záření z teplého nitra stále chladnějšími vrstvami atmosféry. Proto jsou ve spektrech obvyklých hvězd patrné zejména absorpční čáry. Vznik absorpční čáry ukazuje následující obrázek:



Obrázek č. 1: Vznik absorpční čáry

Fotony záření o vlnové délce λ_0 , odpovídající rozdílu hladin E_m a E_n sledovaného druhu atomů nebo iontů v atmosféře, jsou zachycovány a potom vyzářovány do nahodilých směrů, takže záření v původním směru je oslabeno. Rozptýlené fotony již neopustí tak snadno atmosféru a mají mnohem větší pravděpodobnost pohlcení atomem s následnou deexcitací než fotony neodchýlené.

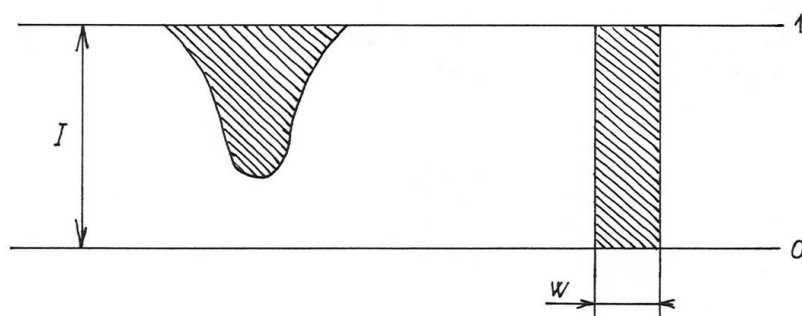
Profillem čáry rozumíme závislost monochromatické intenzity záření na vlnové délce. Třebaže profily čar bývají často komplikované, můžeme říci, že typická absorpční čára má tvar obráceného zvonu:



Obrázek č. 2: Profil absorpční čáry

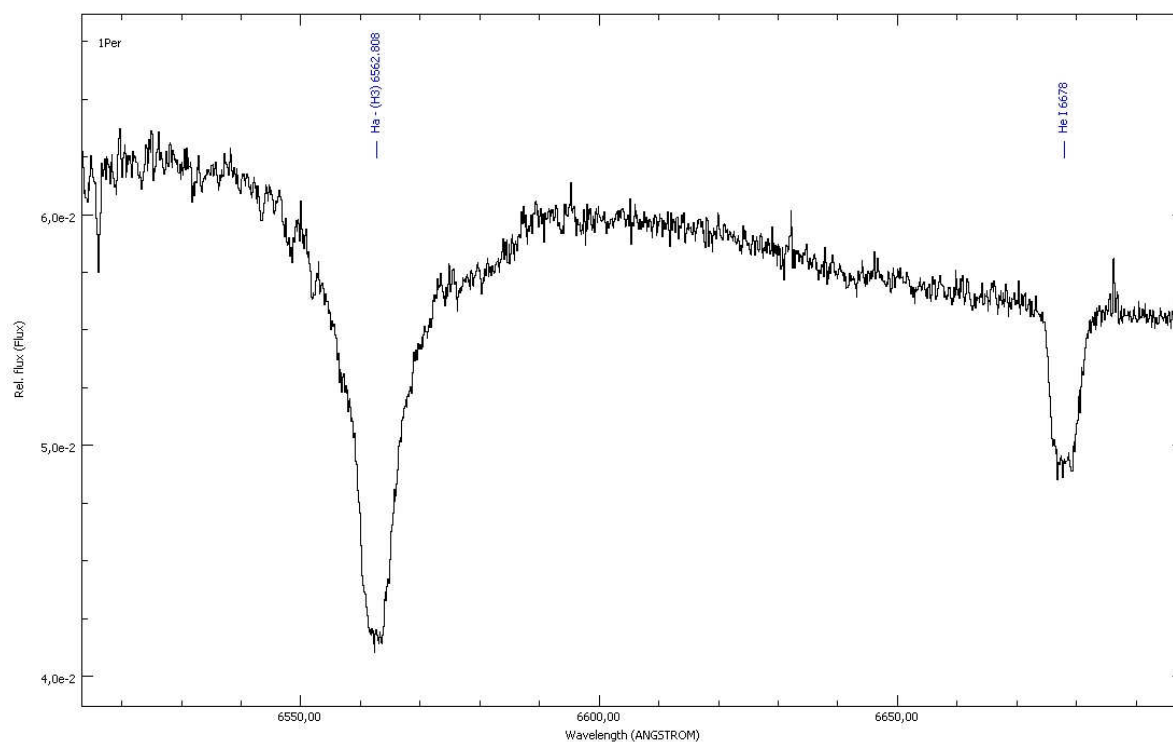
Tvar a výraznost čáry v záření vycházejícím z určitého místa hvězdné atmosféry jsou ovlivněny zejména: obsazením kvantových hladin příslušného přechodu, teplotou, tlakem, rozptylem světla na elektronech, rychlostmi jednotlivých atomů, vířivými rychlostmi proudů plynů, magnetickým polem, stupněm ionizace atp. Tyto faktory způsobují, že namísto úzké monochromatické čáry, jaká by odpovídala kvantové teorii záření, pozorujeme čáry rozšířené.

Pro práci se spektrálními čárami se zavádí pojem ekvivalentní šířka čáry. Je to vlastně šířka spektrální čáry pravoúhlého profilu, jejíž plocha je shodná s plochou čáry skutečné. Ekvivalentní šířka čáry závisí pouze na počtu absorbujících nebo emitujících částic.



Obrázek č. 3: Definice ekvivalentní šířky čáry

V reálném spektru hvězd lze najít různě tvarované spektrální čáry.

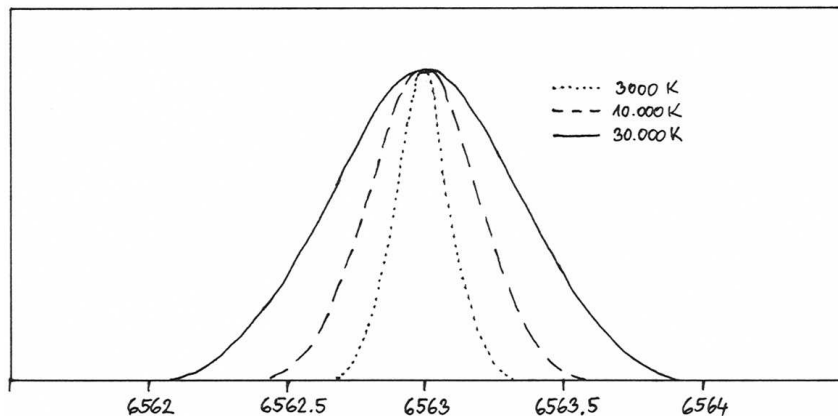


Obrázek č. 4: Část skutečného spektra hvězdy V436 Per, čára H α a He I

Na tvar a intenzitu spektrální čáry má vliv celá řada faktorů. Například jestliže hvězda rychle rotuje, projeví se vstříčný pohyb atomů na vycházející polovině jejího disku a zpětný pohyb atomů na druhé polovině také dopplerovským rozšířením, které je ovšem stejné pro všechny čáry ve spektru. Rovněž uspořádané pohyby plynných obálek hvězdy, např. výbuch novy, čáry posunují nebo rozšiřují.

V atomu, který je umístěn v magnetickém poli, se každá hladina energie rozštěpí na více blízkých hladin. Ve spektru se pak objeví místo jedné čáry složky dvě nebo tři. U běžných hvězdných spekter se složky slévají v jednu rozšířenou čáru, jejíž šířka roste s rostoucí indukcí povrchového magnetického pole na hvězdě. Tento Zeemanův jev je typický pouze pro některé ionty a dovoluje měřit magnetická pole hvězd. Je významný u některých hvězd s povrchovou teplotou 10 000 K.

Kromě rotace a magnetického pole má vliv na rozšíření spektrální čáry také teplota povrchu hvězdy. Na následujícím obrázku je zřetelně vidět vliv teploty na rozšíření čáry H α :



Obrázek č. 5: Vliv teploty na rozšíření čáry H α

V polovině 19. století Kirchhoff a Bunsen položili základy spektrální analýzy objevem dvou zákonů:

1. Jednotlivé prvky v plynném stavu mají spektrum složené z čar, jejichž počet a vlnové délky jsou za všech podmínek vždy stejné.
2. Spektrální čáry plynu umístěného mezi zdrojem spojitého záření a pozorovatelem se jeví jako absorpční, jestliže má plyn nižší teplotu než zdroj, nebo jako emisní, má-li plyn teplotu vyšší než zdroj.

Porovnání hvězdných spekter s laboratorními spektry známých plynů ukázalo, že hvězdy jsou složeny z týchž prvků jako Země. Navíc studium laboratorních spekter za různých teplot umožnilo první odhady teplot povrchů hvězd.

3. Spektrum vodíku

Nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru je vodík a jeho emisní nebo absorpční čáry se často objevují ve spektrogramech nejrůznějších kosmických objektů, nejčastěji však hvězd a mlhovin. Druhý prvek v pořadí, helium, se vyskytuje mnohem méně.

Je tedy užitečné alespoň stručně se seznámit s hlavními charakteristickými vlastnostmi spekter těchto prvků. Nejdůležitější jsou přechody, kdy alespoň jedna z hladin odpovídá hlavnímu kvantovému číslu $n = 1, 2, 3$ popř. 4. Přechody mezi jednotlivými hladinami $n_a \leftarrow n_b \dots$ vytvářejí jednotlivé série.

Lymanova série se vztahuje k přechodu $n_a = 1$ a nejdůležitější emisní či absorpční čáry jsou

n_b	λ (nm)	označení
2	121,57	Lyman α
3	102,58	Lyman β
4	97,25	Lyman γ
∞	91,2	hrana série
---	spojité spektrum	

Tabulka č. 1: Lymanova série

Lymanova série není pozorovatelná z povrchu Země, protože záření těchto vlnových délek je absorbováno atmosférou. Je však důležitá v celé řadě astrofyzikálních mechanismů.

Balmerova série je vizuálně pozorovatelná série čar a částečně i spojitého spektra vodíku

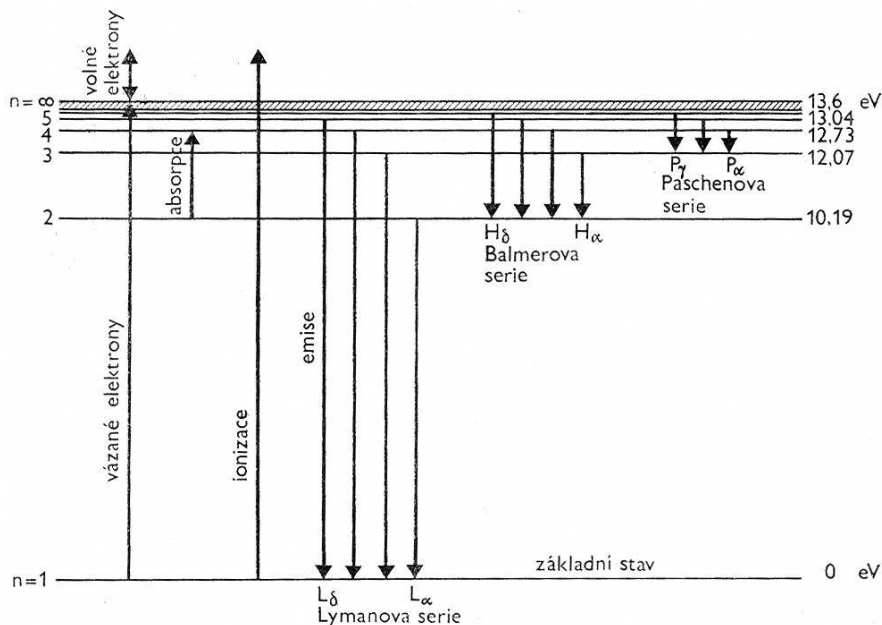
n_b	λ (nm)	označení
3	656,282	H α
4	486,133	H β
5	434,047	H γ
6	410,174	H δ
7	397,007	H ϵ
8	388,905	H ζ
9	383,539	H η
10	379,790	H $_{10}$
11	377,063	H $_{11}$
12	375,015	H $_{12}$
13	373,437	H $_{13}$
∞	364,598	hrana série
---	spojité spektrum	

Tabulka č. 2: Balmerova série

Balmerova série čar má velmi podstatnou úlohu při klasifikaci hvězdných spekter.

Další série, tj. Paschenova a Bracketova, se nacházejí v infračervené oblasti a nejsou pro nás nyní důležité.

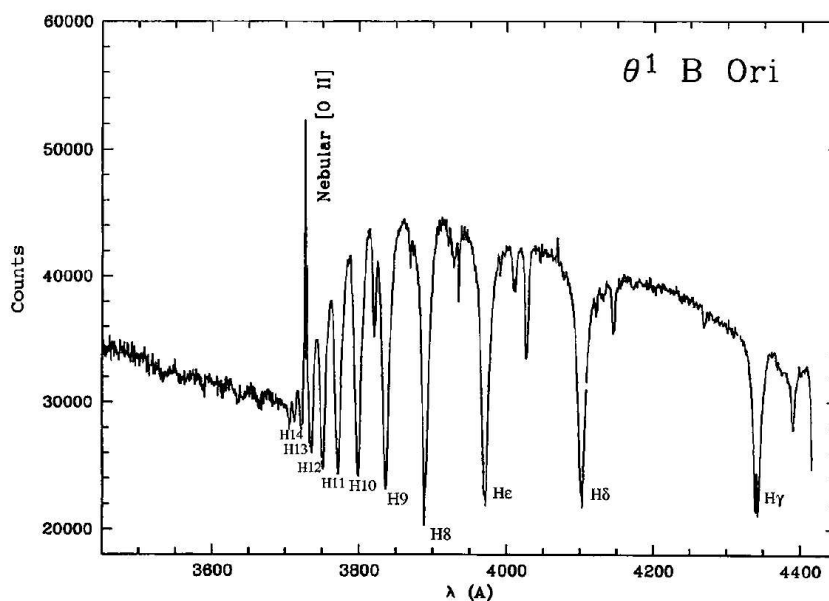
Těžký vodík - deuterium - má shodné spektrum, avšak neutron navíc v jádru zvyšuje jeho hmotnost a frekvence přechodů jsou poněkud vyšší. Ve viditelném oboru spektra jsou čáry posunuty zhruba o 0,15 nm ke kratším vlnovým délkám.



Obrázek č. 6: Schematické znázornění energetických hladin [3]

V této práci se zaměříme pouze na jednu čáru ze spektra atomu vodíku a to konkrétně na $H\alpha$, a také na jednu čáru ze spektra helia.

Na dalším obrázku zřetelně vidíme tzv. Balmerův skok spojitého spektra, který vzniká směrem ke kratším vlnovým délkám. V důsledku vázaně-volných přechodů elektronů z druhé hladiny se zvýší absorpční koeficient vodíkové atmosféry za hranou Balmerovy série, a proto se v této oblasti intenzita skokem sníží.



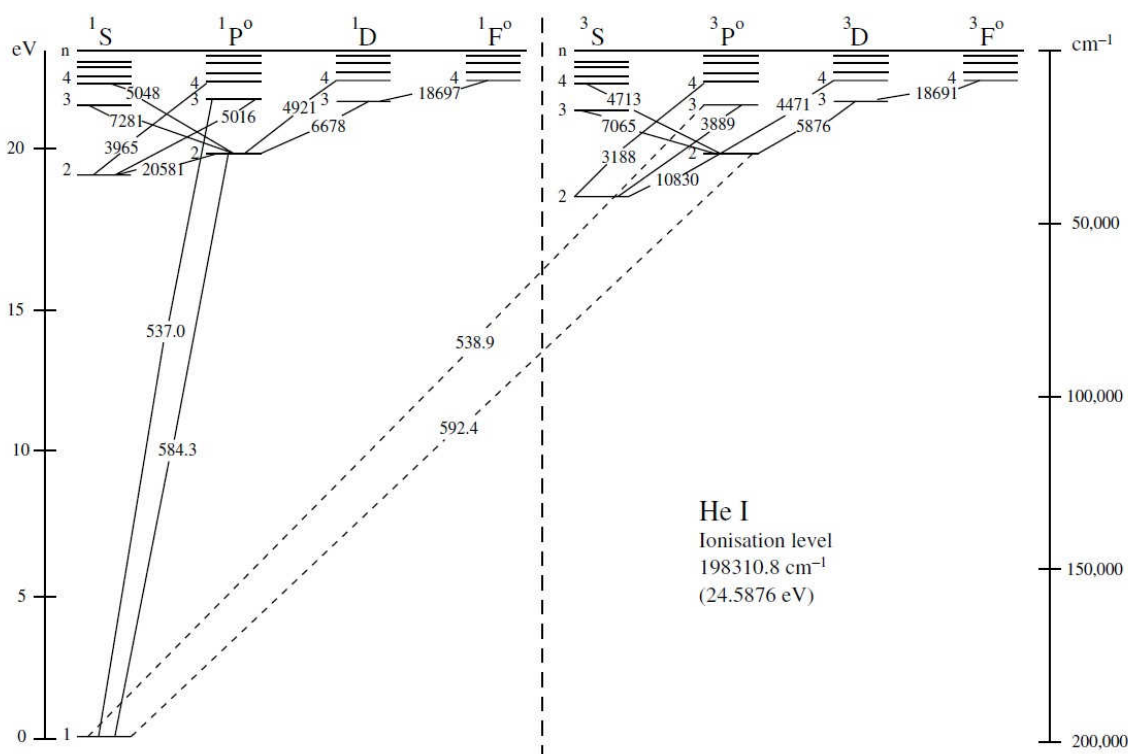
Obrázek č. 7: Spektrum hvězdy typu B s jasně viditelnými čarami Balmerovi série [5]

4. Spektrum helia

Helium je druhý nejčastější prvek hned po vodíku a je obsažen v 25% veškeré atomární hmoty ve vesmíru. Vyskytuje se ve třech formách, jako atomární He I, jako jednou ionizovaný He II a jako dvakrát ionizovaný He III. Samozřejmě, že He III je vlastně pouze jádro He^{2+} , které se označuje jako α částice a nemá žádné spektrum. Ion He^+ je jednoelektronový systém, který má podobné spektrum jako vodík pouze s tím rozdílem, že vzhledem k hodnotě $Z = 2$ jsou první dvě série posunuty daleko do ultrafialové části spektra.

Relativní síla absorpce He I a He II je například použita v klasifikaci hvězd spektrální třídy O, dále můžeme pozorovat emisní čáry He II v mlhovinách. Tyto emisní čáry lze ovšem pozorovat pouze v oblasti kolem centrální hvězdy, kde je dostatek vysokoenergetických fotonů schopných ionizovat He^+ . He^+ potřebuje k ionizaci energii 54,4 eV v porovnání s energií 13,6 eV, která je potřeba k ionizaci vodíku. Spektrum He I vzniká také v poměrně malé oblasti jako He II, protože potřebuje energii 24,6 eV.

Silné čáry He I jsou pozorovatelné v mlhovinách a zahrnují čáry: 447,1 nm, 587,5 nm a 667,8 nm. Na následujícím obrázku můžeme vidět přehled energetických hladin a přechodů neutrálního atomu He I.

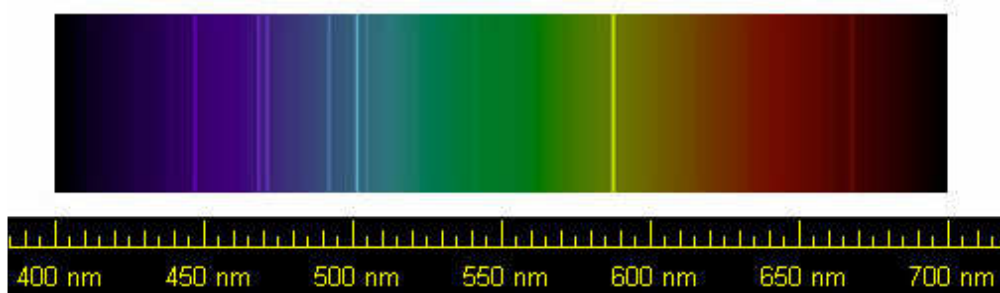


Obrázek č. 8: Energetické hladiny a přechody atomu He [5]

Na tomto obrázku vidíme schéma energetických hladin a povolených přechodů pro helium. Je nutné oddělit stavy s $S = 0$ (parahelium) a stavy s $S = 1$ (ortohelium). Vzhledem k výběrovému pravidlu pro S nejsou mezi nimi povolené přechody. Coulombovské síly mezi elektrony jsou v obou případech stejné, rozdíly v energiích jsou tedy dány odlišnými interakcemi mezi stavy s paralelními spiny: $\uparrow\uparrow$ nebo $\downarrow\downarrow$ a spiny antiparalelními $\uparrow\downarrow$. Interakce spinových magnetických momentů jsou přitom slabší než rozdíly energií.

Neutrální helium má mnohem složitější spektrum než He II. Jsou zde série čar s triplety (tři čáry blízko sebe) a singlety (jednoduché čáry). Mezi nejdůležitější patří čára 587,6 nm, která byla nalezena jako emisní v chromosféře Slunce v roce 1868, tj. mnohem dříve než bylo helium izolováno jako plyn na Zemi (v roce 1895). Název prvku souvisí s objevem jeho čar na Slunci.

Na následujícím obrázku vidíme emisní spektrum čistého helia. Je zde jasně patrná výrazná žlutá čára 587,5 nm a dále jasné čáry 501,5 nm, 447,1 nm.



Obrázek č. 9: Emisní spektrum Helia [E7].

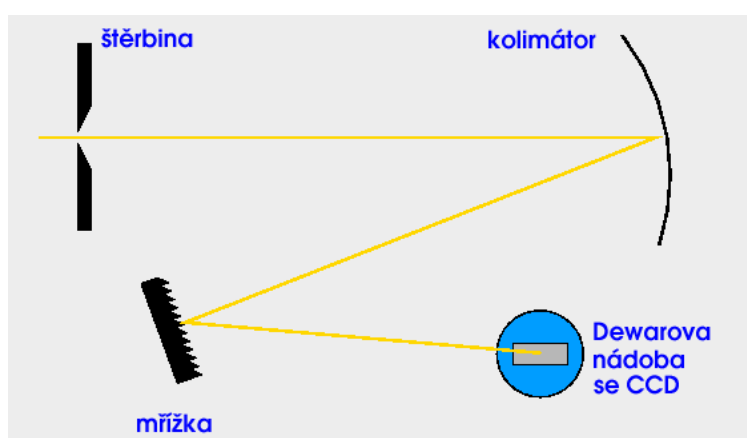
5. Princip činnosti spektrografu

Spektrograf funguje na zcela jednoduchém principu, kdy se paprsek světla rozloží do spektra na hranolu nebo mřížce, či jiném optickém členu, toto spektrum se následně promítne na záznamové médium. Jako toto médium je v dnešní době výhradně používán CCD čip. Dále bývá součástí spektrografů i štěrbinu a kolimátor.

Štěrbina se umísťuje do ohniska dalekohledu před vlastní spektrograf a to z toho důvodu, aby byl obraz co nejostřejší. Problémem je, že pokud je štěrbinu příliš úzká, ztrácí se velké množství světla a tím i účinnost přístroje, nicméně při širší štěrbině se snižuje rozlišovací schopnost přístroje. Je tedy nutno najít určitý kompromis.

Kolimátor má za úkol z rozbíhavého svazku vytvořit rovnoběžný svazek a teprve tento rovnoběžný svazek má dopadat na mřížku. Kolimátor se nachází mezi štěrbinou a mřížkou.

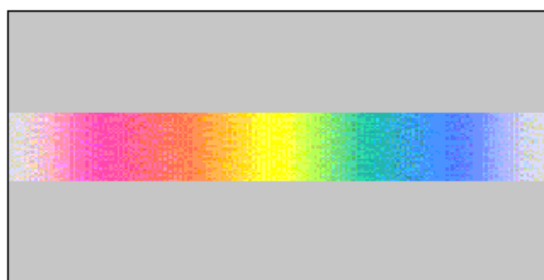
Příklad konstrukce spektrografu, podle [E4]:



Obrázek č. 10: Schéma standardního spektrografu [E4].

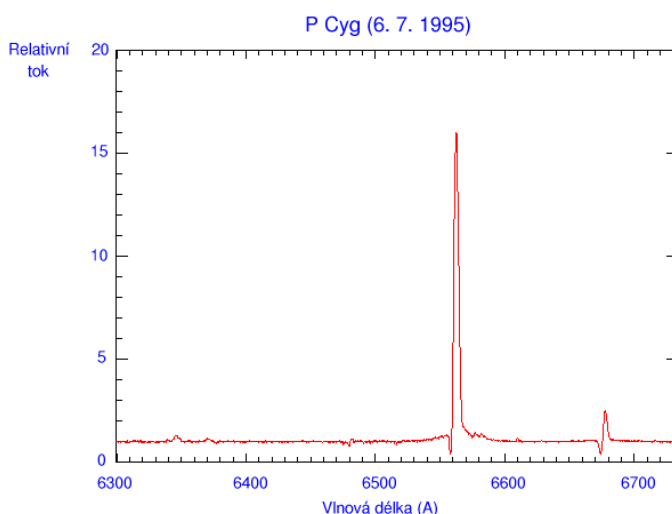
Takto se na CCD čipu zobrazuje jeden spektrální řád. Ondřejovský Coudé spektrograf může zobrazovat najednou úsek spektra v rozsahu 40 nm (můžou vznikat odchylky podle toho, ve které oblasti spektra pracujeme).

Následně se spektrum na čipu promítá takto:



Obrázek č. 11: Schematické promítnutí spektra na CCD čip [E4].

Výsledné spektrum pak po příslušném zpracování může vypadat například takto:



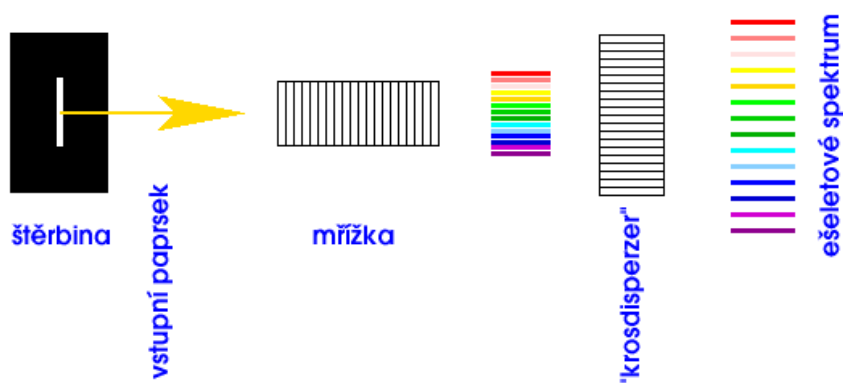
Obrázek č. 12: Spektrum proměnné hvězdy P Cygni [E4].

6. Ešlety (echellet)

Fungování ešletového spektrografu je poněkud odlišné od fungování obyčejného spektrografu. Rozdíl je především v tom, že ešletový spektrograf vykreslí najednou mnoho spektrálních řádů. Každý jeden řád obsahuje krátký úsek vlnových délek, nicméně protože se jednotlivé řády překrývají, je možné je seskládat dohromady a získat rozsáhlý úsek spektra. U tohoto spektrografu můžeme dosáhnout mnohem lepšího rozlišení než u klasického.

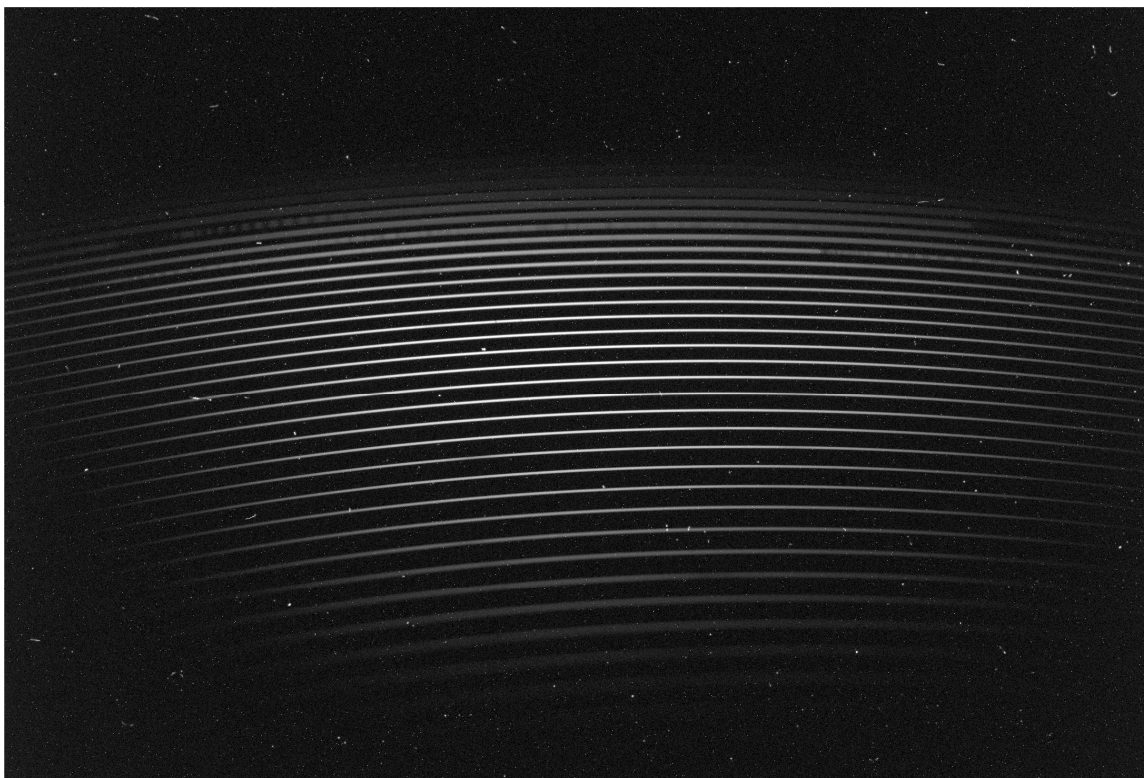
Tohoto lepšího rozlišení dosáhneme tím způsobem, že na prvním disperzním členu, kterým bývá mřížka, se vytváří obraz mnoha spektrálních řádů, které se ale vzájemně překrývají. Tento složený obraz se dále promítá na následující disperzní člen, kterým bývá buď opět mřížka nebo hranol, a ten je postaven kolmo k prvnímu členu. Druhý člen již nezasahuje do zobrazení vlnových délek, ale odděluje od sebe jednotlivé obrazy řádů a promítá je nad sebe, anglicky tzv. „crossdisperser“.

Schéma ešletového spektrografu:

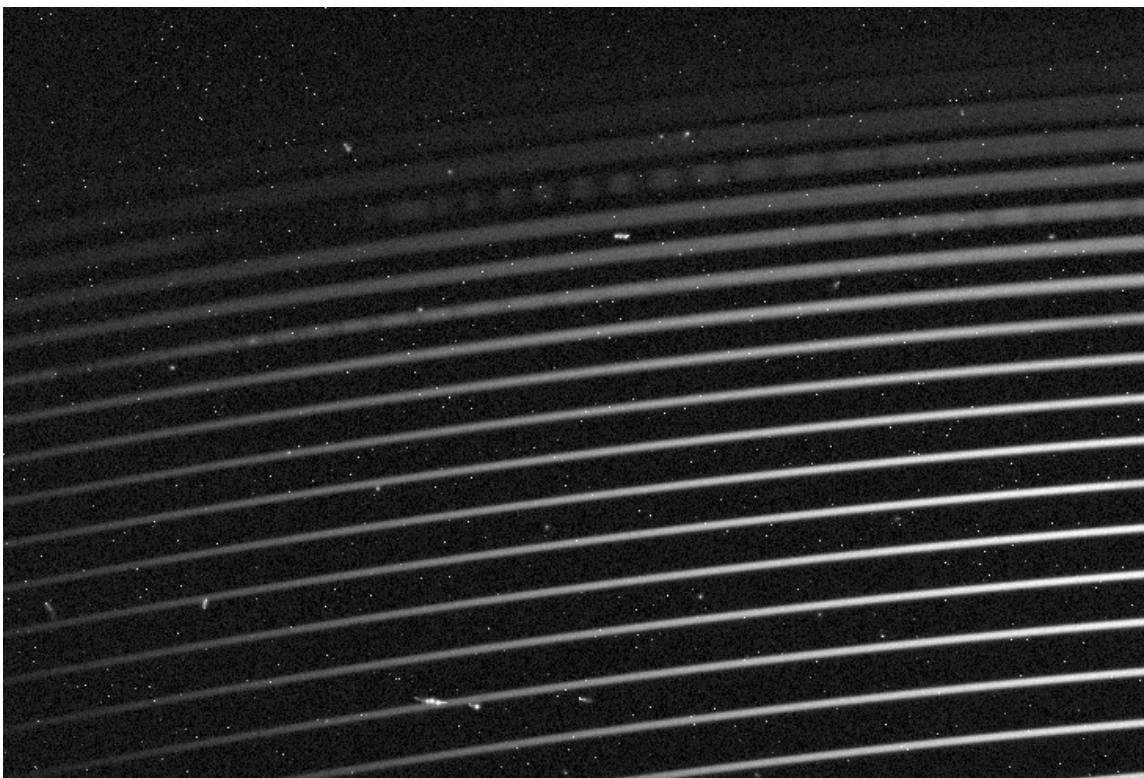


Obrázek č. 13: Schéma činnosti ešletového spektrografu [E4].

Získané spektrum potom vypadá takto:



Obrázek č. 14: Vzhled spektra získaného ešeletovým spektrografem, pozorováno 10.3.2010 v 18:46 na observatoři UMK v Piwnicích u Toruně



Obrázek č. 15: Zvětšená část předchozího spektra

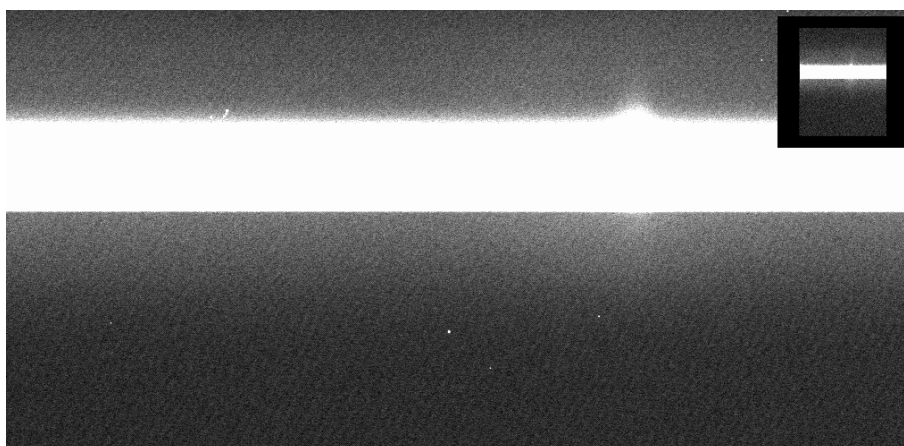
7. Kosmiky (cosmics)

Kosmiky jsou projevy vysokoenergetického záření z kosmu, které můžeme na CCD pozorovat jako světlé stopy zasahující do několika málo pixelů. Za jejich vznik může kosmické záření, které zasáhne CCD čip, nebo může vytvořit „děšt“ dceřiných fotonů v atmosféře a některý z těchto fotonů zasáhne CCD čip.

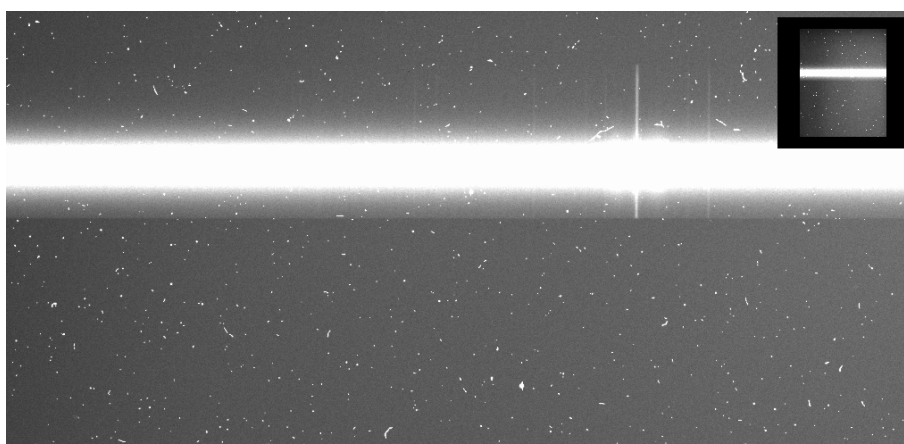
Z výše uvedené definice lze vyvodit dva závěry a to, že počet kosmiků je úměrný délce expozice a nadmořské výšce. Dále, že většina vysokohorských observatoří se v dnešní době potýkají s problémy jak dokonale odečíst kosmiky ze snímků.

Dokonce ani ondřejovský dalekohled není zbaven těchto problémů. I přesto, že se nachází v relativně nízké nadmořské výšce (526 m.n.m.) a právě kosmiky se zde již v tak velké koncentraci nenacházejí, protože je pohltí atmosféra Země, projevuje se zde radioaktivita Dewarovy nádoby, ve které je čip CCD uložen a také železné vidlice, ve kterých je uložena Dewarova nádoba.

Pro ilustraci uvádím dvě expozice hvězd, kde jsou použity dvě rozličné expoziční doby. První snímek představuje třiminutovou expozici hvězdy gamma Cas. Druhý snímek ukazuje velmi dlouhou expozici hvězdy HD206773. Světlé skvrnky na tmavé ploše jsou právě kosmiky.

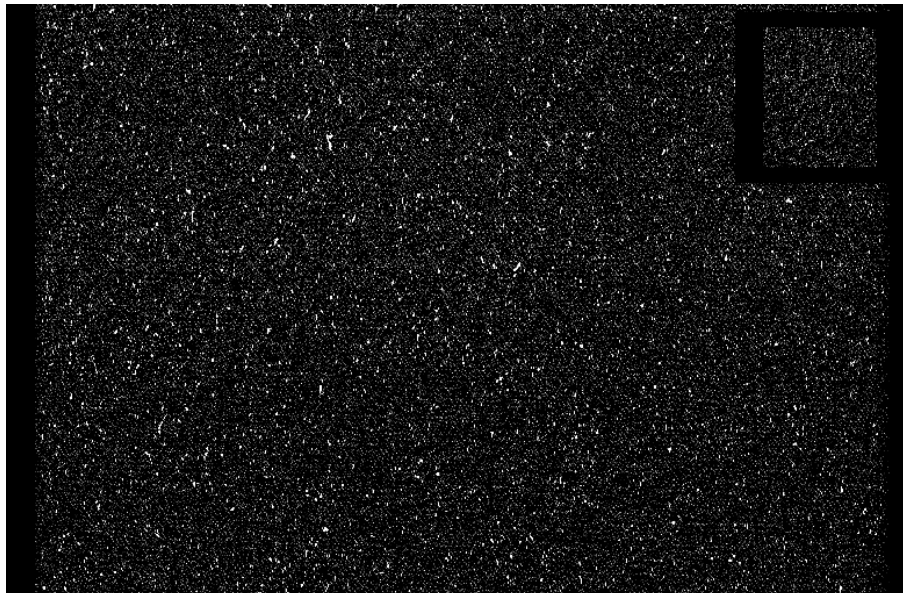


Obrázek č. 16: Gamma Cas, expozice 180 s [E5].



Obrázek č. 17: HD206773, expozice 16289 s [E5].

Velmi dobře jsou kosmiky pozorovatelné na dlouhé expozici tmy. Po dobu, kterou si předem stanovíme (na uvedeném snímku 5 hodin), se začlení náboj na CCD čipu s tím, že celý spektrograf je světelně izolovaný, aby na čip nedopadalo žádné světlo. Následně se naexponuje za prvé vlastní šum detektoru a za druhé se následně přidá tzv. čtecí šum, ale dominantní budou kosmiky, jak je vidět na níže uvedeném obrázku.



Obrázek č. 18: Tma, expozice 5 hodin [E5].

8. Observatoře

Seznam observatoří, kde byla provedena původní a nová spektroskopická měření:

a) Ondřejov, Česká republika

Poloha: $49^{\circ}54'55''\text{N } 14^{\circ}46'52''\text{E}$, 528 m

Vybavení: 2 m reflektor, coudé, 17 \AA mm^{-1} , Reticon Spektra, 6300-6700 \AA

Web: <http://www.asu.cas.cz/>



Obrázek č. 19: Observatoř AÚ AV ČR v Ondřejově

b) Dominion Astrophysical Observatory, British Columbia, Canada

Poloha: $48^{\circ}31.2'\text{N } -123^{\circ}25.0'\text{E}$, 238 m

Vybavení: 1,2 m reflektor, coudé, 10 \AA mm^{-1} , CCD 4096, 6100-6700 \AA

Web: <https://www.astrosoci.ca/DAO/>



Obrázek č. 20: Dominion Astrophysical Observatory

c) Thüringer Landessternwarte Tautenburg, Jena, Německo

Poloha: 50°58'48.4"N 11°42'40.2"E, 341 m

Vybavení: 2 m reflektor, coudé, 3,2 Å mm⁻¹, echelle spectra, 4700-7085 Å

Web: <http://www.tls-tautenburg.de/>



Obrázek č. 21: Letecký pohled na areál TLS



Obrázek č. 22: 2 m reflektor

d) Centrum Astronomii UMK, Piwnice (Toruń), Polsko

Poloha: 53°5'42.9"N 18°33'45.9"E

Vybavení: 90 cm reflektor, coudé, 14,7 Å mm⁻¹, 4300-7100 Å

Web: <http://www.astr.uni.torun.pl/>



Obrázek č. 23: Letecký pohled na areál observatoře UMK v Piwnicích u Toruně

9. Nová spektra

Díky tomu, že byla získána nová spektroskopická data, bylo možné navázat na předcházející práce [1], [2]. Dvě nová měření byla provedena na observatoři v Ondřejově a celkem 15 nových pochází z observatoře UMK v Piwnicích nedaleko Toruně v Polsku. V práci jsem rovněž použil již dříve naměřená a zpracovávaná spektra získaná ze tří různých observatoří [1]. První sada měření pochází z observatoře v Ondřejově:

List of observations of star										1 Per (HD 11241)	
RA(2000) 1 51 59.0										DA(2000) 55 8 51	
=====											
N. date & UT start	exp[s]	angle	slit	ADU	J.D.hel.	RVcorr	observ				

3560	93-12- 5 18:44:47	10000	231B 30:35	IS-RED	1598	49327.3429	-10.17	juzka			
3615	93-12-29 21: 8: 4	6791	231B 30:35	IS-RED	647	49351.4227	-17.91	HorKa			
6047	94- 9-23 21:57:39	11670	231B 30:35	IS-RED	2210	49619.4855	16.44	KouHa			
7027	94-11-15 17: 8:10	6345	231B 30:36	IS-RED	1530	49672.2551	-2.22	SkoTl			
7112	94-12- 1 16:30:18	10375	231B 30:36	IS-RED	1042	49688.2518	-8.48	SimHa			
7203	94-12- 6 18: 2:58	7422	231B 30:36	IS-RED	812	49693.2989	-10.40	KouTl			
7256	94-12- 8 17:39: 4	3138	231B 30:36	IS-RED	222	49695.2575	-11.07	HecHa			
7303	94-12-15 18:30:21	7455	231B 30:36	IS-RED	269	49702.3178	-13.55	HecKa			
7508	95- 2-12 21: 4:40	7201	231B 30:36	IS-RED	649	49761.4195	-23.09	Koutl			
7572	95- 2-18 17:37: 9	5945	231B 30:36	IS-RED	570	49767.2677	-22.71	HecHa			
9538	95-10-26 21:28:41	7126	231B 30:36	IS-RED	1798	50017.4404	5.56	SimTl			
9727	95-12-29 16: 6:20	15842	231B 30:36	IS-RED	871	50081.2656	-17.61	HecKa			
9781	96- 1-14 18: 6:24	18000	231B 30:36	IS-RED	861	50097.3604	-21.20	HadHa			
9946	96- 1-31 17:43:15	11375	231B 30:36	IS-RED	1083	50114.3047	-23.01	SkoTl			
10181	96- 3- 8 20: 9:34	3600	231B 30:36	IS-RED	100	50151.3586	-20.06	HoTl			
11620	96- 8-30 23:29:54	13426	231B 30:36	IS-RED	883	50326.5583	21.09	HadTl			
20000	03- 2-20 20:10:20				3650	52690.8405	-22.61				
20001	03- 2-21 19:26:48				5800	52691.8103	-22.51				
20002	03- 2-21 20:08:17				3650	52691.8391	-22.52				
20003	03- 2-22 19:24:30				5800	52692.8087	-22.42				

A druhá sada nových měření byla získána začátkem března 2010 na observatoři Univerzity Mikuláše Koperníka v Piwnicích u Toruně:

List of observations of star										1 Per (HD 11241)	
RA(2000) 1 51 59.0										DA(2000) 55 8 51	
=====											
N. date & UT start	exp[s]	angle	slit	ADU	J.D.hel.	RVcorr	observ				

100	10- 3- 4 17:12:42	1200			55260.2222	-20.92	HJ				
101	10- 3- 4 17:44:48	1200			55260.2445	-20.93	HJ				
102	10- 3- 4 18:10:00	1200			55260.2620	-20.93	HJ				
103	10- 3- 4 20:43:34	1200			55260.3686	-20.91	HJ				
104	10- 3- 4 21:06:09	1200			55260.3843	-20.91	HJ				
105	10- 3- 4 21:29:26	1200			55260.4005	-20.90	HJ				
106	10- 3- 4 22:11:25	1200			55260.4297	-20.87	HJ				
107	10- 3- 4 22:32:38	1200			55260.4444	-20.86	HJ				
108	10- 3- 4 22:54:03	1200			55260.4593	-20.85	HJ				
109	10- 3- 6 20:59:08	1200			55262.3793	-20.55	HJ				
110	10- 3- 6 21:22:02	1200			55262.3952	-20.54	HJ				
111	10- 3- 6 21:53:04	1200			55262.4168	-20.53	HJ				
112	10- 3-10 18:04:09	1200			55266.2575	-19.80	HJ				
113	10- 3-10 18:24:38	1200			55266.2718	-19.80	HJ				
114	10- 3-10 18:46:14	1200			55266.2868	-19.80	HJ				

10. Použitý software

10.1. Prekor6

Program počítá heliocentrickou korekci vzhledem k poloze observatoře. Tuto operaci musíme provést na začátku, tj. před vlastní kalibrací spekter. Všechna spektra musíme opravit o správnou hodnotu heliocentrické korekce, jejíž hodnotu vypočítá právě program Prekor6. Program bohužel pracuje na platformě MS-DOS a má poměrně zastaralé uživatelské rozhraní. Více informací lze získat na autorových stránkách [E1].

10.2. SPEFO

Program SPEFO obsahuje užitečné rutiny pro analýzu astronomických spekter (měření ekvivalentních šířek čar, radiálních rychlostí, filtrování šumu a další). Zásadní nevýhodou programu je použitá platforma MS-DOS a zastaralý interface. Přes tyto nevýhody však program nebyl dosud překonán a je stále používán.

Hlavním omezením SPEFA je jeho datový formát (UUI nebo RUI soubory). Je příliš jednoduchý, takže neumožňuje ukládat informace potřebné ke zpracování spekter z moderních detektorů a díky tomu dochází ke ztrátě dat v jeho datovém formátu. Uživatel je pak nucen ručně doplňovat informace do hlaviček nebo si tyto informace ukládat jinde.

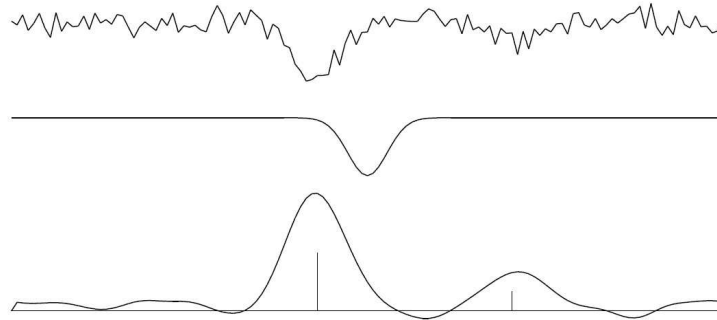


Obrázek č. 24: Program SPEFO, úvodní obrazovka

10.3. KOREL a VO-KOREL

Ve dvojhvězdných systémech je měření radiálních rychlostí ztíženo překryvem spektrálních čar obou složek (tzv. blendování čar). Proto je důležité nalézt a oddělit u spektroskopických dvojhvězd příspěvky jednotlivých složek k celkovému spektru. V případě silně překrytých čar se hledají optimální orbitální parametry společně se spektrálními profily jednotlivých hvězd tak, aby co nejlépe odpovídaly napozorovaným spektrům. Tato úloha se nazývá rozplétání spekter (tzv. disentangling). Metoda rozplétání spekter využívá ke svému řešení Fourierovu transformaci. Program KOREL byl vytvořen na stelárním oddělení Astronomického ústavu AV v Ondřejově dr. Hadravou a slouží jako nástroj k dekompozici spektrálních čar vícenásobných hvězdných systémů na jednotlivé komponenty a současně k řešení jejich orbitálních parametrů. KOREL používá

u napozorovaných spekter porovnávání metodou nejmenších čtverců Fourierovské transformace, která dává numericky jednodušší řešení, a je obecnější. Matematickým základem této metody je analogie ke kros-korelační technice.



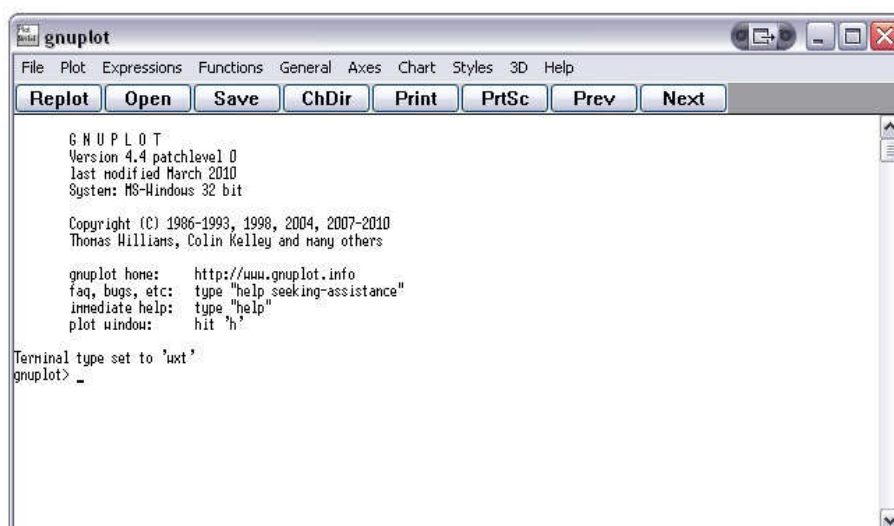
Obrázek č. 25: Příklad kros-korelace. Syntetické spektrum je tvořeno sloučením dvou komponent a šumu.

Základním rozdílem mezi standardní kros-korelací či jejím 2D zobecněním je to, že v KORELU jsou kros-korelační spektra v různých fázích jedné proměnné, zatímco jedno ze spekter je vybráno jako standard. KOREL je také schopen dekompozice telurických čar. Pro detailní popis programu KOREL viz [1] a [E1].

10.4. GNUPlot

Gnuplot je interaktivní řádkový program pro kreslení 2D a 3D grafů funkcí a vizualizaci dat. Program byl původně určen pro vědeckou a studentskou vizualizaci matematických funkcí a dat. Program slouží také pro neinteraktivní užití ve skriptech pro web a jako vizualizační nástroj pro ostatní programy jako např. GNU Octave.

Domovská stránka projektu: <http://www.gnuplot.info>

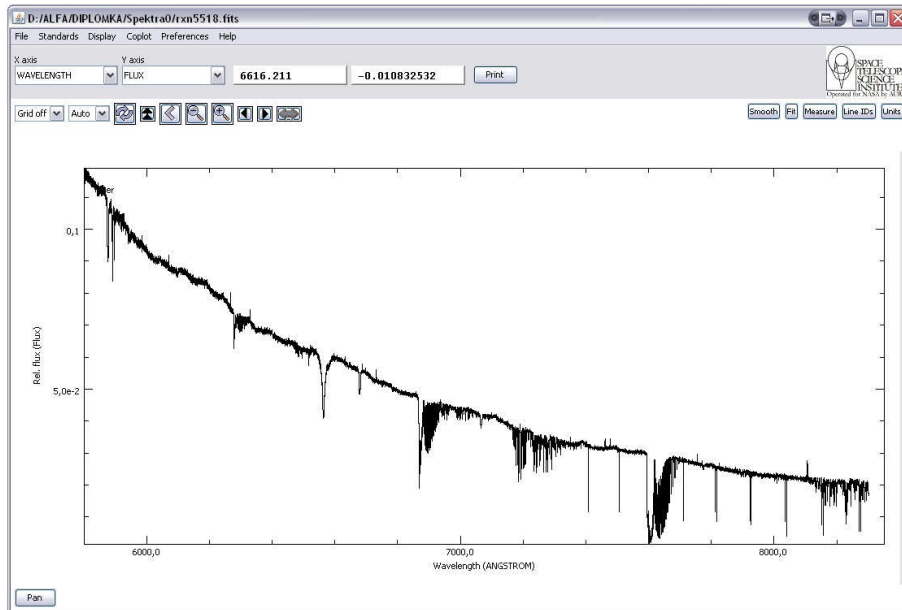


Obrázek č. 26: Program GNUplot

10.5. SpecView

Je program pro jednorozměrnou vizualizaci a analýzu astronomických spektrogramů. Je napsán v Javě a tudíž může fungovat na všech platformách, které Javu podporují. Specview je schopen načíst nejen data z Hubblova vesmírného dalekohledu, ale také z mnoha dalších zařízení (např. IUE, FUSE, ISO, FORS a SDSS) a formátů (např. FITS a ASCII). Program má uloženou databázi spektrálních čar a umožňuje jejich zakreslení přímo do grafu spektra.

Web: http://www.stsci.edu/resources/software_hardware/specview



Obrázek č. 27: Program Specview

11. Hvězdný systém V436 Persei

Kde na obloze ji najdeme:



Obrázek č. 28: Noční obloha s vyznačenou polohou V436 Per, program Stellarium

Základní údaje o hvězdě [E7], [1]:

Označení:

V436 Per

1 Per

HR 533

HD 11241

BD+54°396

Spektrální třída: B1.5V

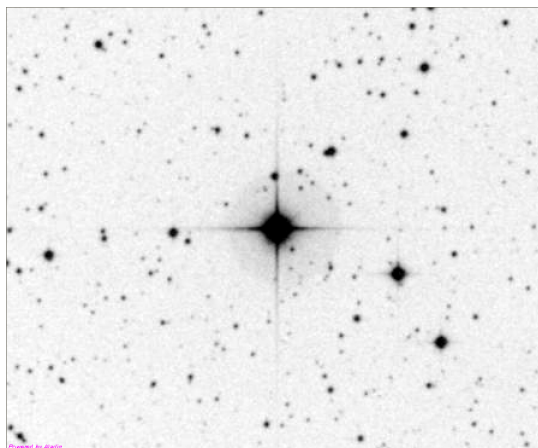
Perioda: 25,935 d

Jasnosti:

V 5,5264 m

B 5,3471 m

U 4,5238 m



Obrázek č. 29: Snímek V436 Per z databáze Aladin

Historie výzkumu V436 Per:

1912	Adams	objevení a změření její radiální rychlosti
1963	Blaauw, van Albada	pomocí analýzy vlastních a starších měření byla identifikována jako spektroskopická dvojhvězda
1969	Beardsley	publikoval sérii 59 měření radiálních rychlostí z observatoře v Allegheny
1977	Kurtz	fotometrická měření, objev skutečnosti, že se jedná o zákrytovou dvojhvězdu
1979	Figer, Maurin	potvrzení zákrytové povahy dvojhvězdy
1982	Gaspani	řešení světelné křivky
1997	Harmanec	nová fotometrická měření, podezření na rychlé změny v profilech čar

Zdroj: [1].

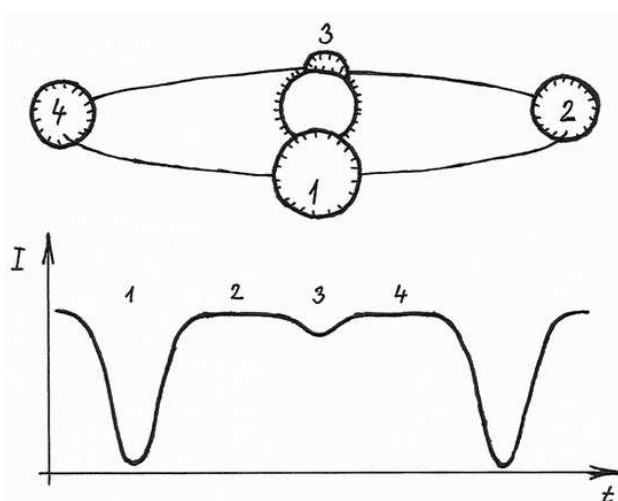
Poslední detailní spektroskopické studium V436 Per bylo provedeno J. Janíkem (2003). Pomocí metody rozplétání spekter získal rozdílová spektra a jejich oddělením od pozorovaných spektrálních profilů hledal rychlé změny v profilu čáry. Očekávané rychlé změny v profilu čáry však zatím nebyly potvrzeny.

Parametry složek:

Element	Primár	Sekundár
M/M	6,95	7,42
R/R	3,29	3,86
T_{ef} [K]	21 500	22 000
M_{bol} [mag]	-3,60	-4,05
M_V [mag]	-1,37	-1,77
P_{rot} [d]	1,45	1,40

Tabulka č. 3: Parametry složek V436 Per [1]

Jak již bylo uvedeno jedná se o zákrytovou spektroskopickou dvojhvězdu. Perioda světelných změn je tedy totožná s orbitální periodou soustavy. Příčina změn světelné křivky je patrná z následujícího obrázku:

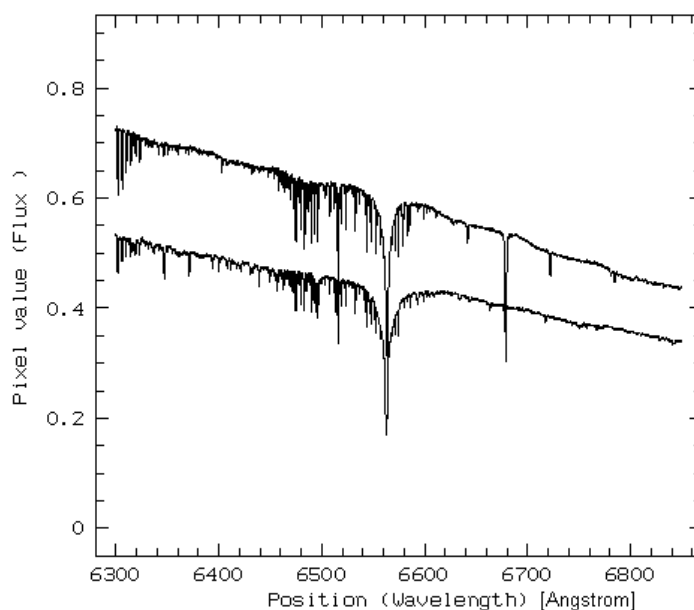


Obrázek č. 30: Vznik primárního a sekundárního minima

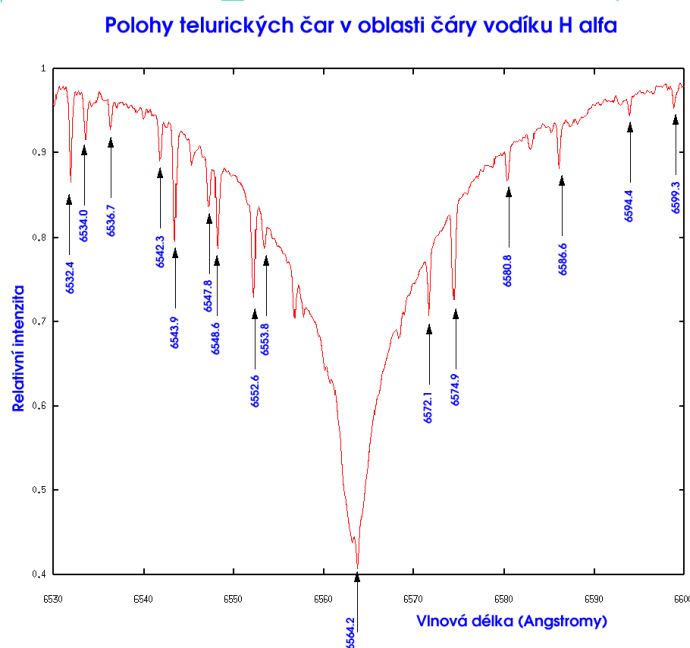
12. Zpracování hvězdných spekter

Při zpracování spekter je potřeba brát v úvahu celou řadu různých efektů. Neovlivnitelným efektem je atmosférická vlhkost, která se projevuje více či méně výraznými tzv. telurickými čarami ve spektru.

Telurické čáry jsou absorpční čáry nebo pásy ve spektru kosmických objektů, které vznikají při průchodu záření zemskou atmosférou. Telurické čáry jsou většinou čáry nebo pásy kyslíku, oxidu uhličitého a vody. Pod pojmem telurické čáry tedy míníme jak čáry atmosférické vody, tak i například kyslíku O_2 ; proto také nemluvíme prostě o čarách vody, jak by bylo možno očekávat.



Obrázek č. 31: Srovnání dvou spekter těžké hvězdy za různých atmosférických podmínek [E3].



Obrázek č. 32: Telurické čáry, jež se přímo promítají do vodíkové čáry $H\alpha$ [E3].

Musím však zdůraznit, že přítomnost telurických čar (jsou přítomné vždy, jen jejich relativní intenzita vůči spektru objektu se různí) není jen na škodu věci. Mohou sice komplikovat hledání profilu spektrálních čar objektu, zejména právě uváděnou čáru $H\alpha$, ale na druhou stranu je lze využít k eliminaci dalších efektů, např. změny vlastností spektrografu.

12.1. Prekor6

Pomocí programu PREKOR6 jsem spočítal heliocentrickou korekci postupně pro všechny 4 observatoře. Mám k dispozici soubory `prekor.dao`, `prekor.tls`, `prekor.ond` a `prekor.tor` s parametry jednotlivých observatoří a soubor `spektra.lst` se seznamem všech spekter. Vytvořil jsem 4 samostatné soubory se seznamy příslušných spekter pro jednotlivé observatoře, tj.:

Adresář: TOR

`prekor.par` (původně `prekor.tor`)

`prekor.lst` (původně `spektra.lst`, nyní obsahuje pouze seznam spekter pro DAO).

Pro DAO, TLS, OND postupujeme analogicky.

- z adresáře dané observatoře, např. TOR, jsem nakopíroval soubory `prekor.par` a `prekor.lst` do adresáře Prekoru
- spustím Prekor6 a zadám "0"
- pro TOR dostanu výsledný soubor `prekor.res`:

```
equinox= 2000.0000
  alpha=  1.0000 h  51.9887 m
  delta= 55.0000 gr  8.8450 m
  l=    48.612130 b=    40.253332

equinox= 2000.0000
  alpha=  1.8665 h
  delta= 55.1474 gr

observatory coordinates:  18.554  53.096deg  93.6m

KOREL: om=  324.998870 K2=22.732 1/K2= .043992
31 0 1 1    365.256360000  .1
32 0 1 1  51547.520600000  10.
33 0 1 1         .016710220  0.001
34 0 1 1    324.998869675  10.
35 0 1 1         .001000000  .0001
36 0 1 1         .000043992  .000001
37 0 1 1         .000009111  .00000001
5001 0 1 1   -20.9172365  .1
5002 0 1 1   -20.9250345  .1
5003 0 1 1   -20.9292141  .1
5004 0 1 1   -20.9142134  .1
5005 0 1 1   -20.9060726  .1
5006 0 1 1   -20.8962405  .1
5007 0 1 1   -20.8748187  .1
5008 0 1 1   -20.8624265  .1
5009 0 1 1   -20.8488790  .1
5010 0 1 1   -19.7967057  .1
5011 0 1 1   -19.7972219  .1
5012 0 1 1   -19.7964138  .1
```

12.2. Přejmenování a SPEFO.

Následně jsem kvůli přehlednosti přejmenoval soubory se spektry

20100304-171241-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00100.fit
20100304-174447-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00101.fit
20100304-181000-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00102.fit
20100304-204333-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00103.fit
20100304-210609-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00104.fit
20100304-212925-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00105.fit
20100304-221125-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00106.fit
20100304-223237-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00107.fit
20100304-225403-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00108.fit
20100310-180409-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00112.fit
20100310-182437-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00113.fit
20100310-184614-1_Per-1200s-1.merge.fits	na	1t00114.fit
rxn5518.fits	na	1o10000.fit
rxn5532.fits	na	1o10001.fit

a nakopíroval jsem je do adresáře **SPEFO** a přes nabídku **FILE** – **Fits→spefo** je zkonvertoval do formátu *.UUI

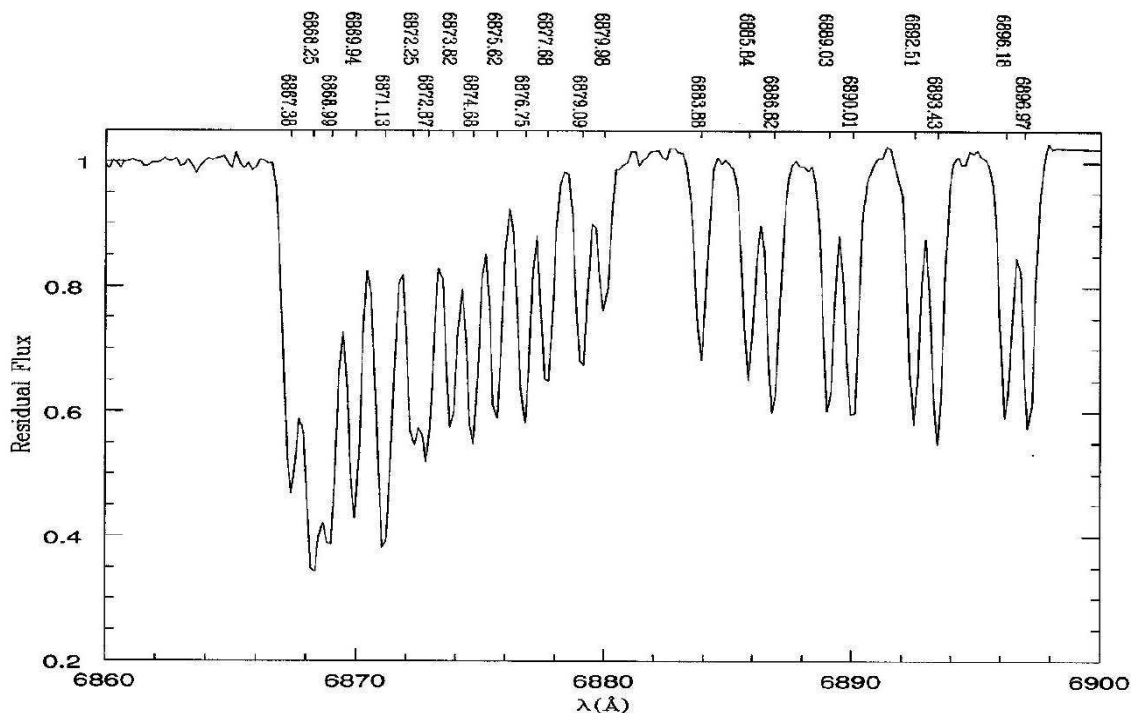


Obrázek č. 33: Program SPEFO, nabídka File

potom přes volbu **Rect** jsem postupně provedl rektifikaci všech spekter a uložení do formátu *.RUI

12.3. Telurické čáry

Nyní porovnám vybraná spektra ve formátu *.RUI se souborem telurických čar **atm6867.st1**, který jsem vytvořil na základě práce G. Catanzareho [8], který publikoval v roce 1998 atlas telurických čar pro spektra s vysokým rozlišení. Soubor pro data telurických čar jsem vytvořil z následujícího grafu:



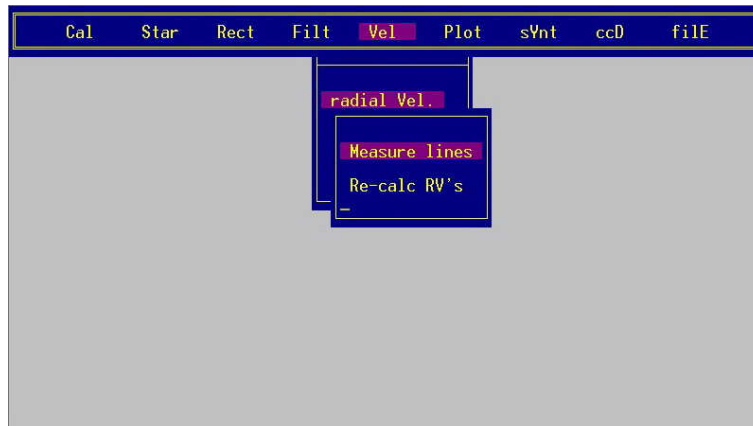
Obrázek č. 34: Graf telurických čar, zdroj: [x]

Line				
6768,38	2,5	atm	H2O	0,4550
6868,25	2,5	atm	H2O	0,3490
6868,99	2,5	atm	H2O	0,3580
6869,94	2,5	atm	H2O	0,4300
6871,13	2,5	atm	H2O	0,3580
6872,25	2,5	atm	H2O	0,5500
6872,87	2,5	atm	H2O	0,5200
6873,82	2,5	atm	H2O	0,5700
6874,68	2,5	atm	H2O	0,5500
6875,62	2,5	atm	H2O	0,5900
6876,75	2,5	atm	H2O	0,5800
6877,68	2,5	atm	H2O	0,6500

Line				
6879,09	2,5	atm	H2O	0,6750
6879,98	2,5	atm	H2O	0,7600
6883,88	2,5	atm	H2O	0,6800
6885,84	2,5	atm	H2O	0,6500
6886,82	2,5	atm	H2O	0,6000
6889,03	2,5	atm	H2O	0,6000
6890,01	2,5	atm	H2O	0,5950
6892,51	2,5	atm	H2O	0,5800
6893,43	2,5	atm	H2O	0,5500
6896,18	2,5	atm	H2O	0,5950
6896,97	2,5	atm	H2O	0,5750

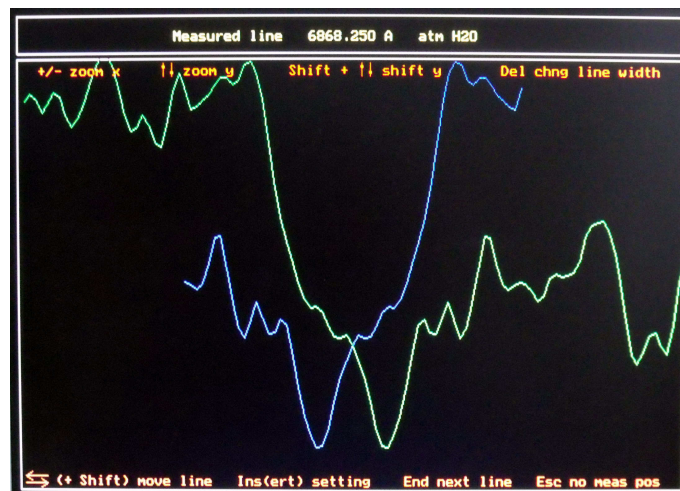
Tabulka č. 4: Seznam telurických čar pro SPEFO

Pokračoval jsem tím, že jsem v hlavní nabídce zvolil položku Vel → radial Vel. → Measure lines

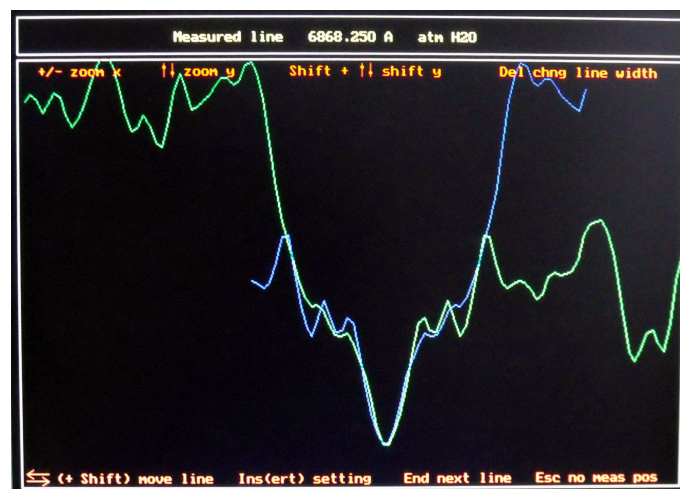


Obrázek č. 35: Program SPEFO, měření telurických čar

Postupně provádím nastavení čar na sebe a na závěr zadám heliocentrickou korekci spočtenou programem Prekor. Práce se SPEFem je zřejmá z následujících obrázků:



Obrázek č. 36: Měření telurických čar, krok 1.



Obrázek č. 37: Měření telurických čar, krok 2.

Na závěr zaměření celé sady telurických čar uvidíme celkový přehled nalezených telurických čar ve spektru:



Obrázek č. 38: Měření telurických čar, krok 3.

Získám 2 výstupní soubory pro každé spektrum, např. pro spektrum 1t00112 je to 1T00112.RV:

```

4.34987011719E+0003
9.05781928155E-0002
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
1.00000000000E+0000
26700.05 2.54 0.0000 10 6768.3800 atm H2O
27805.25 2.54 0.0000 10 6868.2500 atm H2O
27805.25 2.54 0.0000 10 6868.9900 atm H2O
27822.55 2.54 0.0000 10 6869.9400 atm H2O
27836.40 2.54 0.0000 10 6871.1300 atm H2O
27852.50 2.54 0.0000 10 6872.2500 atm H2O
27852.55 2.54 0.0000 10 6872.8700 atm H2O
27867.10 2.54 0.0000 10 6873.8200 atm H2O
27876.25 2.54 0.0000 10 6874.6800 atm H2O
27887.45 2.54 0.0000 10 6875.6200 atm H2O
27897.70 2.54 0.0000 10 6876.7500 atm H2O
27906.15 2.54 0.0000 10 6877.6800 atm H2O
27922.95 2.54 0.0000 10 6879.0900 atm H2O
27930.60 2.54 0.0000 10 6879.9800 atm H2O
27977.65 2.54 0.0000 10 6883.8800 atm H2O
27997.90 2.54 0.0000 10 6885.8400 atm H2O
28008.35 2.54 0.0000 10 6886.8200 atm H2O
28032.90 2.54 0.0000 10 6889.0300 atm H2O
28043.05 2.54 0.0000 10 6890.0100 atm H2O
28072.45 2.54 0.0000 10 6892.5100 atm H2O
28082.00 2.54 0.0000 10 6893.4300 atm H2O
28111.30 2.54 0.0000 10 6896.1800 atm H2O
28121.65 2.54 0.0000 10 6896.9700 atm H2O

```

a druhý soubor 1T00112.RVR:

```

Summary of radial velocities measured on plate 1T00112
-----
Heliocentric correction : -19.80

Results for component N. 10
-----
N.      ident.    lab.    width  position  measured  rms  hel. RV
-----
 1  atm H2O     6768.380  2.54  26700.05  6768.222  0.000  -26.803
 2  atm H2O     6868.250  2.54  27805.25  6868.329  0.000  -16.356
 3  atm H2O     6868.990  2.54  27805.25  6868.329  0.000  -48.651
 4  atm H2O     6869.940  2.54  27822.55  6869.896  0.000  -21.724
 5  atm H2O     6871.130  2.54  27836.40  6871.150  0.000  -18.909
 6  atm H2O     6872.250  2.54  27852.50  6872.609  0.000  -4.152
 7  atm H2O     6872.870  2.54  27852.55  6872.613  0.000  -30.998
 8  atm H2O     6873.820  2.54  27867.10  6873.931  0.000  -14.952
 9  atm H2O     6874.680  2.54  27876.25  6874.760  0.000  -16.313
10  atm H2O     6875.620  2.54  27887.45  6875.774  0.000  -13.067
11  atm H2O     6876.750  2.54  27897.70  6876.703  0.000  -21.855
12  atm H2O     6877.680  2.54  27906.15  6877.468  0.000  -29.029
13  atm H2O     6879.090  2.54  27922.95  6878.990  0.000  -24.159
14  atm H2O     6879.980  2.54  27930.60  6879.683  0.000  -32.746
15  atm H2O     6883.880  2.54  27977.65  6883.945  0.000  -16.987
16  atm H2O     6885.840  2.54  27997.90  6885.779  0.000  -22.464
17  atm H2O     6886.820  2.54  28008.35  6886.725  0.000  -23.920
18  atm H2O     6889.030  2.54  28032.90  6888.949  0.000  -23.323
19  atm H2O     6890.010  2.54  28043.05  6889.868  0.000  -25.961
20  atm H2O     6892.510  2.54  28072.45  6892.531  0.000  -18.869
21  atm H2O     6893.430  2.54  28082.00  6893.396  0.000  -21.260
22  atm H2O     6896.180  2.54  28111.30  6896.050  0.000  -25.435
23  atm H2O     6896.970  2.54  28121.65  6896.988  0.000  -19.024

robust mean RV = -21.634
rms = 1.775

```

12.4. Výpočet korekce radiálních rychlostí z atmosférických čar pomocí programu ac.exe. Doplňme data do souboru 1PERDAO.RVS:

```

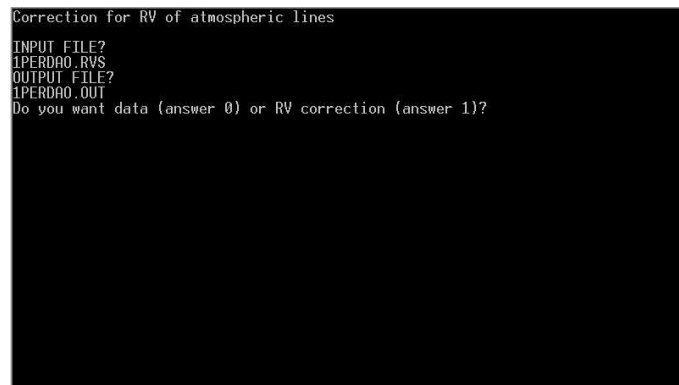
Results of RV measurements for          1 Per (HD 11241)
RA(2000) 1 51 59.0  DA(2000) 55 8 51

N.      J.D. hel. corr.      R.V. for individual components
-----
00100  55260.2222 -20.917                      -23.399
00101  55260.2445 -20.925                      -22.356
00102  55260.2620 -20.929                      -24.080
00103  55260.3686 -20.914                      -24.889
00104  55260.3843 -20.906                      -21.446
00105  55260.4004 -20.896                      -23.518
00106  55260.4296 -20.874                      -21.449
00107  55260.4443 -20.862                      -21.343
00108  55260.4592 -20.848                      -21.943
00112  55266.2575 -19.796                      -21.634
00113  55266.2717 -19.797                      -21.071
00114  55266.2867 -19.796                      -20.062
10000  52691.8390 -22.173                      -29.085
10001  52692.8086 -22.084                      -32.963

```

kde hodnoty v posledním sloupci pochází z proměření telurických čar v programu SPEFO.

Spustíme program **ac.exe**, zadáme vstupní a výstupní soubor a "1" spustíme výpočet radiální rychlosti.



Obrázek č. 39: Okno programu **ac.exe**

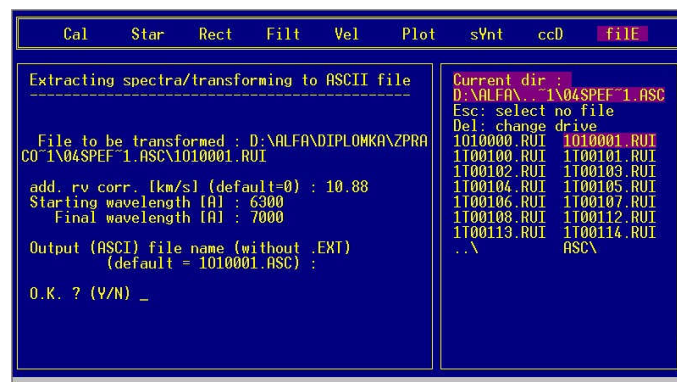
Obsah výstupního souboru vypadá takto:

Results of RV measurements for			1 Per (HD 11241)
100	2.48	55260.2222	
101	1.43	55260.2445	
102	3.16	55260.2620	
103	3.97	55260.3686	
104	.54	55260.3843	
105	2.62	55260.4004	
106	.57	55260.4296	
107	.48	55260.4443	
108	1.10	55260.4592	
112	1.84	55266.2575	
113	1.28	55266.2717	
114	.27	55266.2867	
10000	6.91	52691.8390	
10001	10.88	52692.8086	

Kde korekční hodnoty RV použijeme v dalším kroku při tvorbě ASCII souborů pro **Prekor6**.

12.5. Generování ASCII souborů

V programu SPEFO přes nabídku **FILE** – **spefo**→**ASCII** konvertuji *.RUI soubory do formátu *.ASC se započtením radiální rychlosti (RV) podle předchozího kroku.



Obrázek č. 40: Program SPEFO, konverze souborů na ASCII

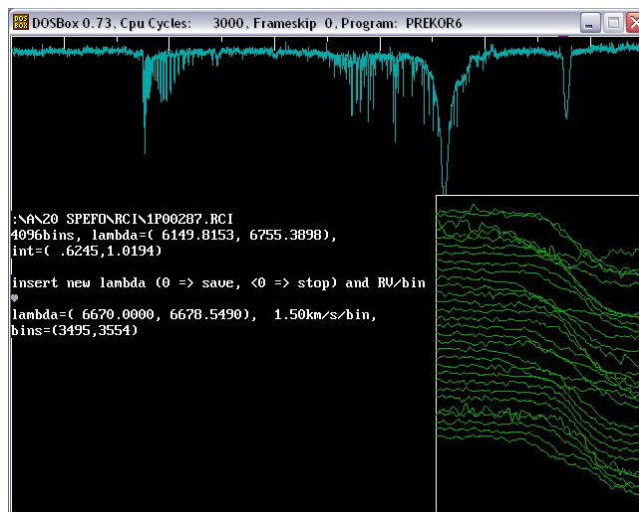
Postupně jsem zkonvertoval všechny soubory a byl jsem připraven na další krok.

12.6. Vytvoření vstupního souboru pro KOREL

Nyní vytvoříme soubor vstupních dat pro program KOREL. K tomu nám poslouží opět program **Prekor6**.

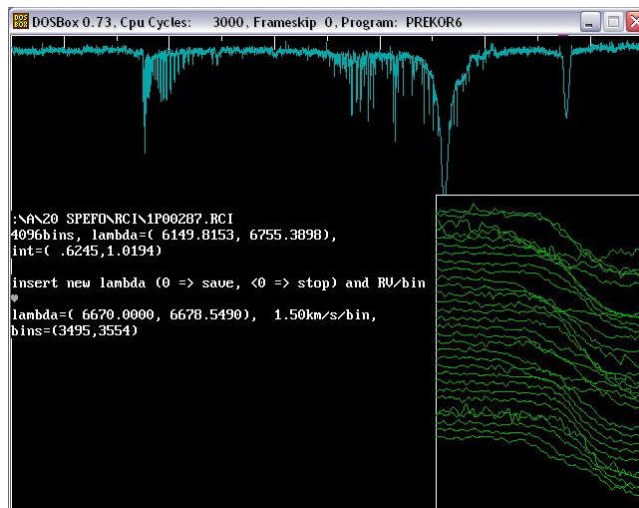
Nejprve provedeme zpracování dat pro Ondřejovskou observatoř. Zkopírujeme soubor `prekor.ond` do souboru `prekor.par` a seznam spekter v *.ASC formátu do `prekor.lst`. Spustíme `Prekor6` a zadáme parametry pro okolí čáry $H\alpha$ 6538 a krok 5. Výsledný soubor pojmenujeme `korel.h3.ond`.

Stejným způsobem postupujeme u dalších tří observatoří a vytvoříme soubory `korel.h3.tor`, `korel.h3.dao` a `korel.h3.tls`. Na závěr tyto soubory spojíme do jednoho a vznikne nám vstupní soubor `korel.dat`.



Obrázek č. 41: Program `Prekor6`, vytváření vstupního souboru pro KOREL, čára $H\alpha$

Stejným způsobem budeme postupovat při výpočtu dat pro čáru $He I$, kde použijeme parametry 6670 a krok 1,5.



Obrázek č. 42: Program `Prekor6`, vytváření vstupního souboru pro KOREL, čára $He I$

Nyní mám k dispozici dva datové soubory, každý pro jednu spektrální čáru. U spektrální čáry $H\alpha$ musíme nejdřív provést výpočet telurických čar, kdežto spektrální čáru $He I$ můžeme počítat přímo.

13. Rozplétání spekter pomocí programu KOREL

Původně jsem měl v úmyslu pracovat přímo s programem KOREL, protože jsem však neměl k dispozici aktuální zkompilevanou verzi a vlastní kompilace ze zdrojového kódu ve Fortranu se ukázala jako problematická, rozhodl jsem se využít webové služby VO-KOREL.

Na adrese <https://stelweb.asu.cas.cz/vo-korel> je po registraci a přihlášení k dispozici nejnovější verze programu KOREL a stačí pouze nahrát soubory s daty a řídicími parametry.

VO-KOREL Web Service

[Home](#) - [Help](#) - [Create New Account](#) - [Login](#)

Home

This service is the test-bed for embedding Fourier disentangling into the Virtual Observatory infrastructure. Currently the system allows uploading of user data, on-the-fly modification of parameters and management of various user files. The system uses the well-known interface of electronic shop. The user can see only her/his own files and it is guaranteed that nobody (except the administrator) can access her/his private files. More information about the service and its motivation is described in [ArXiv:1003.4801](#). The underlying code KOREL is presented on [KOREL](#) web page of its author P. Hadrava.

To achieve this the full encryption is used and the user is required to register (create unique account). After filling the form (and solving simple math question), the special credential is sent to user's mail. The web service may be used directly after the link embedded in mail is activated. Currently up to five concurrent jobs may run in parallel - the others are queued. The service is adhering to the IVOA standards for Universal Worker Server ([UWS](#)).

When using the results achieved by this system, please write the acknowledgment similar to the one stated below:

This research was accomplished with the help of the VO-KOREL web service, developed at the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic in the framework of the Czech Virtual Observatory (CZVO) by P. Skoda and J. Fuchs using the Fourier disentangling code KOREL devised by P. Hadrava

Current version of KOREL installed on this server is KOREL09 release 11.11.2009.

It can handle up to 2000 spectra with maximal size of 16384 bins, 50 spectral regions and 3 templates.

More details will be put in future on the server - so read it regularly.

Obrázek č. 43: Úvodní stránka služby VO-KOREL

13.1. Spektrální čára H α

Výpočet čáry H α provedeme ve dvou krocích. V první iteraci vypočteme hodnoty telurických čar a v druhém kroku již tyto telurické čáry započítáme.

Hlavička souboru vstupních parametrů vypadá takto:

```
1 1 0 0 2 1 0 2 2 | key(1,...,5), k= Nr. of spectra>0, filter, plot
o 0 1 0 1 1 25.935952824 0.00001 | 96 Her, sum=109.77
o 0 2 0 1 1 43563.39 0.1 = PERIASTRON EPOCH
o 0 3 0 1 1 0.380 0.0100 = ECCENTRICITY
o 0 4 0 1 1 108.0 1.0 = PERIASTRON LONG.
o 0 5 0 1 1 100.0 1.0 = K1
o 0 6 0 1 1 1.05 0.01 = q = M2/M1, K2 = 58.896033264
o 3 1 0 1 1 365.256360000 .1 31 0 1 1 365.2422 1.
o 3 2 0 1 1 51547.520600000 10. 32 0 1 1 49722. 1.
o 3 3 0 1 1 .016710220 0.001 33 0 1 1 0.0167301 .000001
o 3 4 0 1 1 103.529416427 10. 34 0 1 1 376.706533780 2.
o 3 5 0 1 1 .001000000 .0001 35 0 1 1 .100000000 .02
o 3 6 0 1 1 .000046891 .000001 36 0 1 1 .003731583 .0003
o 3 7 0 1 1 .000009111 .00000001
```

V případě druhé iterace vypadají řídicí parametry takto:

```

2 2 0 0 1 1 0 2 2 | key(1,...,5), k= Nr. of spectra>0, filter, plot
o 0 1 0 1 1      25.935952824  0.00001 | 96 Her, sum=109.77
o 0 2 01 1 1    43563.39      0.1    = PERIASTRON EPOCH
o 0 3 01 1 1      0.380      0.0100 = ECCENTRICITY
o 0 4 01 1 1     108.0       1.0    = PERIASTRON LONG.
o 0 5 01 1 1     100.0       1.0    = K1
o 0 6 01 1 1      1.05       0.01   = q = M2/M1, K2 = 58.896033264
o 3 1 0 1 1     365.256360000  .1     31 0 1 1 365.2422 1.
o 3 2 0 1 1    51547.520600000  10.    32 0 1 1 49722. 1.
o 3 3 0 1 1      .016710220  0.001  33 0 1 1 0.0167301 .000001
o 3 4 0 1 1    103.529416427  10.    34 0 1 1 376.706533780 2.
o 3 5 0 1 1      .001000000 .0001  35 0 1 1 .100000000 .02
o 3 6 0 1 1      .000046891 .000001 36 0 1 1 .003731583 .0003
o 3 7 0 1 1      .000009111 .00000001

```

Hlavní rozdíl je v prvním řádku, kde v první iteraci je

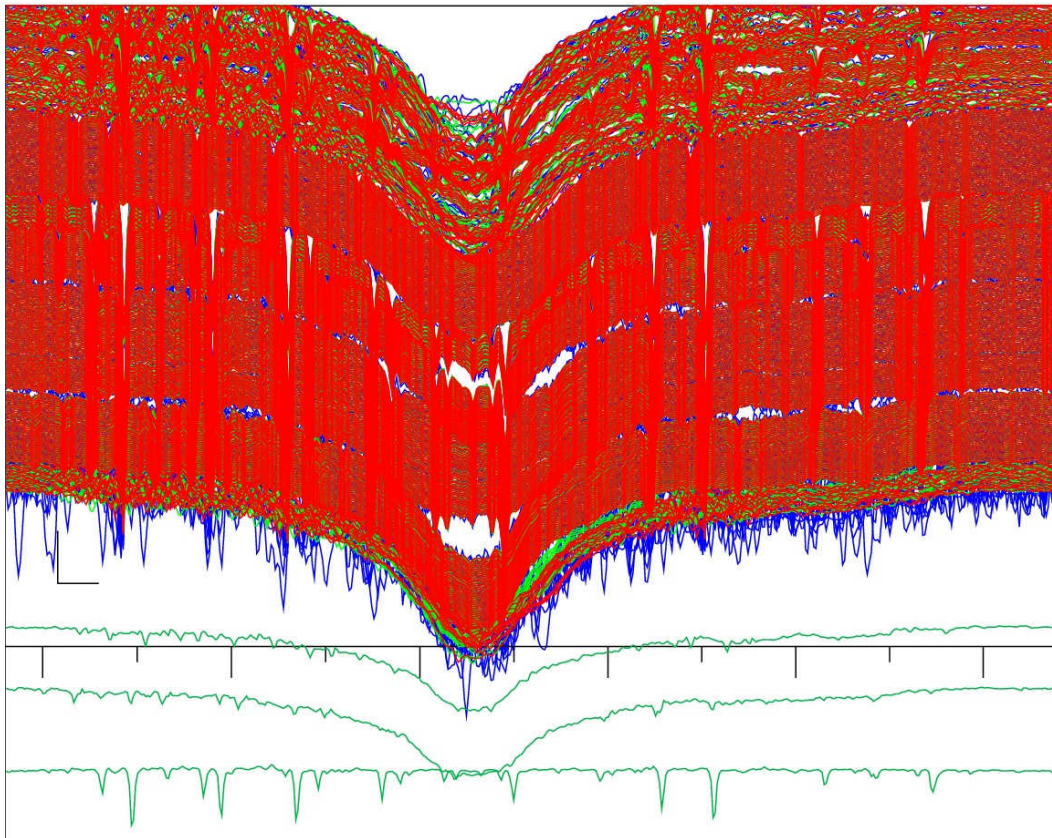
```
1 1 0 0 2 1 0 2 2 | key(1,...,5), k= Nr. of spectra>0, filter, plot
```

a ve druhé:

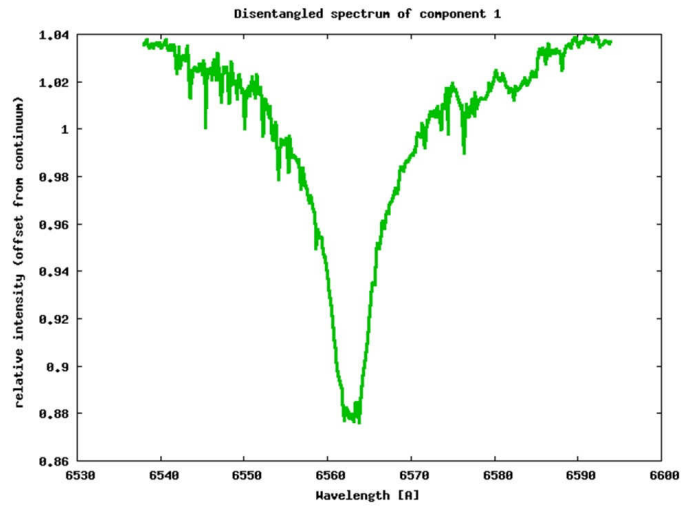
```
2 2 0 0 1 1 0 2 2 | key(1,...,5), k= Nr. of spectra>0, filter, plot
```

V tomto řádku je definováno, pro kolik složek se bude provádět výpočet, maximálně však 5. Hodnota 0 znamená, že se složka nepočítá, hodnota 1 znamená, že je složka přítomná, ale nebere se v úvahu síla čar a konečně hodnota 2 znamená, že program počítá i sílu čar. Pozice 1 až 4 jsou pro hvězdy a 5. pozice je v našem případě pro telurické čáry.

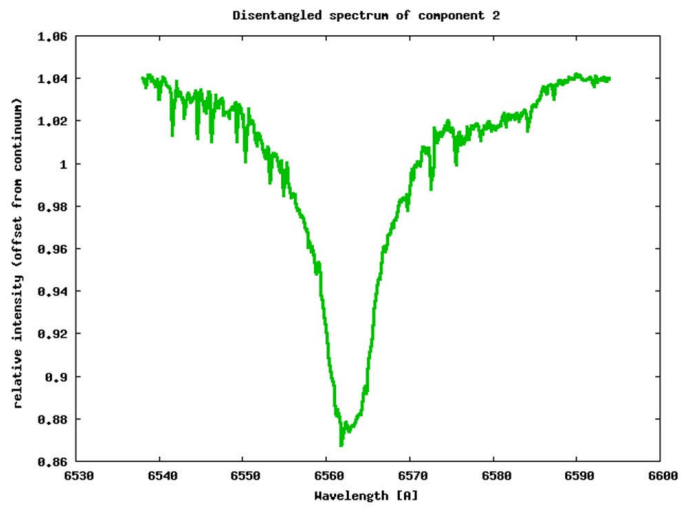
Výsledek první iterace rozplétání spekter:



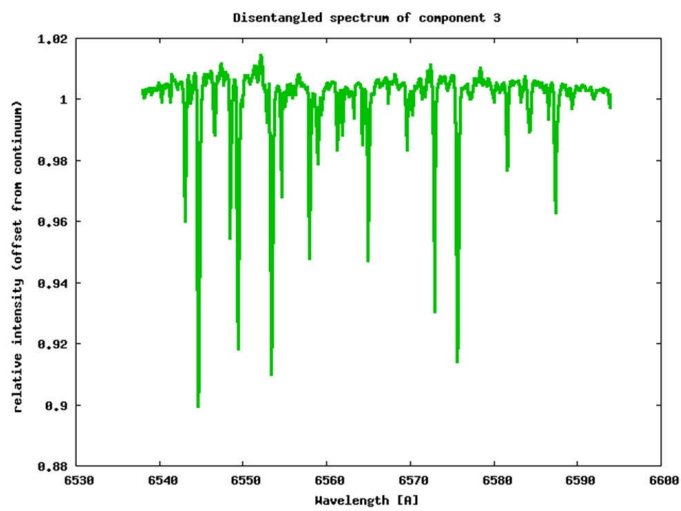
Obrázek č. 44: Výsledek rozplétání spekter, čára H α a telurické čáry



Obrázek č. 45: Rozpleté spektrum, čára H α , první složka

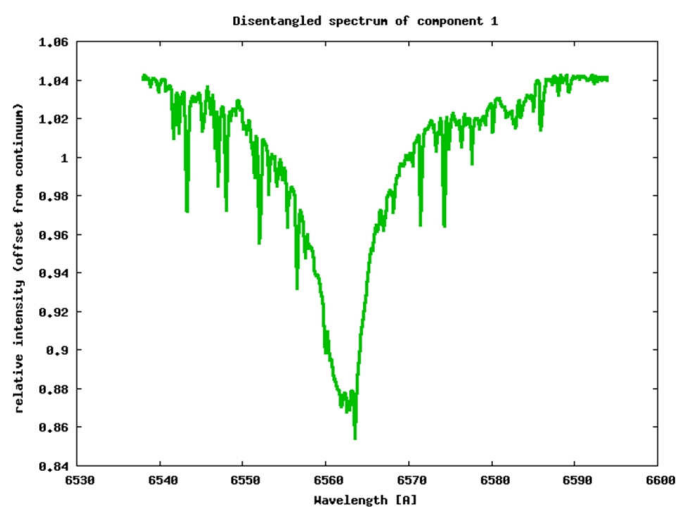


Obrázek č. 46: Rozpleté spektrum, čára H α , druhá složka

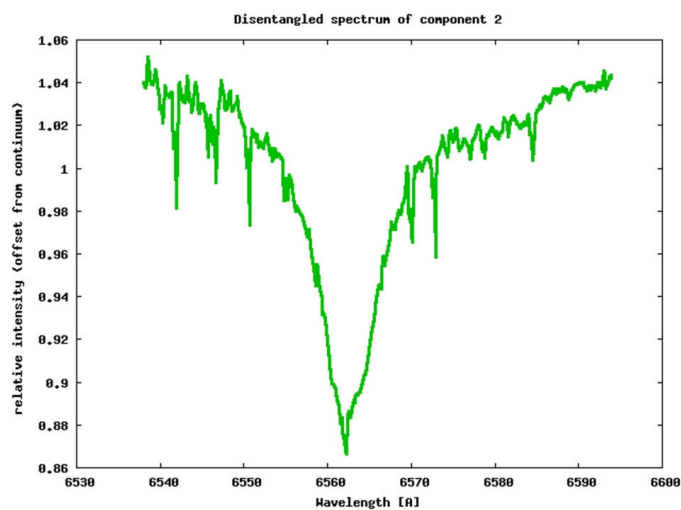


Obrázek č. 47: Rozpleté spektrum, čára H α , telurické čáry

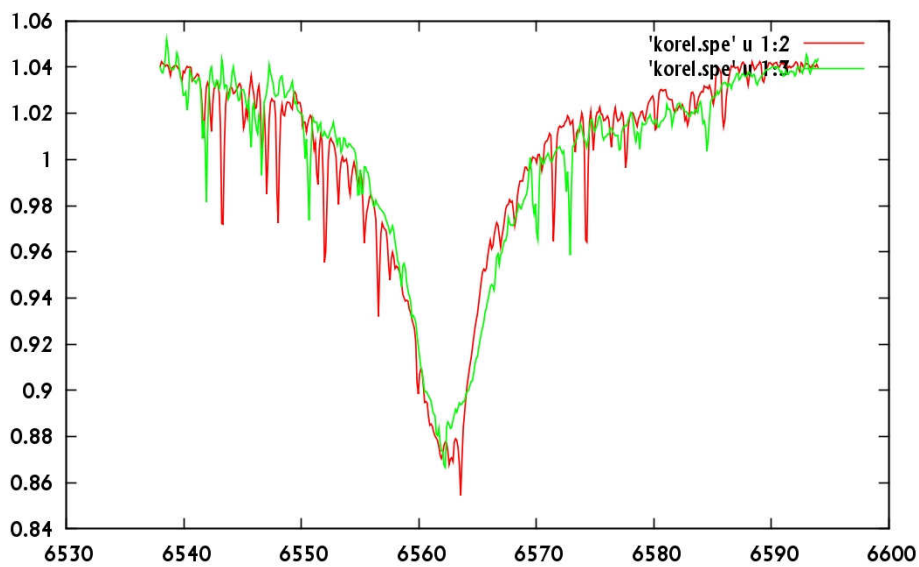
Do druhé iterace jsme již započítali spočtené telurické čáry a výsledek vyšel takto:



Obrázek č. 48: Rozpletené spektrum, první složka, 2. iterace

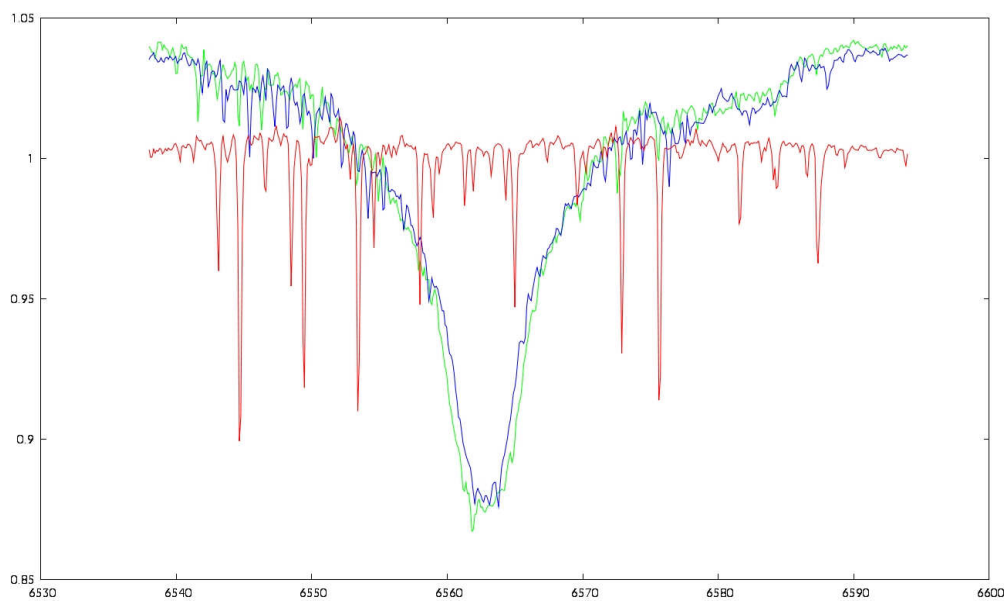


Obrázek č. 49: Rozpletené spektrum, druhá složka, 2. iterace



Obrázek č. 50: Rozpletené spektrum, porovnání složek

Pro lepší představu přikládám ještě obrázek porovnání čar z první iterace:



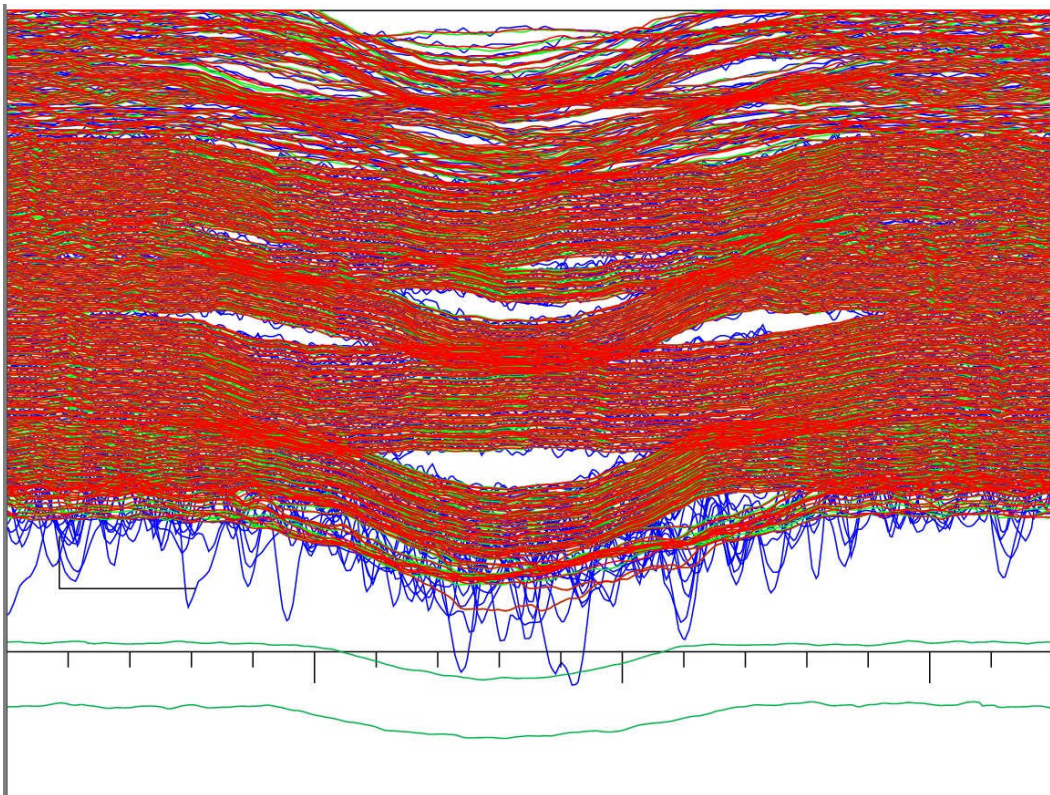
Obrázek č. 51: Rozpletené spektrum, čára $H\alpha$, porovnání čar zelená – 1. složka, modrá – 2. složka, červená – telurické čáry

13.2. Spektrální čára He I

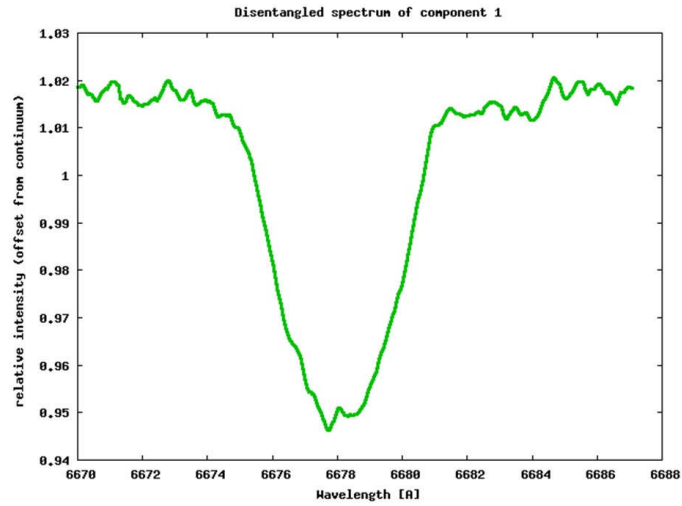
Hlavička souboru vstupních parametrů pro výpočet čáry Helia vypadá takto:

```
2 2 0 0 0 1 0 2 2 | key(1,...,5), k= Nr. of spectra>0, filter, plot
o 0 1 0 1 1 25.935952824 0.00001 | 96 Her, sum=109.77
o 0 2 01 1 1 43563.39 0.1 = PERIASTRON EPOCH
o 0 3 01 1 1 0.380 0.0100 = ECCENTRICITY
o 0 4 01 1 1 108.0 1.0 = PERIASTRON LONG.
o 0 5 01 1 1 100.0 1.0 = K1
o 0 6 01 1 1 1.05 0.01 = q = M2/M1, K2 = 58.896033264
o 3 1 0 1 1 365.256360000 .1 31 0 1 1 365.2422 1.
o 3 2 0 1 1 51547.520600000 10. 32 0 1 1 49722. 1.
o 3 3 0 1 1 .016710220 0.001 33 0 1 1 0.0167301 .000001
o 3 4 0 1 1 103.529416427 10. 34 0 1 1 376.706533780 2.
o 3 5 0 1 1 .001000000 .0001 35 0 1 1 .100000000 .02
o 3 6 0 1 1 .000046891 .000001 36 0 1 1 .003731583 .0003
o 3 7 0 1 1 .000009111 .00000001
x 0 0 0 0 0 0 0 0 | end of elements
```

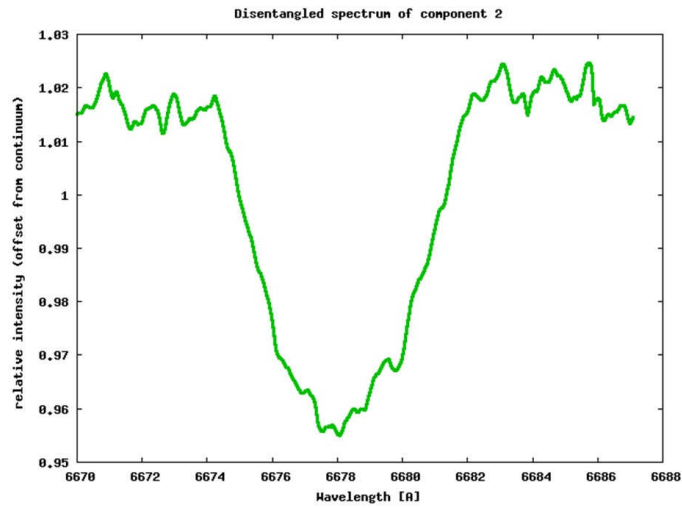
Výsledek rozplétání vypadá takto:



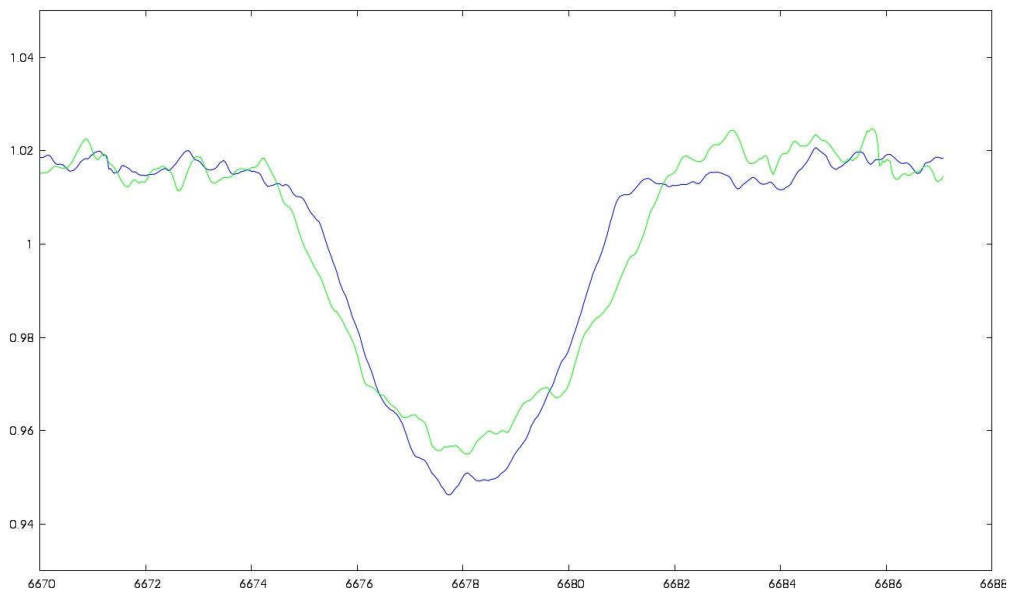
Obrázek č. 52: Výsledek rozplétání spekter, čára He I



Obrázek č. 53: Rozpletené spektrum, čára He I, první složka



Obrázek č. 54: Rozpletené spektrum, čára He I, druhá složka



Obrázek č. 55: Rozpletené spektrum, čára He I, porovnání čar zelená – 1. složka, modrá – 2. složka

14. Porovnání se syntetickým spektrem

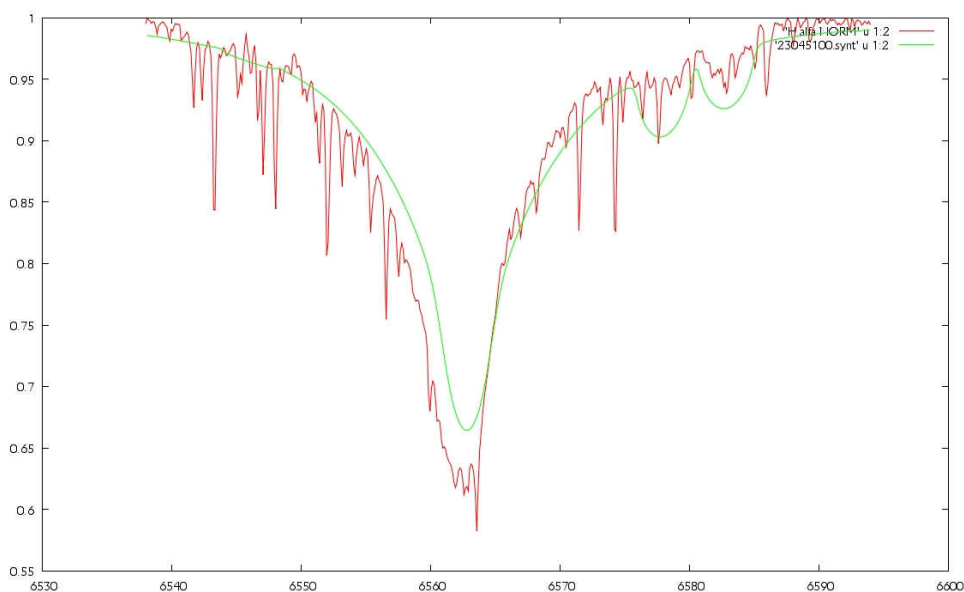
Syntetické spektrum je vlastně model vycházející z určitých předpokladů. Cílem počítačových simulací je najít takový optimální model, aby teoreticky spočtená spektra byla v co nejlepší shodě se spektrem pozorovaným.

Spočtená syntetická spektra, která ve své práci používám, jsem jsem převzal z disertační práce J. Janíka [1]. Tato spektra spočítal Ivan Hubený a vytvořil nový model pro NLTE čárově zakrytou atmosféru. Detailní informace o syntetických spektrech lze nalézt v [1], strana 53 a dále.

Abychom mohli porovnávat syntetická spektra s reálnými, je potřeba je nejprve upravit. Do syntetického spektra přidáme pomocí programu SPEFO vliv rotace a poté vyexportujeme do ASCII souboru tu část, která nás zajímá, tj. buď okolí čáry $H\alpha$ nebo He I, podobně jako jsme to dělali v kapitole 10.5. Také je potřeba upravit rozpletená spektra pomocí programu KORNO. Získaná data zaneseme do grafu a porovnáme. To nám umožní vybrat takové syntetické spektrum, které nejlépe odpovídá reálnému spektru.

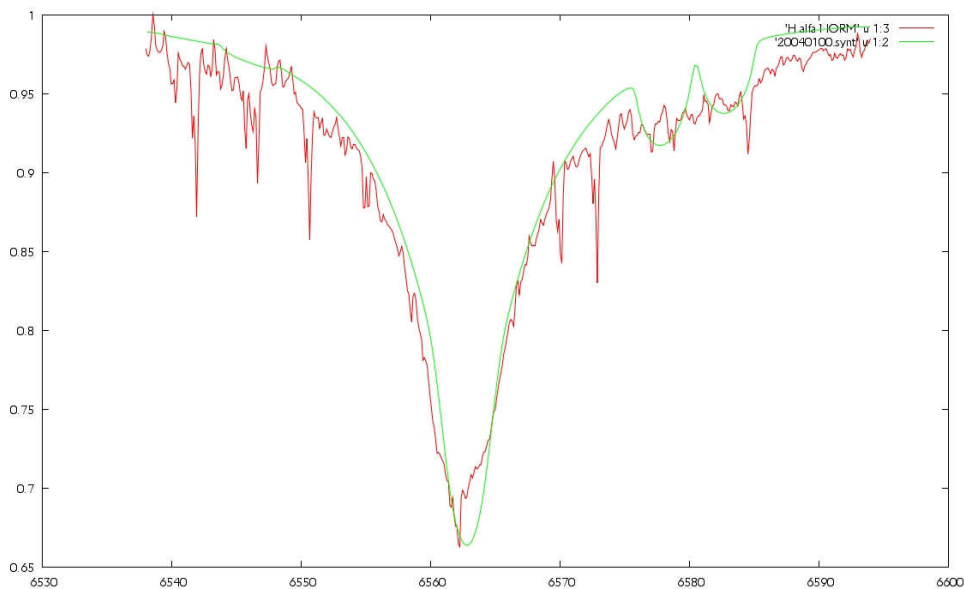
14.1. Čára $H\alpha$

Postupně jsem vyzkoušel dostupná syntetická spektra, až jsem našel nejlepší shodu:



Obrázek č. 56: Porovnání syntetického a rozpleteného spektra, 1. složka
zelená – syntetické spektrum, červená – rozpletené spektrum

Pro druhou složku jsem dostal tento výsledek:



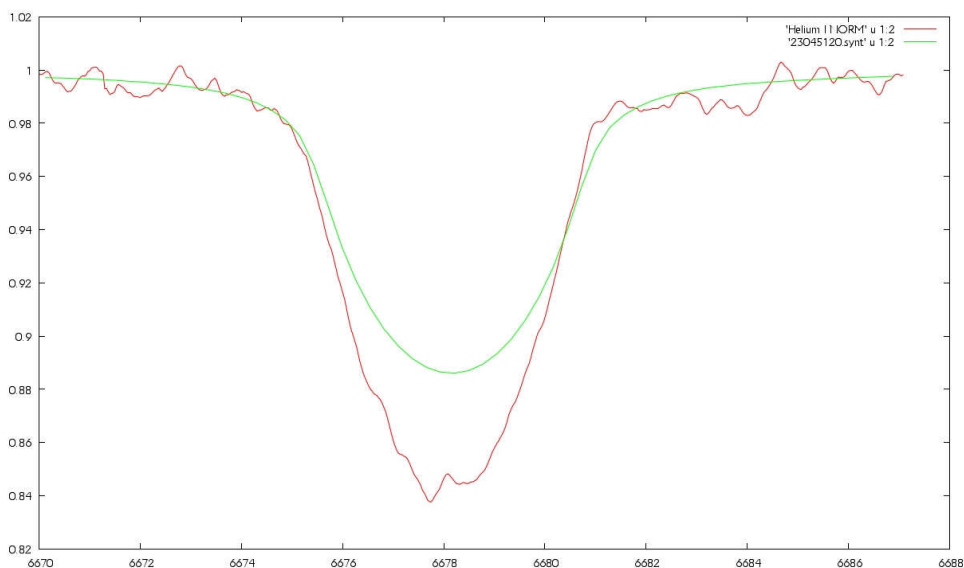
Obrázek č. 57: Porovnání syntetického a rozpleteného spektra, 1. složka
zelená – syntetické spektrum, červená – rozpletené spektrum

Pro 1. složku byla nalezena nejlepší shoda pro syntetické spektrum 23045, tj. $T_{\text{eff}} = 23000$ K a $\text{Log } G = 4,50$ a rotační rychlost $K = 100$.

Pro 2. složku byla nalezena nejlepší shoda pro syntetické spektrum 20040, tj. $T_{\text{eff}} = 20000$ K a $\text{Log } G = 4,00$ a rotační rychlost $K = 100$.

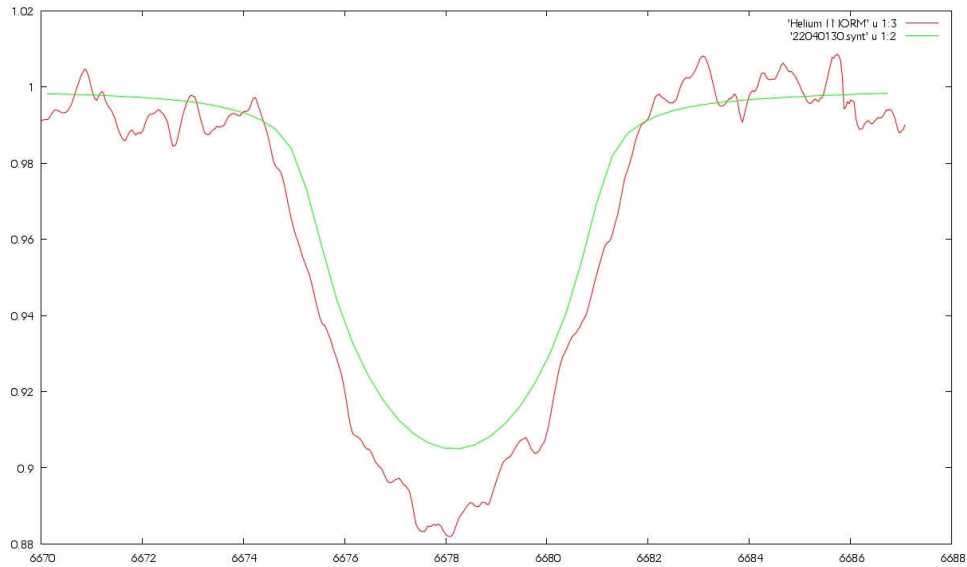
14.2. Čára He I

Podobně jako u čáry Ha jsem prošel dostupná syntetická spektra a vyzkoušel jsem různé rychlosti rotace. Nejlepší nalezenou shodu vidíte zde:



Obrázek č. 58: Porovnání syntetického a rozpleteného spektra, 1. složka

zelená – syntetické spektrum, červená – rozpletené spektrum



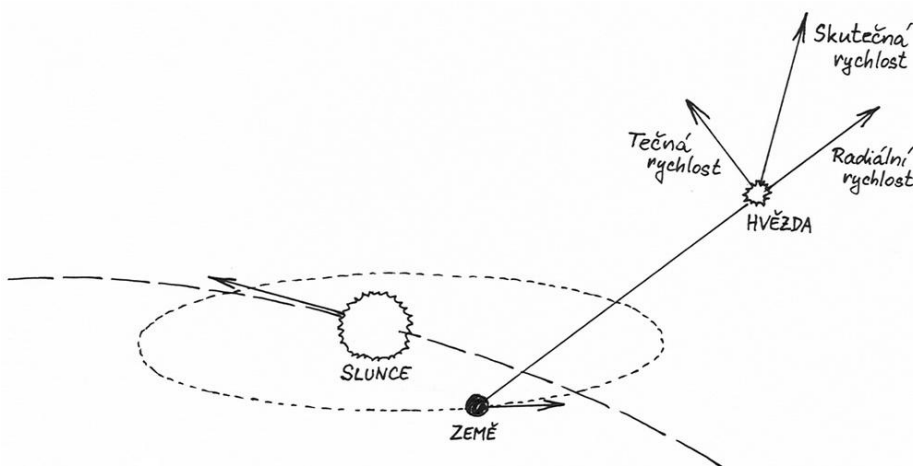
Obrázek č. 59: Porovnání syntetického a rozpleteného spektra, 2. složka
zelená – syntetické spektrum, červená – rozpletené spektrum

Pro 1. složku byla nalezena nejlepší shoda pro syntetické spektrum 23045, tj. $T_{\text{eff}} = 23000 \text{ K}$ a $\text{Log } G = 4,50$ a rotační rychlost $K = 120$.

Pro 2. složku byla nalezena nejlepší shoda pro syntetické spektrum 22040, tj. $T_{\text{eff}} = 22000 \text{ K}$ a $\text{Log } G = 4,00$ a rotační rychlost $K = 130$.

15. Určení radiální rychlosti

Radiální rychlost je složka prostorové rychlosti hvězdy ve směru zorného paprsku. Měří se na základě Dopplerova jevu z posuvu spektrálních čar. Radiální rychlost je kladná při vzdalování a záporná při přibližování hvězdy.



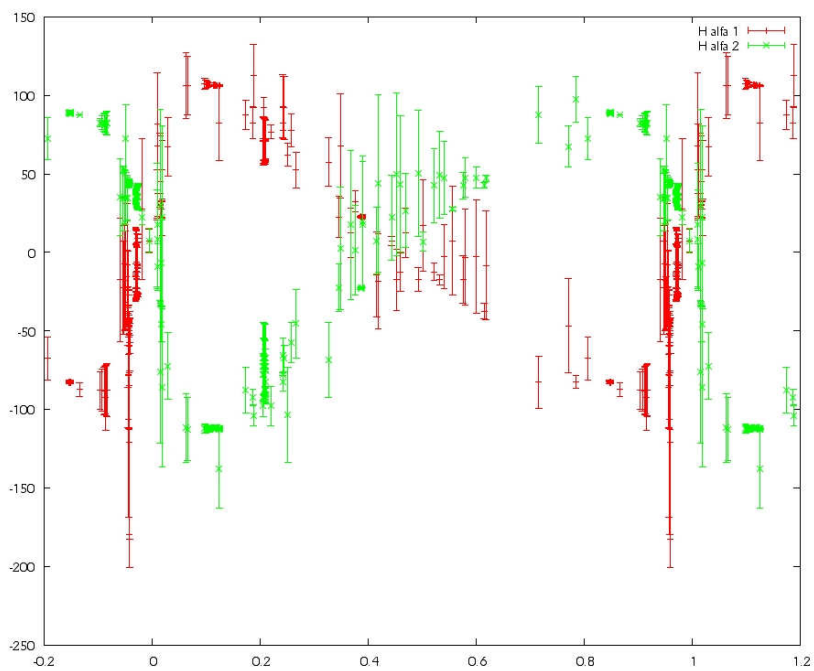
Obrázek č. 60: Radiální rychlost

Graf radiálních rychlostí složek vzhledem k fázi získáme zpracováním výstupního souboru z programu KOREL. Tento soubor zadáme do programu **faze.exe** a ten nám spočítá fázi, radiální rychlost a chybu pro jednotlivá pozorovací data.

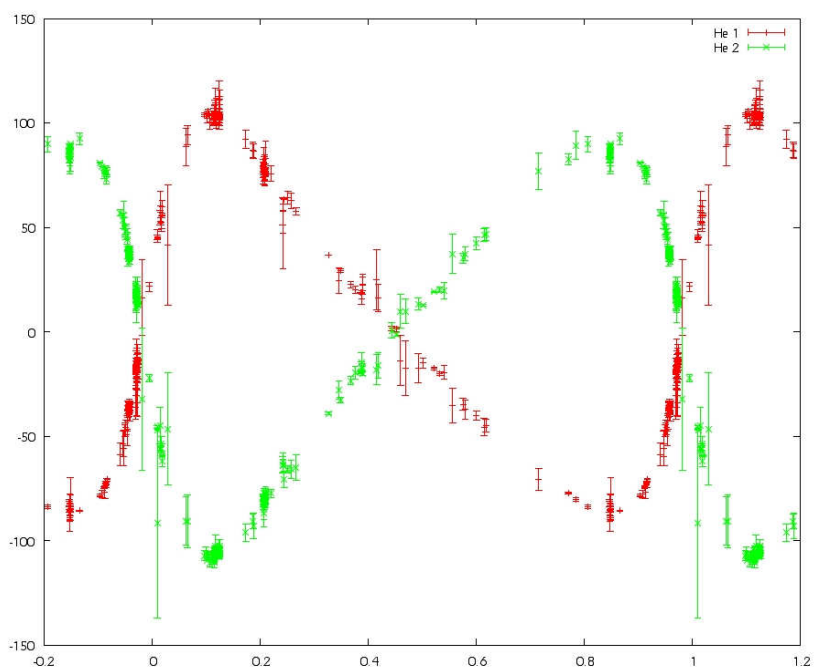
```
D:\ALFA\DIPLOMKA\ZPRACO-1\11FAZE-2\faze.exe
Calculation of linear phases in the range -0.2 to 1.2
Input file?
korelha.rv
Output file?
korelha2.out
How many dependent variables (1-20)?
4
  Period and epoch?
25.935951
43562.861_
```

Obrázek č. 61: Program na přepočítání HJD na fázi

15.1. Určení radiálních rychlostí z čar H α a He I



Obrázek č. 62: Křivka radiálních rychlostí pro H α



Obrázek č. 63: Křivka radiálních rychlostí pro He I

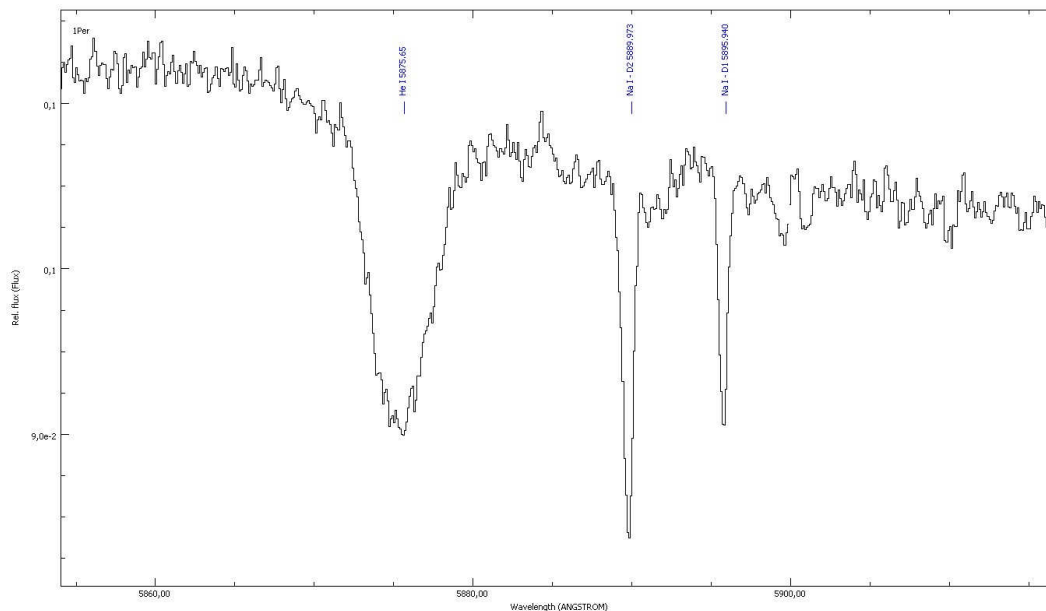
Parametry použité pro výpočet fáze:

P (d)	25.935951
$T_{\text{prim.min.}}$ (HJD-2 400 000)	43562.861

převzato z [2].

15.2. Určení radiální rychlosti z čar sodíku

Čáry sodíku jsou poměrně úzké, nicméně pomocí nich lze poměrně přesně stanovit posun spektra a tudíž i radiální rychlost.



Obrázek č. 64: Spektrální čáry sodíku ve spektru 1T00105, vyhlazeno funkcí smooth

Pomocí programu SPEFO jsem proměřil čáry sodíku ve spektru s tabelovanými hodnotami. Použil jsem vytvořený soubor na .stl:

```
5889.950 1.0 atm Na
5895.920 1.0 atm Na
```

Postup je shodný s postupem v kapitole 12.3, proto jej zde nebudu detailněji popisovat. Zpracoval jsem nová spektra z Ondřejova a z Toruně a získal jsem tyto výsledky:

Spk	HDJ	RV	RMS
1O10000	52691,8390	-26,493	0,765
1O10001	52692,8086	-26,657	0,506
1T00100	55260,2222	-12,007	1,543
1T00101	55260,2445	-5,317	4,081
1T00102	55260,2620	1,841	3,153
1T00103	55260,3686	-7,267	0,423
1T00104	55260,3843	-8,760	1,693
1T00105	55260,4004	-5,171	0,038
1T00106	55260,4296	-4,110	2,694
1T00107	55260,4443	-7,793	0,307
1T00108	55260,4592	-3,620	1,003
1T00112	55266,2575	-6,879	0,316
1T00113	55266,2717	-6,765	0,431
1T00114	55266,2867	-6,534	1,122

Tabulka č. 5: Měření radiální rychlosti z posunu čar sodíku

Jak je vidět, jsou některá měření zatížena značnou chybou. To je způsobeno nízkou kvalitou spekter, resp. vysokým šumem. Když se zaměříme pouze na hodnoty s nízkou chybou, tj. na dostatečně kvalitní spektra:

1T00103	55260,3686	-7,267	0,423
1T00105	55260,4004	-5,171	0,038
1T00107	55260,4443	-7,793	0,307
1T00112	55266,2575	-6,879	0,316
1T00113	55266,2717	-6,765	0,431
Průměr:		-6,775	0,303

Tabulka č. 5: Měření radiální rychlosti z posunu čar sodíku, vybrané hodnoty

tak vidíme, že hodnoty radiální rychlosti nabývají přibližně stejné hodnoty. Podle databáze SIMBAD [E6], je radiální rychlost:

Radial velocity / Redshift / cz : V(km/s) -3 [5]

Rozdíl mezi hodnotou zjištěnou z posunu čar sodíku a z databáze Simbad je patrně způsoben vysokým šumem, ale i tak se nám podařilo přiblížit se tabelované hodnotě.

16. Závěr

Ve své práci jsem se zabýval studiem hvězdy ze souhvězdí Persea s katalogovým označením V436 Per. Jedná se o spektroskopickou dvojhvězdu, která se skládá ze dvou téměř identických hvězd. Dalším důležitým faktem je skutečnost, že se jedná o zákrytovou dvojhvězdu, tzn. že oběžná rovina obou složek je orientována tak, že při pohledu ze Země se obě složky navzájem pravidelně překrývají. Díky změnám světelného toku můžeme přesně stanovit oběžnou dobu a další parametry systému.

V úvodní teoretické části jsem zpracoval základní poznatky potřebné ke správnému pochopení analýzy spektrálních čar, principu získávání těchto spekter a jejich následnému zpracování. V praktické části jsem si osvojil analýzu spekter pomocí běžně používaných programů jako jsou Prekor6, SPEFO a KOREL. Při práci jsem dospěl k závěru, že celá řada úkonů prováděných ručně by šla zautomatizovat pomocí úprav používaného softwaru a celý proces zpracování by se mohl značně zjednodušit. Také jsem se zabýval vlivem atmosféry na spektra a analýzou tzv. telurických čar ve spektru.

Analýza spektrální čáry $H\alpha$ je zatížena poměrně velkým šumem a výsledky nevyšly podle očekávání. Naproti tomu analýza spektrální čáry He I se vydařila a rozpletené čáry i graf radiálních rychlostí vycházejí mnohem lépe. Porovnání se syntetickým spektrem se podařilo lépe u vodíkové čáry, ale u heliové jsem nedosáhl tak dobré shody. Patrně to bude způsobeno tím, že nemám k dispozici správná syntetická spektra.

Rovněž graf průběhu radiální rychlosti vychází mnohem lépe u heliové čáry než u vodíkové. Pravděpodobně to bude opět způsobeno tím, že v okolí vodíkové čáry se nachází celá řada rušivých (telurických) čar. Křivka radiálních rychlostí pro helium je ve velmi dobré shodě s [1] a s [2].

Na závěr jsem proměřil absorpci na sodíkovém dubletu a ve směru hvězdy 1 Per vychází hodnota radiální rychlosti přibližně $-6,78$ km/s. Databáze Simbad uvádí hodnotu radiální rychlosti -3 km/s. Protože však údaj v databázi Simbadu je mnohem starší a naše měření byla pořízena na modernějším spektrografu, spíše bych se přikláněl k naší hodnotě.

Pro dosažení lepších výsledků by bylo vhodné pořídit další spektra, pokud možno za lepších podmínek a v lepší kvalitě, aby bylo možné dosáhnout přesnějších výsledků.

Reference

- [1] Janík, J.: Komplexní studium V436 Per, disertační práce, 2003, PřF MU, Brno
- [2] Janík, J.; Harmanec, P.; Lehmann, H.; Yang, S.; Božić, H.; Ak, H.; Hadrava, P.; Eenens, P. R. J.; Ruždjak, V.; Šudar, D.; Hubený, I.; Linnell, A. P.: Search for forced oscillations in binaries, 2003, A&A, 408, 611
- [3] Vanýsek V.: Základy astronomie a astrofyziky, Academia Praha 1980
- [4] Šolc M., Švestka J., Vanýsek V.: Fyzika hvězd a vesmíru, SPN Praha 1983
- [5] Tennyson J.: Astronomical spectroscopy, Imperial College Press, London 2005
- [6] Robinson K.: Spectroscopy: The Key to the Stars, Springer, London 2007
- [7] Irwin J. A.: Astrophysics: Decoding the Cosmos, John Wiley & Sons, 2007
- [8] Catanzaro, G.: High resolution spectral atlas of telluric lines, Astrophysics and Space Science **257**: 161–170, 1998

Elektronické publikace

- [E1] Hadrava, P. (<http://www.asu.cas.cz/~had/korel.html>): KOREL User's guide
- [E2] Hadrava, P. (<https://stelweb.asu.cas.cz/vo-korel>): VO-KOREL Web Service
- [E3] Šlechta, M. (<http://pleione.asu.cas.cz/~slechta/spektra/vlivy/vlivy.html>): O různých vlivech na pozorování
- [E4] Šlechta, M. (<http://pleione.asu.cas.cz/~slechta/OES/pro-ian/>): Ondřejovský ešletový spektrograf
- [E5] Šlechta, M. (<http://pleione.asu.cas.cz/~slechta/ccd/cosmic/cosmic.html>): Co jsou "cosmics (kosmiky)"
- [E6] SIMBAD, (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-fid>)
- [E7] Vizier, (<http://vizier.u-strasbg.fr/>)