



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čáry mezihvězdného prostředí
ve spektru hvězdy σ Ori E

Vladimír Domček

Vedúci bakalárskej práce:
prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Brno 2014

Bibliografický záznam

Autor: Vladimír Domček
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Čáry mezihvězdného prostředí ve spektru hvězdy sigma Ori E

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Akademický rok: 2013/14

Počet stran: 7+43

Klíčová slova: mezihvězdná látka, spektroskopie, OB asociace, proměnnost

Bibliografický záznam

Autor: Vladimír Domček
Prírodovedecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretickej fyziky a astrofyziky

Názov práce: Čiary medzihviezdneho prostredia v spektre hviezdy σ Ori E

Študijný program: Fyzika

Študijný obor: Astrofyzika

Vedúci práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Akademický rok: 2013/14

Počet strán: 7+43

Kľúčové slova: medzihviezdna látka, spektroskopia, OB asociácia, premennosť

Bibliographic entry

Author: Vladimír Domček
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of thesis: Lines of interstellar medium in spectra of star σ Ori E

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: prof. Mgr. Jiří Krτίčka, Ph.D.

Academic Year: 2013/14

Number of Pages: 7+43

Keywords: interstellar medium, spectroscopy, OB association, variability

Abstrakt

V předložené práci studujeme mezihvězdnou látku ve směru hvězdy σ Ori E. Teoretická část se zabývá různými podobami mezihvězdné látky, základními pojmy ze spektroskopie a asociací Orion OB, kde se vybraná hvězda nachází. V praktické části se věnujeme samotnému zpracování spektra hvězdy σ Ori E.

Zaměřujeme se na proměnnost spektrálních čar mezihvězdného prostředí co se týče polohy minima čáry a její pološířky. Tuto proměnnost studujeme v průběhu rotační periody hvězdy.

Klíčová slova: mezihvězdná látka, spektroskopie, asociace OB, proměnnost

Abstrakt

V predloženej práci študujeme medzihviezdnú látku v smere hviezdy σ Ori E. Teoretická časť sa zaoberá rôznymi podobami medzihviezdnej látky, základnými pojмами zo spektroskopie a asociáciou Orion OB, kde sa vybraná hviezda nachádza. V praktickej časti sa venujeme samotnému spracovaniu spektra hviezdy σ Ori E.

Zameriavame sa na premennosť spektrálnych čiar medzihviezdného prostredia čo sa týka polohy minima čiary a jej pološířky. Túto premennosť študujeme v priebehu rotácie hviezdy.

Kľúčové slova: medzihviezdna látka, spektroskopia, asociácia OB, premennosť

Abstract

In presented work we study the interstellar medium in the direction of the star σ Ori E. Theoretical part deals with different forms of interstellar medium, basic concepts from spectroscopy and with Orion OB association, where the studied star is located. Practical part is devoted to the processing of the spectra of star σ Ori E.

We focus on the variability of spectral lines of interstellar medium with regard to the position of minimum and the line half width. This variability is studied in dependence of rotational period of star.

Keywords: interstellar medium, spectroscopy, association OB, variability



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Vladimír Domček**

Studijní program: **Fyzika**

Studijní obor: **Astrofyzika**

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PřF MU PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje diplomovou práci s tématem:

Čáry mezihvězdného prostředí ve spektru hvězdy sigma Ori E

Interstellar lines in the spectra of the star sigma Ori E

Oficiální zadání: Hvězda sigma Ori E je součástí mladé hvězdokupy v souhvězdí Orionu. Tato hvězda byla opakovaně studována v ultrafialovém oboru družicí IUE. V jejím ultrafialovém spektru se nacházejí četné úzké čáry přisuzované mezihvězdnému prostředí. Cílem bakalářské práce je studium těchto čar. Jednotlivé čáry budou ve spektru identifikovány. Pro vybrané čáry bude studována jejich možná proměnnost, zejména proměnnost radiální rychlosti, případně i proměnnost jejich ekvivalentní šířky. Literatura: INES Principal Centre, <http://ines.vilspa.esa.es/ines/> Z. Mikulášek, J. Krtička: Fyzika horkých hvězd, MU, 2007

Jazyk závěrečné práce: slovenština

Vedoucí bakalářské práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Konzultant:

Datum zadání bakalářské práce: listopad 2013

V Brně dne 18. 11. 2013

von Unge
prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky

Zadání bakalářské práce převzal dne:

17. 12. 2013

Podpis studenta

Domček

Pod'akovanie

Na tomto mieste by som sa chcel predovšetkým poďakovať svojmu vedúcemu prof. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D za jeho cenné rady, vedenie, ochotu a trpezlivosť, ktorú so mnou mal. Ďalej by som rád poďakoval Mgr. Lenke Zychovej za rady a motiváciu a spolužiakom za spoluprácu v priebehu celého štúdia. Nemenšia vďaka patrí rodičom, celej rodine i priateľom za ich pretrvávajúcu podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 2014

.....
Vladimír Domček

Obsah

Úvod	10
1 Medzihviezdna látka	12
1.1 História pozorovania	12
1.2 Plynová zložka	13
1.2.1 H I oblasti	13
1.2.2 H II oblasti	14
1.2.3 Molekulové mračná	15
1.3 Prachová zložka	15
1.3.1 Oblaky prachu	16
1.3.2 Medzihviezdna extinkcia	17
1.4 Iné formy medzihviezdnej látky	18
2 Spektroskopia	20
2.1 Spektrum	21
2.2 Vznik spektrálnych čiar	22
2.3 Profil spektrálnej čiary	22
2.4 Rozšírenie spektrálnych čiar	23
2.4.1 Prirodzené rozšírenie	23
2.4.2 Rozšírenie tlakom	24
2.4.3 Tepelné dopplerovské rozšírenie	24
2.5 Vyjadrenie fitovacej funkcie	25
3 Orion OB asociácia	26
3.1 Štruktúra OB1 asociácie	26
3.2 Medzihviezdna látka v Orione	27
3.3 σ Ori E	30

4 Spracovanie dát	32
4.1 Identifikácia spektrálnych čiar	33
4.2 Fitovanie spektrálnych čiar	35
4.3 Radiálne rýchlosti	37
4.4 Si II, $\lambda_0 = 1193,290 \text{ \AA}$	38
4.5 S II, $\lambda_0 = 1250,584 \text{ \AA}$	39
4.6 S II, $\lambda_0 = 1253,811 \text{ \AA}$	40
4.7 S II, $\lambda_0 = 1259,519 \text{ \AA}$	41
4.8 Si II, $\lambda_0 = 1260,422 \text{ \AA}$	42
4.9 Si II, $\lambda_0 = 1304,370 \text{ \AA}$	43
4.10 Fe II, $\lambda_0 = 1608,45083 \text{ \AA}$	44
4.11 Al II, $\lambda_0 = 1670,7874 \text{ \AA}$	45
4.12 Diskusia	46
Záver	47
Literatúra	48

Úvod

Človek už odpradáva vzliada k nočnej oblohe. Okrem jasných svietiacich bodov postrehol, že v niektorých častiach oblohy sa nachádza väčšie množstvo hviezd, ale i tmavšie mračná. Tieto mračná neskôr skúmal a dnes už vieme, že ich tvorí nemálo podstatná časť našej Galaxie - medzihviezdna látka.

Je to veľmi riedka hmota v priestoroch medzi hviezdami v našej ale aj v ostatných galaxiách. Je tvorená plynom, prachom a molekulami, ale zaráta sa do nej aj elektromagnetické žiarenie a magnetické polia. Svojím riedkym rozložením v priestore sa hviezdám príliš nepodobá, napriek tomu má zásadný význam v ich živote. Je dôležitá pri ich tvorbe a dá sa povedať, že sa z nej hviezdy samotné rodia. Na konci ich života však nezostávajú medzihviezdnej látke nič dlžné. V záverečných štádiách hviezd sa časť látky môže vrátiť do medzihviezdného prostredia. V prípade menej hmotných hviezd sa tak deje napríklad vznikom planetárnych hmlovín, medzi ktoré patrí napríklad známa Prstencová hmlovina v Lýre. Z hmotnejších hviezd vznikajú tzv. pozostatky zo supernov, ktoré prispievajú do medzihviezdnej látky ťažšími prvkami. Takýmto pozostatkom je Krabia hmlovina v súhvezdí Býka.

V našej práci sa venujeme medzihviezdnej látke, ktorá sa nachádza v smere hviezdy σ Ori E. V teoretickej časti rozoberáme formy a procesy nastávajúce v medzihviezdnej látke, niektoré pojmy zo spektroskopie a základné poznatky o OB asterizme, v ktorom sa hviezda nachádza. V získanom spektre tejto hviezdy identifikujeme čiary medzihviezdného prostredia a ďalej študujeme ich prípadnú premennosť, čo sa týka radiálnych rýchlosti či pološírky čiar.



Obr. 1: Prstencová hmlovina v Lýre (M57). Málohmotné hviezdy vo svojom konečnom štádiu odhadujú svoju obálku do priestoru vytvárajúc tak objekty zvané planetárne hmloviny. V strede takejto hmloviny zvyčajne vidíme bieleho trpaslíka. Foto: HST [e₁]



Obr. 2: Krabia hmlovina (M1). Známi pozostatok po supernove, ktorá vybuchla v roku 1054. Má nepravidelný tvar a v jej strede sa nachádza pulzar, ktorý túto hmlovinu zásobuje energiou. Foto: HST [e₂]

Kapitola 1

Medzihviezdna látka

V nasledujúcej kapitole bolo čerpané zo zdrojov: Mikulášek, Krtička, 2013; Dyson, Williams, 1997; Vanýsek, 1980; Spitzer, 1978

1.1 História pozorovania

Myšlienka látky nachádzajúcej sa v medzihviezdnom prostredí nie je jedna z najmladších. Astronómom trvalo dlho, než sa im podarilo poskytnúť niektoré dôkazy, ktoré by ukazovali v prospech takejto myšlienky.

Jeden z prvých dôkazov poskytol v polovici 19. storočia ruský astronóm nemeckého pôvodu Friedrich Struve. Štatistickými metódami ukázal, že počet slabo viditeľných hviezd na hviezdnej oblohe by mal byť väčší, než ten pozorovaný. Z toho vyplynulo, že musí dochádzať k pohlcovaniu svetla v priestore. Ďalšími pioniermi svojim bádáním podporujúci existenciu medzihviezdnej látky boli na začiatku 20. storočia americký astronóm Edward Pickering a nemecký astronóm Johannes Hartmann. Obaja pozorovali dvojhviezdy, pričom si zaznamenávali ich spektrá. Všimli si v nich úzku spektrálnu čiaru, ktorá medzi ostatnými nemenila svoju polohu. To bolo v rozpore s ich poznatkami, pretože ak by spektrálna čiara pochádzala z jednej z hviezd, mala by byť ovplyvnená doplerovským posuvom. Z toho Hartmann usúdil, že sa v priestore medzi nami a danou dvojhviezdou nachádza oblak materiálu, ktorý je za túto spektrálnu čiaru zodpovedný. Jednalo sa o čiaru ionizovaného vápniku Ca II a jeho úsudok sa tak ukázal byť správny.

Hlavný dôkaz o existencii medzihviezdnej látky prišiel až v roku 1930 od astronóma švajčiarskeho pôvodu, Roberta Trümlera. Vo svojom výskume premeriaval jasnosti a uhlové rozmery veľkého počtu otvorených hviezdokop. Všimol si, že fotometrické vzdialenosti určené z jasnosti hviezdokop a vzdialenosti odhadnuté z ich uhlového priemeru sa od seba systematicky líšia. Jediným možným vysvetlením bola medzihviezdna extinkcia. Trümpler

odhadol, že tá je zodpovedná za zoslabenie svetla objektov vzdialených 1 kpc v priemere o 0,5 mag. Hľadanie dôkazov sa týmto skončilo a medzihviezdna látka sa začala brať ako prirodzená súčasť medzihviezdného priestoru.

1.2 Plynová zložka

Hmotnostne najvýznamnejšou formou medzihviezdnej látky je jej plynová zložka. Chemické zloženie sa podobá zloženiu povrchových vrstiev hviezd. Na tisíc atómov vodíku tak pripadá 100 atómov hélia a jeden atóm ťažších prvkov. Vodík, ktorý má najväčšie zastúpenie, sa vyskytuje hneď v niekoľkých formách. Jedná sa konkrétne o neutrálny vodík, ktorý tvorí H I oblasti, ionizovaný vodík tvoriaci H II oblasti a vodík v podobe dvojatómovej molekuly vyskytujúci sa prevažne v molekulových mračnách. Hélium má tiež významné zastúpenie, ale stretávame sa s ním už len v atomárnej podobe.

Vo vizuálnej časti spektra je možné detekovať, pomimo čiar vodíku a hélia, niekoľko desiatok čiar ďalších prvkov vyskytujúcich sa v neutrálnom ale i ionizovanom stave. Medzi tie najvýraznejšie čiary patria hlavne čiary ionizovaného vápniku a čiary sodíku. V mnohých prípadoch sú tieto čiary rozštiepené. Príčinou tohoto rozštiepenia je existencia rôznych mračien, ktoré majú vzhľadom k nám rôznu radiálnu rýchlosť.

Existencia medzihviezdných absorpčných čiar nám naznačuje, že medzihviezdny plyn sa chová ako rozšírená hviezdna atmosféra. Porovnaním intenzít absorpčných čiar Ca II a Ca I si môžeme všimnúť prekvapivú skutočnosť. Pomery intenzít sú takmer rovnaké ako v atmosférach hviezd spektrálneho typu F. Nezvyčajnosť tohto faktu je práve v tom, že intenzita žiarenia v medzihviezdnom priestore vo vzdialenosti približne 1 pc je 10^{-16} -krát nižšia, než intenzita v okolí priemernej hviezdy. Ionizácia medzihviezdnej látky teda bude prebiehať iným spôsobom, než by prebiehalo v hviezde za predpokladu termodynamickej rovnováhy. Vysvetlenie je však jednoduché: hustota žiarenia je v medzihviezdnej látke síce nižšia približne 10^{-16} -krát, no koncentrácia voľných elektrónov v medzihviezdnom priestore je menšia približne o rovnaký faktor. Tým sa úmerne počtu rekombinácií zníži počet ionizácií za jednotku času. Platia tu teda odlišné podmienky, ale stupeň ionizácie nadobúda podobné hodnoty.

1.2.1 H I oblasti

H I oblasti sú rozsiahle regióny, v ktorých sa medzihviezdny vodík nachádza v neutrálnom stave. Vodík v týchto oblastiach nie je pozorovateľný v optickom obore spektra. Je to z toho dôvodu, že v týchto oblastiach sa nenachádza dosť silný zdroj žiarenia na excitáciu vodíku. Potrebná energia je 10,2 eV, čomu zodpovedá žiarenie s vlnovou dĺžkou 121,6 nm.

Existuje iná oblasť spektra, v ktorej je neutrálny vodík pozorovateľný. Je to rádiová oblasť. Z kvantovej mechaniky vieme, že častice majú spin. Vodík obsahuje práve 2 častice so spinom - protón a elektrón. V atóme vodíka môžu byť častice usporiadané so súhlasným spinom (vyššia energia) alebo nesúhlasným (nižšia energia). Interakcia týchto spinov spôsobuje rozštiepenie základnej hladiny vodíka s energetickým rozdielom $E = 6 \cdot 10^{-6}$ eV, čo zodpovedá prechodu, pri ktorom je vyžiarený fotón s vlnovou dĺžkou $\lambda = 21,105$ cm ($\nu = 1420,4$ MHz).

Pravdepodobnosť prechodu za sekundu je približne 10^{-14} a teda táto čiara patrí medzi typicky zakázané. Dôvod, prečo napriek tomu túto čiaru pozorujeme, sa skrýva v hustote týchto oblastí. Priemerná hustota je tu jeden atóm na cm^3 . Z toho vyplýva, že vodík vydrží dostatočne dlho bez zrážky, aby dokázal prejsť vyžiarovaním fotónu do základného stavu. Ak si zoberieme úzky stĺpec so základňou 1 cm^2 dĺžky 1 pc , z hustoty môžeme odvodiť, že sa v ňom nachádza približne 10^{18} atómov schopných vyžiariť fotón. Pri životnosti atómu vo vyššom stave 10^{14} s nám vyplynie, že každú sekundu môže byť vyžiarených 10^4 fotónov.

Výhoda čiary neutrálneho vodíku v rádiovkej časti spektra je v tom, že naša Galaxia je pre ňu relatívne priehľadná. Z posuvu čiary môžeme získať cenné informácie o výskyte H I oblastí v Galaxii, a teda v konečnom dôsledku informácie o štruktúre Galaxie.

1.2.2 H II oblasti

H II oblasti sú regióny ionizovaného vodíka, ktoré sa nachádzajú v okolí žiarivých hviezd spektrálneho typu O a B. Tieto hviezdy majú maximum vyžarovania v UV oblasti, čo znamená, že ich žiarenie je dostatočne energetické na to, aby dokázalo ionizovať materiál vo svojom okolí. V prípade vodíka má ionizačná energia hodnotu $E = 13,6$ eV, čo zodpovedá žiareniu s vlnovou dĺžkou $\lambda = 91,2$ nm.

Ultrafialové žiarenie spôsobí uvoľnenie elektrónu z vodíka, pričom ten sa po určitej dobe zachytí na ďalšom atóme vodíka, tentokrát už ionizovanom. Zachytenie sa nazýva rekombinácia a je sprevádzané vyžiarovaním fotónu. Tento proces sa opakuje, až kým sa ne-realizuje rekombinácia tzv. kaskádovým procesom. Elektrón sa zachytí na vyššej hladine a postupne zostupuje na nižšie hladiny. Každý takýto zostup je sprevádzaný vyžiarovaním fotónu s energiou zodpovedajúcou energiovému rozdielu daných hladín. Fotóny vyžiarené kaskádovým procesom pri prechode oblasťami ionizovaného vodíka s atómami až na fotóny Lymanovej série už ďalej neinteragujú a veľmi jednoducho ich opúšťajú. Vznikajú spektrálne čiary v tzv. sériach. Prechodmi na druhú hladinu vzniká Balmerova séria, prostredníctvom ktorej vznikajú fotóny aj v optickej časti spektra. Popísaný proces nám pre prípad pohltienia celej časti UV spektra mračnom dokáže z intenzity spektrálnych čiar prezradiť približnú teplotu hviezdy.

Ak sa v okolí týchto žiarivých hviezd nachádza dostatočné množstvo materiálu nastáva

situácia, pri ktorej región ionizovaného vodíka obaľuje oblasť neutrálneho vodíka.

1.2.3 Molekulové mračná

Vodík ako aj iné prvky nezostávajú len vo svojej atomárnej podobe. Môžu sa spájať do zložitejších molekúl, ktoré vo vesmíre tvoria objekty zvané molekulové mračná. Jedná sa o relatívne husté a chladné gravitačne viazané objekty. Hlavné zastúpenie má molekulárny vodík H_2 , ktorý je v optickom a rádiovom obore spektra len veľmi ťažko detekovateľný. Práve preto sa tieto mračná detekujú na základe iných, takzvané indikačných molekúl, vyskytujúcich sa v mračnách. Takýmto príkladom je molekula CO, ktorá má maximum vyžarovania na vlnovej dĺžke 2,6 mm.

Detekcia väčšiny molekúl prebieha práve v rádiovom obore spektra. Žiarenie v okolí molekulových mračen nebýva dosť silné na to aby molekuly excitovalo na vyšší stav. Je však dostatočne silné na zmenu rotačného a vibračného stavu molekúl, na ktorú je potrebná energia rádovo $10^{-5} - 10^{-2}$ eV. Frekvencie základných rotačných prechodov dvojatómových molekúl zložených z najčastejšie vyskytujúcich sa ťažších prvkov vo vesmíre (C,N,O,S) väčšinou ležia v rozmedzí 50 – 150 GHz. Týmto frekvenciám prislúchajú vlnové dĺžky, na ktorých molekuly detekujeme a to 2 – 6 mm. Pri vibračných prechodoch sa jedná o centimetrové až decimetrové vlny.

Existujú molekulové mračná, ktoré si svojimi charakteristikami vyžiadali vlastné označenie. Ide o obrie molekulové mračna (Giant Molecular Clouds). Sú to najväčšie súvislé gravitačne viazané objekty vo vesmíre a v našej Galaxii ich existuje približne dvetisíc. Majú vlastnú štruktúru, rozprestierajú sa do rozmerov až 160 ly a hmotnostne sa pohybujú v rádoch 10^5 až $10^6 M_{\odot}$. Typická vnútorná teplota GMC je 20 K a koncentrácia atómov, molekúl je okolo 100 častíc/cm³. V týchto mračnách sa rodia nové hviezdy. Deje sa tak v cykloch, pričom za jeden cyklus vznikne približne tucet hviezd. V extrémnych prípadoch, ako je napríklad zrážka dvoch galaxií sa môže naraz zrodiť tisíce až milióny nových hviezd. Takto môžu vznikať guľové hviezdokopy.

1.3 Prachová zložka

Medzihviezdny prach je tvorený predovšetkým kremičitanmi, amorfným uhlíkom, polycyklickými aromatickými uhlovodíkmi a v menšom množstve sa vyskytuje aj ľad a grafit. Práve grafit, ktorý sa prejavuje extinkciou na 218 nm, je prekvapením, pretože doteraz nie je jasné, akými procesmi sa v medzihviezdnej látke dokázal uhlík usporiadať do prísnej grafitovej štruktúry.

Ďalšou zaujímavou skutočnosťou je mierna polarizácia svetla, ktoré k nám prichádza z oblastí výskytu medzihviezdného prachu. Táto polarizácia dosahuje len niekoľko percent,



Obr. 1.1: Prachové mračno Konská hlava v IF. Foto: HST [e₃]



Obr. 1.2: Reflexné hmloviny v okolí hviezdokopy Plejády (M45). Foto: Roger Gendler [e₄]

pričom ale naznačuje, že prachové zrná majú mierny podlhovastý tvar a sú usporiadané podľa siločiar magnetického poľa Galaxie. V hustých oblastiach je počet prachových zrn 10^{-9} cm^{-3} , zatiaľ čo v relatívne čistom prostredí je to 10^{-13} cm^{-3} .

Vzhľadom na riedkosť rozloženia atómov v medzihviezdnom priestore prachové častice pravdepodobne nevznikajú samovoľnou kondenzáciou. Správne podmienky pre ich vznik by sme mohli nájsť v atmosférach chladných obrích hviezd spektrálneho typu M a uhlíkových hviezd typu C. Plynné pary tu môžu kondenzovať do podoby zrn a následne sú tlakom žiarenia vypudené do priestoru. Inou možnosťou vzniku je výbuch rôznych typov supernov.

1.3.1 Oblaky prachu

Rovnako ako plynná zložka, ani prachová nie je rozložená v priestore rovnomerne. Sústreďuje sa do oblakov, ktoré sú umiestnené predovšetkým na vnútornej časti vyvinutejších špirálnych ramien v rovine Galaxie. Prejavujú sa extinkciou svetla vzdialenejších objektov. Na oblohe ich môžeme vidieť ako temné mračná, napríklad hmlovina Konská hlava.

V špeciálnom prípade, a to že sa v okolí nachádza jasná hviezda, môže oblak sám žiariť rozptýleným svetlom tejto hviezdy. Spektrum takejto hmloviny sa od spektra hviezdy v zásade nelíši až na to, že sa lepšie rozptýľuje krátkovlnná zložka žiarenia. Z toho dôvodu je reflexná hmlovina modrejšia než samotná hviezda. Pekným príkladom sú reflexné hmloviny obklopujúce hviezdokopu Plejády.

Oblaky prachu môžu nadobúdať rôzne rozmery od malých obláčikov s priemerom 1 pc

až po mračná s veľkosťou 200 ly. Práve tie najmenšie sú však najhustejšie a nazývajú sa Bokove globule. Nedávne výskumy dokázali, že vo vnútre týchto globúl sa nachádzajú najmladšie hviezdy.

1.3.2 Medzihviezdna extinkcia

Z predchádzajúcich podkapitol už vieme, že medzihviezdna látka pôsobí na ňou prechádzajúce žiarenie. Časť žiarenia sa rozptýli, iná sa pohltí. Celkovému zoslabeniu sa hovorí medzihviezdna extinkcia.

Predpokladajme, že máme prostredie s koncentráciou častíc n s účinným prierezom σ . Do tohto prostredia vstupuje rovnobežný zväzok s hustotou žiarenia I_0 , ktorý sa po prejení dráhy h zoslabí na hodnotu I . Toto zoslabenie sa dá popísať rovnicou

$$I = I_0 e^{-\tau}. \quad (1.1)$$

τ je optická hrúbka prostredia. Vyjadruje sa ako

$$\tau = \int n \sigma ds, \quad (1.2)$$

pričom ak je $\tau < 1$, vrstva sa označuje ako opticky tenká a pre hodnoty $\tau > 1$ ide o opticky hrubú vrstvu. V prípade homogénneho prostredia môžeme n a σ vyňať pred integrál a dostávame

$$\tau = n \sigma \int ds = n \sigma h. \quad (1.3)$$

Optická hrúbka je v tomto priblížení priamo úmerná prejdenej dráhe žiarenia.

Extinkcia sa dá vyjadriť za pomoci Pogsonovej rovnice aj v magnitudách

$$A = -2,5 \log \frac{I}{I_0} = \tau \cdot 2,5 \log e \approx 1,086 \tau \quad (1.4)$$

a má svoje opodstatnenie napríklad pri počítaní modulu vzdialenosti

$$m - M = 5 \log r - 5 + A. \quad (1.5)$$

Už prvé pozorovania odhalili, že zoslabenie žiarenia významne závisí na jeho vlnovej dĺžke. Z toho môžeme usúdiť, že účinný prierez častíc σ sa od geometrického S líši. Dá sa teda povedať, že σ je násobkom funkcie závislej na λ a S

$$\sigma_{(\lambda)} = f_{(\lambda)} S. \quad (1.6)$$

Funkcia $f_{(\lambda)}$ závisí na mechanizme extinkcie, ktorý sa pri danom type častíc uplatňuje.

Thomsonov rozptyl

Dochádza k rozptylu žiarenia na voľných elektrónoch. Pri tomto rozptyle funkcia nie je závislá na vlnovej dĺžke žiarenia.

$$f_{(\lambda)} = \text{konst.} \quad (1.7)$$

Rayleighov rozptyl

Ide o elastický rozptyl žiarenia na atónoch a iónoch, ktoré majú viazané stavy. Podmienkou vzniku tohto rozptylu je náhodné rozloženie atómov v priestore. Rayleighov rozptyl sa uplatňuje napríklad aj v zemskej atmosfére, kde je zodpovedný za namodravú farbu oblohy. V tomto prípade platí:

$$f_{(\lambda)} \sim \lambda^{-4}. \quad (1.8)$$

Mieov rozptyl

Pri časticiach s rozmermi medzihviezdneho prachu (100 nm – 1 μm) bolo laboratórne aj teoreticky zistené, že platí

$$f_{(\lambda)} \sim \lambda^{-1}. \quad (1.9)$$

1.4 Iné formy medzihviezdnej látky

Planetárne hmloviny

Málohmotné hviezdy končia svoj život odhodením svojej obálky. Z jadra sa stáva elektrónový degenerovaný biely trpaslík a z odhodeného materiálu s hmotnosťou nepresahujúcou 0,5 M_{\odot} planetárne hmloviny. Tieto objekty sa rozplynú veľmi rýchlo (v časovej škále tisícok rokov), no do tej doby sa ich správanie podobá tomu v okolí H II regiónov. Pozostatok hviezdy, biely trpaslík, vyžaruje v UV oblasti spektra a ionizuje tak okolohviezdnú látku. V látke dochádza k rekombináciám a k vyžiareniu na vyšších vlnových dĺžkach. V spektrách týchto objektov tak nachádzame výrazne emisné čiary Balmerovej série, no okrem toho aj zakázané čiary ako [O II, III] či [Ne III, V].

Koronálny plyn

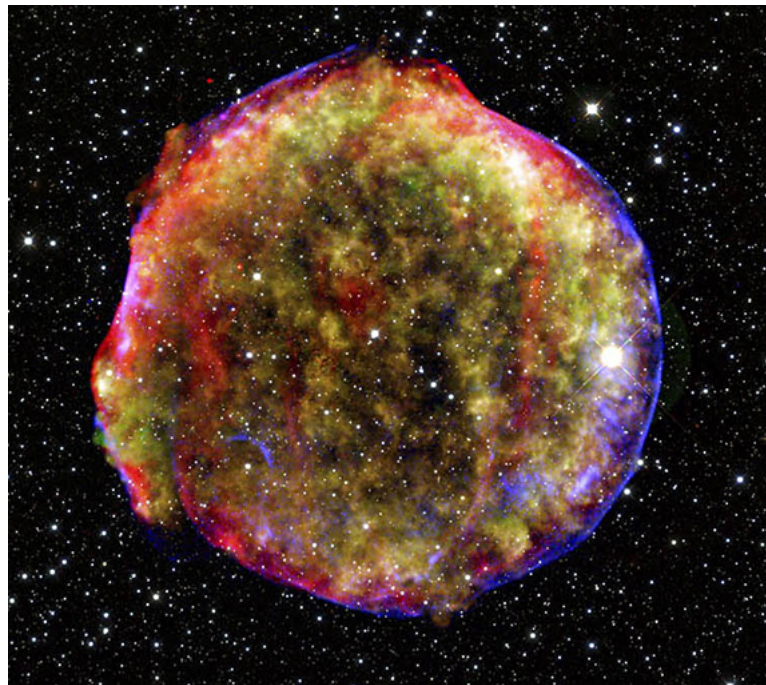
Zvláštnym druhom plynu, ktorý sa vyskytuje v medzihviezdnom prostredí je koronálny plyn. Jedná sa o veľmi riedky (10^{-3} častíc/cm³), no zároveň horúci (10^6 K) plyn. Svojimi vlastnosťami pripomína hviezdnu korónu, z čoho bol aj jeho názov odvodený. Jeho teplota spôsobuje vyžarovanie v krátkovlnnom obore, no taktiež vysokú ionizáciu prvkov, ktorých

absorpčné čiary boli zaznamenané na pozadí iných hviezd. Vznik sa spája s výbuchmi supernov.

Pozostatky po supernovách

Hmotnejšie hviezdy zakončujú svoj život výbuchom ako supernovy. Pri tomto výbuchu je odhodené obrovské množstvo materiálu vysokou rýchlosťou, až o niekoľko rádov prevyšujúcu rozpínanie planetárnych hmlovín. Na čele rozpínajúceho sa materiálu dochádza k zrážkam s už existujúcim materiálom v okolí bývalej hviezdy a vzniká obrovská rázová vlna. Táto vlna sa zahrieva a vyžaruje v mäkkom röntgenovom obore. Zohriatá látka v podobe koronálneho plynu postupom času chladne a pritom vyžaruje do svojho okolia.

Rozoznávame dva typy pozostatkov po supernovách. Prvý z nich má nepravidelný tvar a žiarenie je dotované pulzarom, ktorý vznikol pri výbuchu. Príkladom nám je Krabia hmlovina (M1), ktorá vznikla výbuchom supernovy v roku 1054. Častejšie sa vyskytuje druhý typ, ktorý má približne sféricky symetrický tvar a zdrojom energie je výlučne kinetická energia explózie. Zástupca tohto typu je pozostatok po Tychovej supernove.



Obr. 1.3: Pozostatok po Tychovej supernove.
Foto: Chandra, Spitzer, Calar Alto [e₅]

Kapitola 2

Spektroskopia

V nasledujúcej kapitole bolo čerpané zo zdrojov: Mikulášek, Krtička, 2013; Dyson, Williams, 1997; Vanýsek, 1980; Hollas, 2004

Spektroskopia je vedecká metóda, založená na interakcií elektromagnetického žiarenia s hmotou a jej počiatky siahajú až k Isaacovy Newtonovy. Ten experimentoval s optickým hranolom a všimol si pritom, že biele svetlo sa rozkladá na viacero farieb. Získal tak farebné spektrum, čo je pojem, ktorý sám zaviedol.

K lepšiemu pochopeniu spektier prispela v minulom storočí kvantová mechanika, ktorá objasňuje vznik mnohých charakteristických prvkov spektier. Dnes sa spektroskopia používa napríklad na skúmanie mikrosveta, zloženie materiálov, molekúl, atómov a má tak nesporné využitie v jadrovej fyzike, biofyzike či analytickej chemii. Významne sa podieľala aj na vzniku ďalšieho vedeckého oboru – modernej astrofyziky.

Väčšina informácií, ktoré dnes o hviezdach a vesmírnych objektoch máme pochádza zo spektroskopických meraní. Tvar spektra nám môže prezradiť mnohé informácie o zdroji žiarenia (teplota a zloženie atmosfér, projekcia rotačnej rýchlosti ($v_{\text{rot}} \cdot \sin i$), odhalenie ďalších zložiek hviezdnych systémov), ale i priestore, ktorým sa žiarenie šíri (zloženie a pohyb medzihviezdneho prostredia).

Významným medzníkom v získavaní spektier bolo pre astrofyzikov vypustenie družice IUE (International Ultraviolet Explorer) v roku 1978. Za svoju dobu činnosti (18 rokov) dokázala získať viac než sto tisíc spektier s vyšším i nižším rozlíšením tisícok vesmírnych objektov. Práve jej dáta budú využité aj v tejto bakalárskej práci na získanie radiálnych rýchlostí mračien nachádzajúcich sa medzi Zemou a hviezdou σ Ori E.

Spektroskopia zohráva vo svete astrofyziky významnú úlohu. V nasledujúcej kapitole sa preto budeme venovať vysvetleniu základných charakteristík spektra.

2.1 Spektrum

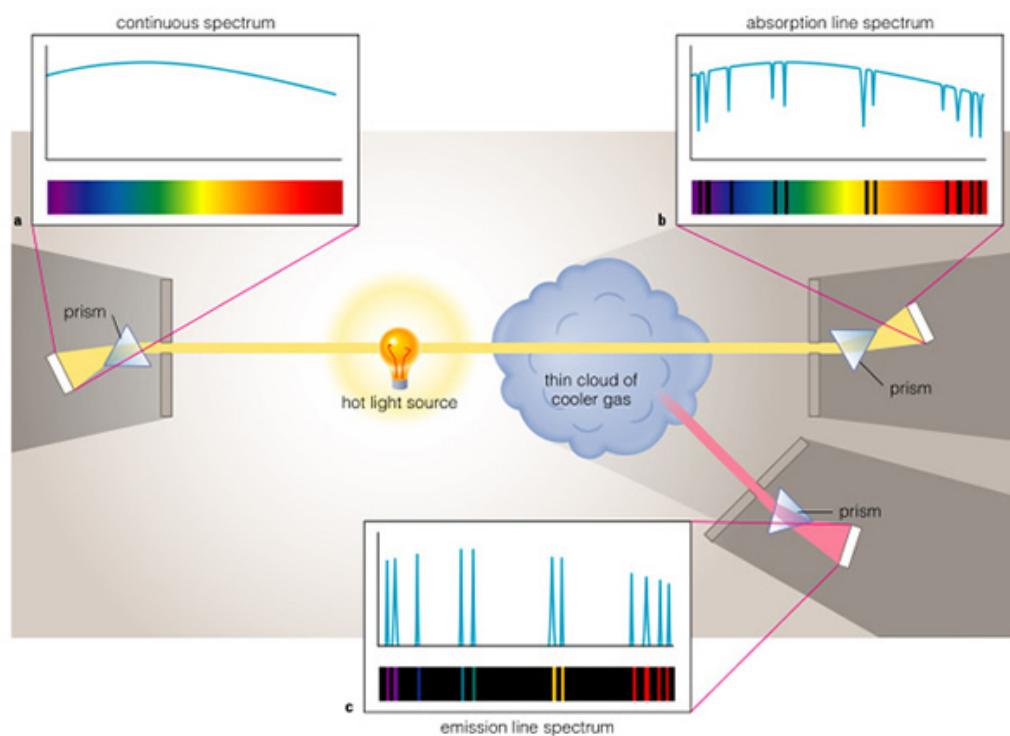
Funkcia zastúpenia žiarenia podľa vlnovej dĺžky sa nazýva spektrum žiarenia.

Kontinuum

Ak spektrum v sebe obsahuje všetky vlnové dĺžky v určitom rozsahu a intenzita žiarenia sa v ňom mení pomaly, hovoríme o tzv. žiarení kontinua.

Čiarové spektrum

V prípade, že sa intenzita žiarenia vzhľadom na vlnové dĺžky mení rýchlo ide o tzv. čiarové spektrum. Podľa toho, či sa zmena prejavuje poklesom alebo vzrastom intenzity vzhľadom na kontinuum, hovoríme o spektrálnych čiarach absorpčných alebo emisných.



Obr. 2.1: Vznik absorpčného a emisného spektra. Pri meraní spektra žiarenia prechádzajúceho chladnejší oblakom plynu vzniká absorpčné spektrum. Pozorovanie toho istého oblaku plynu v inom smere nám dáva emisné spektrum.

Zdroj: Tom Harrison [e₅]

2.2 Vznik spektrálnych čiar

Pri zmene viazaných stavov atómov môže dôjsť k vyžiareniu alebo pohlteniu fotónu. Energetické spektrum atómu je však diskkrétne, a preto aj energie prechodov môžu nadobúdať len určité hodnoty. Práve fotóny s vlnovou dĺžkou prislúchajúcou povoleným energetickým prechodom sa objavujú v spektrách prvkov. Každý prvok a variácia prvku má vlastné diskkrétne energetické spektrum a vďaka tomu dokážeme určiť, aké prvky sa nachádzajú v mieste vyžarovania.

Absorpčné čiary ako prvý na Slnku pozoroval nemecký optik, fyzik a astronóm Fraunhofer. Vysvetlenie vzniku takéhoto spektra podali dvaja ďalší nemeckí astronómovia Kirchhof a Bunsen, ktorí zistili, že tieto tmavé čiary spôsobuje chladnejší plyn na teplejšom pozadí. Príčina je taká, že chladnejší plyn pohlcuje žiarenie s rovnakou vlnovou dĺžkou, na akej aj vyžaruje. Plyn teda pohltí žiarenie a síce ho spätne vyžiari, ale časť je vyžiarená do iného smeru, než sa žiarenie pôvodne šírilo. Zároveň nie všetka energia sa vyžaruje, ale dochádza aj k zohrievaniu látky.

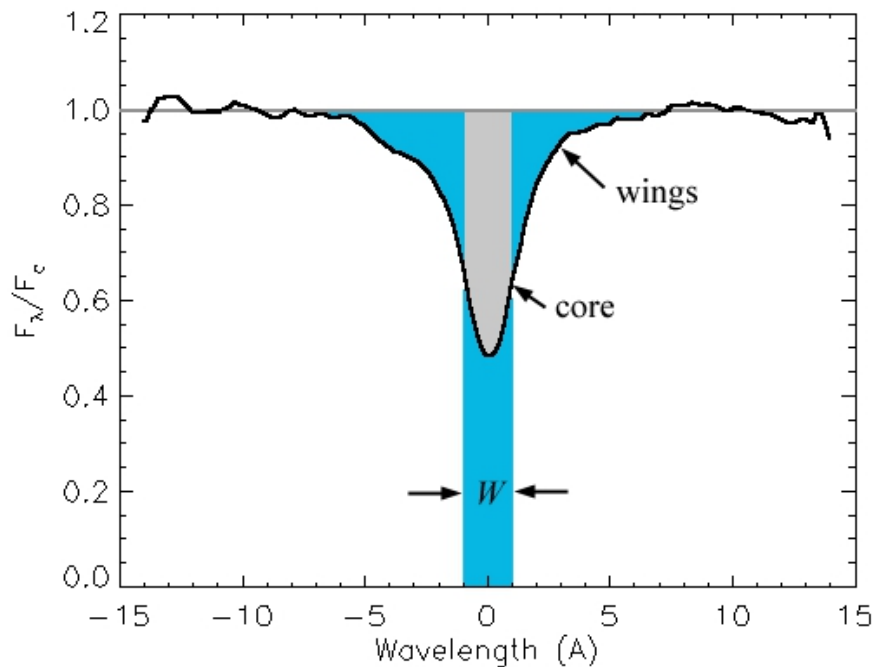
V prípade, že by sme sa pozerali na plyn z iného smeru a mali tak teplejší plyn na chladnejšom pozadí, dostali by sme spektrum emisné. Toto môžeme pozorovať pri emisných čiarach koróny, kde jej teplota mnohonásobne prevyšuje teplotu v mieste vzniku kontinua – fotosféry.

2.3 Profil spektrálnej čiary

Profil čiary vzťahujeme k jednotkovej hladine zodpovedajúcej úrovni kontinua. Podľa mechanizmu vzniku rozoznávame dva základne profily – Lorenzovský a Gausovský. Profil medzihviezdnej čiary je väčšinou kombináciou Lorenzovského profilu a niekoľkých Gausovských.

Na jednoduchý popis spektrálnych čiar sa zaviedlo niekoľko parametrov, ktoré nám podávajú základné informácie. Jedným takýmto parametrom je ekvivalentná šírka čiary, vyjadrujúca silu spektrálnej čiary. Ide o šírku myslenej čiary pravouhlého profilu, v ktorej je absorbované všetko žiarenie a má rovnakú plochu ako skutočná čiara. Vyjadruje sa v jednotkách vlnovej dĺžky. Čím väčšia táto hodnota je, tým silnejšia je čiara. V profiloch spektrálnych čiar ďalej rozlišujeme jej jadro a krídla.

Ďalším parametrom, pomocou ktorého určujeme tzv. rozšírenie čiary je šírka čiary v polovici maxima \tilde{w} (u absorpčných čiar - minima). Dôležité informácie nám prináša aj samotná poloha spektrálnej čiary.



Obr. 2.2: Profil spektrálnej čiary. Zdroj: Dan Feldman [e7]

2.4 Rozšírenie spektrálnych čiar

Pri pohľade na spektrálnu čiaru si môžeme všimnúť, že nie je nekonečne úzka, ale má určitú šírku. Existujú tri hlavné faktory, ktoré sú zodpovedné za tvar a rozšírenie spektrálnych čiar.

2.4.1 Prirodzené rozšírenie

Platí tu Heisenberov princíp neurčitosti, ktorý nám hovorí, že priemerná doba zotrvania elektrónu na vyššej hladine Δt , je previazaná s neurčitosťou energie prechodu ΔE nasledujúcim vzťahom:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (2.1)$$

Keďže doba zotrvania elektrónu na vyššej hladine nie je nekonečne dlhá, dochádza k nutnému rozšíreniu energetických hladín. Toto rozšírenie následne povoľuje prechody aj v tesnom okolí maxima spektrálnej čiary. Vzhľadom na to, že každá molekula a každý atóm sa správa rovnako, je to príklad homogénneho rozšírenia čiary reprezentované Lorenzovským profilom.

2.4.2 Rozšírenie tlakom

V prípade, že v prostredí vzniku spektrálnych čiar uvažujeme o tlaku a začneme ho meniť, budú sa meniť aj ich profily. Súvisí to s kolíziami častíc, pričom vyšší tlak spôsobuje častejšie kolízie. Skracuje sa teda priemerná doba Δt zo vzťahu (3.1) a to vedie k rozšíreniu profilu. Toto rozšírenie, rovnako ako prirodzené, je homogénne a väčšinou vytvorí Lorenzovský profil.

2.4.3 Tepelné dopplerovské rozšírenie

Dopplerov jav je zmena vlnovej dĺžky vyvolaná relatívnym pohybom zdroja a detektora. Závisí teda akou rýchlosťou vzhľadom na detektor sa daná častica vyžarujúca fotón pohybuje. V hviezdnej atmosfére sa nachádza takýchto častíc s náhodným pohybom veľké množstvo a rozloženie rýchlosti sa riadi Maxwell–Boltzmanovým rozdelením. Veľkosť rýchlosti, ktorou sa v tomto rozložení pri danej teplote pohybuje najväčší počet častíc je vyjadrená ako:

$$v_{mp} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.2)$$

Dosadením do Dopplerovho zákona získavame rozšírenie:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.3)$$

Vzhľadom na to, že nie všetky atómy a molekuly sa v náhodnom vzorku správajú rovnako, jedná sa o rozšírenie nehomogénne. Profil je Gaussova funkcia, ktorá je daná Maxwellovým rozdelením rýchlostí.

2.5 Vyjadrenie fitovacej funkcie

Na odvodenie fitovacích funkcií využijeme predpoklad, že účinný prierez σ môžeme vyjadriť ako (Rutten , 2003)

$$\sigma = \frac{\pi e^2}{m_e c} \cdot f \cdot \Phi. \quad (2.4)$$

Konštanta e je elementárny náboj, m_e hmotnosť elektrónu, c rýchlosť svetla a f vyjadruje silu oscilátoru, čo je hodnota, ktorú je možné dopočítať z kvantovej mechaniky. Φ vyjadruje profil čiary. Dosadením do vzťahu 2.2 získavame

$$\tau = \frac{\pi e^2}{m_e c} \cdot f \cdot \Phi \int n ds \quad (2.5)$$

a následným dosadením do 2.1 dostávame fitovaciu funkciu

$$I = I_0 \exp[-A \cdot \Phi]. \quad (2.6)$$

Parameter A nám vyjadruje

$$A = \frac{\pi e^2}{m_e c} \cdot f \int n ds, \quad (2.7)$$

za Φ môžeme dosadiť Gaussovú alebo Lorenzovú funkciu.

Gaussova funkcia má zvonovitý tvar a matematicky ju môžeme popísať

$$\Phi_G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}w} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{0G})^2}{2w^2}\right) \quad (2.8)$$

Šírka čiary v polovici minima (\tilde{w}) súvisí so smerodajnou odchýlkou w vzťahom

$$\tilde{w} = 2\sqrt{2 \ln 2} \cdot w. \quad (2.9)$$

Lorenzová funkcia má užší profil než funkcia Gaussova a matematicky sa vyjadruje

$$\Phi_L(x) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{w}{(\lambda - \lambda_{0L})^2 + (w/2)^2} \right]. \quad (2.10)$$

Pri tejto funkcii je šírka \tilde{w} rovná w . Poloha minima absorpčnej čiary je pre Gaussovú funkciu λ_{0G} , pre Lorenzovú λ_{0L} .

Kapitola 3

Orion OB asociácia

V nasledujúcej kapitole bolo čerpané zo zdrojov: Bally, 2008; Brown et al., 1994

Oblasť v Orione je najbližší región pretrvávajúcej tvorby málo aj veľmi hmotných hviezd. Len za posledných dvanásť miliónov rokov sa tu zrodilo prinajmenšom desať tisíc hviezd. Vďaka jeho blízkosti ≈ 400 pc (Bally, 2008), je možné na túto štruktúru nahliadať v troch dimenziách. S tým súvisí, že sa jedná o najlepšie preskúmaný región hviezdnej tvorby na oblohe. Mladé hviezdy a mračná nám poskytujú dôležité vodítka ohľadom fyziky formovania hviezd, evolúcie a zániku mračien, dynamiky a energetiky medzihviezdneho prostredia, či rolu hmotných hviezd v tomto prostredí.

Zatiaľ čo H II oblasti a málo hmotné hviezdy typu T-Tauri podávajú informácie o prebiehajúcej a nedávnej formácii hviezd, OB asociácie odhaľujú dávnejšiu históriu. Ich najhmotnejší členovia s „neskorými“ spektrálnymi typmi môžu identifikovať miesta, kde sa hviezdy formovali pred viac než 40 miliónmi rokov. Kombináciou hmotnostnej spektroskopie, známych polôh, rýchlostí, veku mladých hviezd a vlastností medzihviezdnej látky v blízkych asociáciách podávajú informácie o tvorbe, evolúcií a deštrukcií molekulových mračien spätne až 100 miliónov rokov dozadu v čase. Tieto štúdie nám umožňujú rozlúštiť nedávnu históriu medzihviezdneho prostredia a s tým spojenú tvorbu hviezd v našej časti Galaxii.

3.1 Štruktúra OB1 asociácie

Orion OB1 asociácia pozostáva z postupnosti hviezdnych skupín rôzneho veku, ktoré sú v smere pozorovania čiastočne prekryté. Hranice OB podskupín určil vo svojej publikácii Blaauw (1964), vid' Obr. 3.1. Oddelil dobre definované susediace regióny na oblohe. Vzhľadom na vzájomne prekryvanie týchto regiónov zahrnul do klasifikácie podskupín aj ich vek.

Napriek tomu, že medzi vedcami panujú nezhody ohľadom predpokladaného veku rôznych podskupín, väčšina sa zhoduje, že najstaršou je Orion OB1a. Nachádza sa severozápadne od Orionovho pásu a odhadovaný vek a vzdialenosť sú $11,4 \pm 1,9$ Myr, 380 ± 90 pc (Brown et al. 1994).

Rozdiely sa týkajú hlavne podskupiny OB1b. Jej vek a vzdialenosť boli určené na $1,7 \pm 1,1$ Myr, 360 ± 70 pc (Brown et al. 1994). Vek tejto podskupiny prichádza do rozporu s výskytom troch nadobrov z pásu Oriónu. Pri ich hmotnostiach musí byť ich vek minimálne 5 Myr. Súčasťou tejto podskupiny je aj hviezdny systém σ Orionis, ktorý je súčasťou nášho štúdia.

Nedávno objavený zhluk hviezd s vekom 7 – 10 Myr, ktorý je centrován v okolí 25 Ori sa nachádza na severozápadnom konci Orionovho pásu (Brice et al. 2007). Formálne sa považuje za súčasť OB1a podskupiny, no radiálna rýchlosť tohto zhluku je približne o $10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ nižšia, než má zvyšok jej členov. Uvažuje sa preto, že táto skupinka mohla byť sformovaná ako H II oblasť vytvorená expanziou 1a podskupiny do okolitej medzihviezdnej látky, čo iniciovalo vznik týchto hviezd. Zhluk hviezd v okolí 25 Ori by teda mohol reprezentovať skupinu sformovanú medzi OB 1a a 1b.

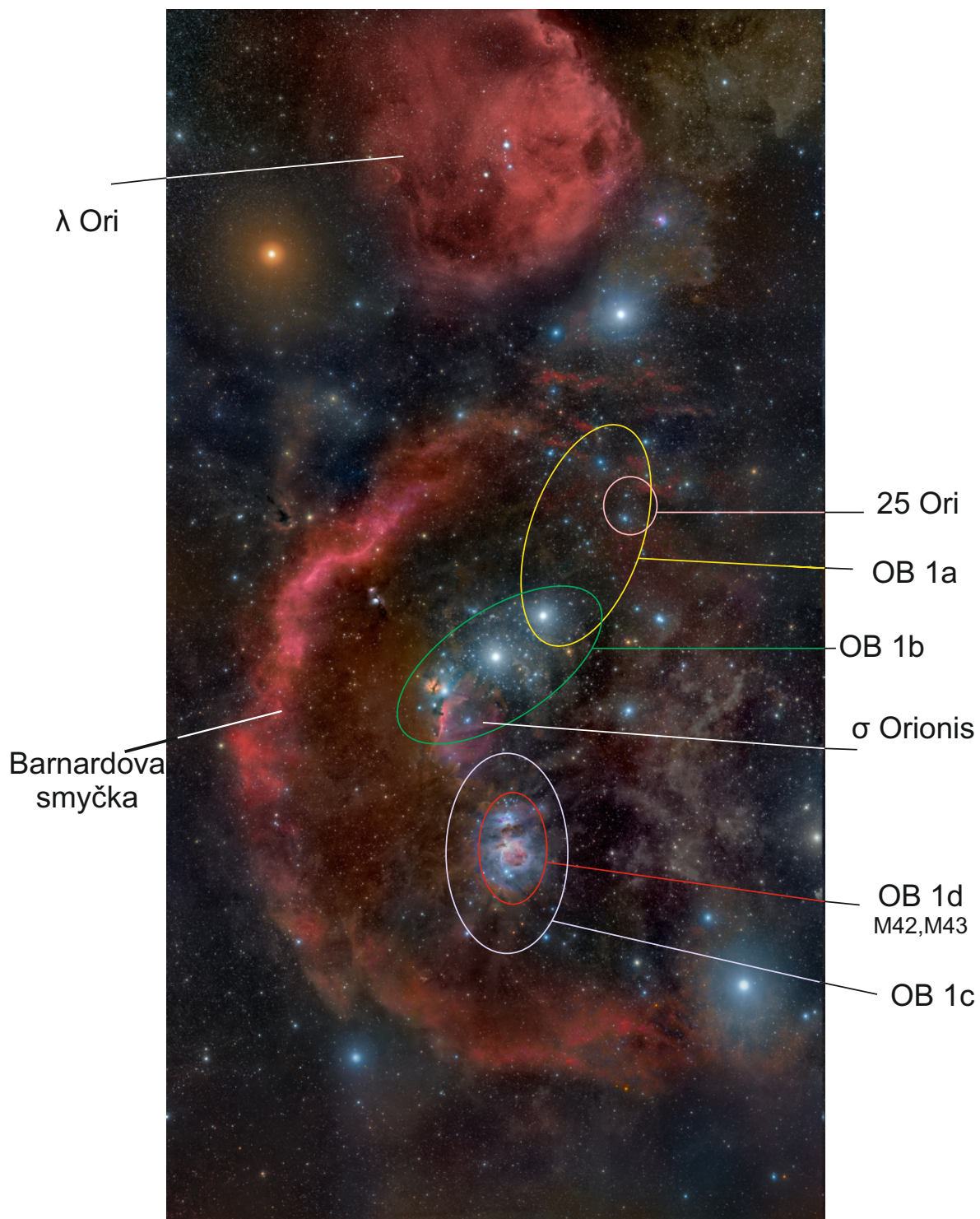
Orion OB1c podskupina sa nachádza približne 4° pod Orionovým pásom. Vek a vzdialenosť 1c boli určené $4,6 \pm 2$ Myr, 400 ± 90 pc (Brown et al. 1994). Nachádzajú sa tu aj dve otvorené hviezdokopy NGC 1980 a NGC 1981. Do súvisu s touto podskupinou sa dáva aj skupina λ Ori. Existuje predpoklad, že vzhľadom na ich vzdialenosti od podskupiny 1a mohli obe vzniknúť jej expanziou a teda λ Ori môže byť považovaná za oddelenú časť 1c.

Najmladšou podskupinou so svojím vekom < 1 Myr (Brown et al. 1994) je OB1d. Nachádza sa za skupinou 1c, no jej presná vzdialenosť sa pre malý počet hviezd ťažko určuje. Jej súčasťou je Veľká hmlovina v Orione.

3.2 Medzihviezdna látka v Orione

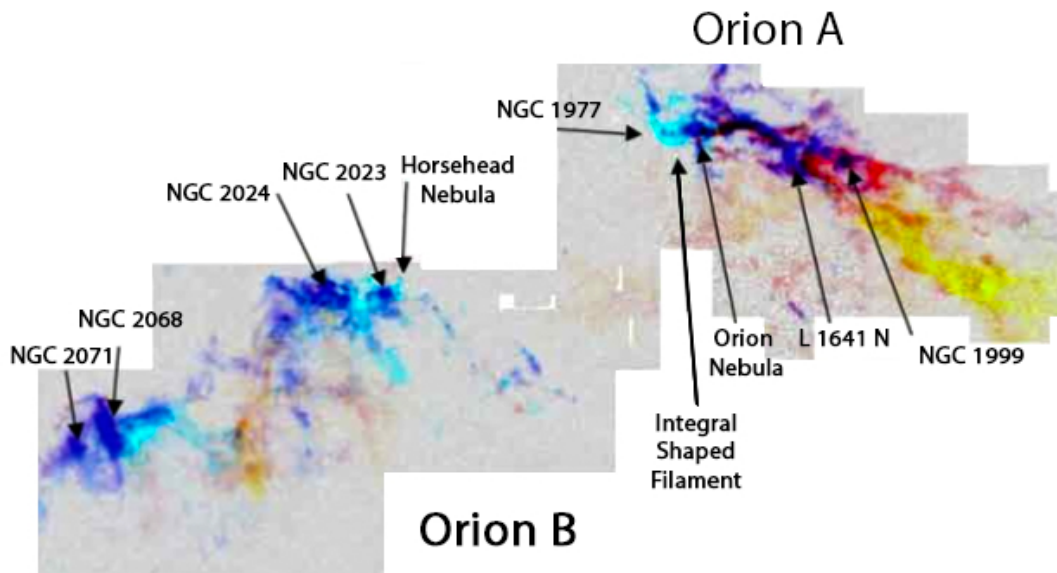
Molekulárne mračná Orion A a B

Do súhvezdia Oriona patria aj dve veľké molekulové mračná s hmotnosťou $10^5 M_\odot$, viď Obr. 3.2. Orion A sa nachádza v južnejšej časti súhvezdia. V tomto mračne sa pozoruje nenulový gradient hustoty aj rýchlosti, pričom celé mračno sa pohybuje smerom od stredu OB asociácie. Hustejšia časť s vyššou rýchlosťou sa nachádza bližšie k centru a obe veličiny klesajú so zvyšujúcou sa vzdialenosťou. Orion B sa nachádza východne od súhvezdia Orióna a opäť platí, že hustejšia a rýchlejšia zložka sa nachádza bližšie k centru asociácie. V hustejších častiach týchto mračen sa nachádza množstvo hmlovín, kde vznikajú mladé hviezdy ako napríklad M42 a hmlovina Koňská hlava. Obe mračná vypadajú byť tvarované uvoľňovaním energie z OB asociácie (Maddalena et al. 1986; Bally et al. 1987; 1991a, b).



Obr. 3.1: Medzihviezdna látka a štruktúra OB1 asociácie v Orione.

Foto: Rogelio Bernal Andreo [e₈]



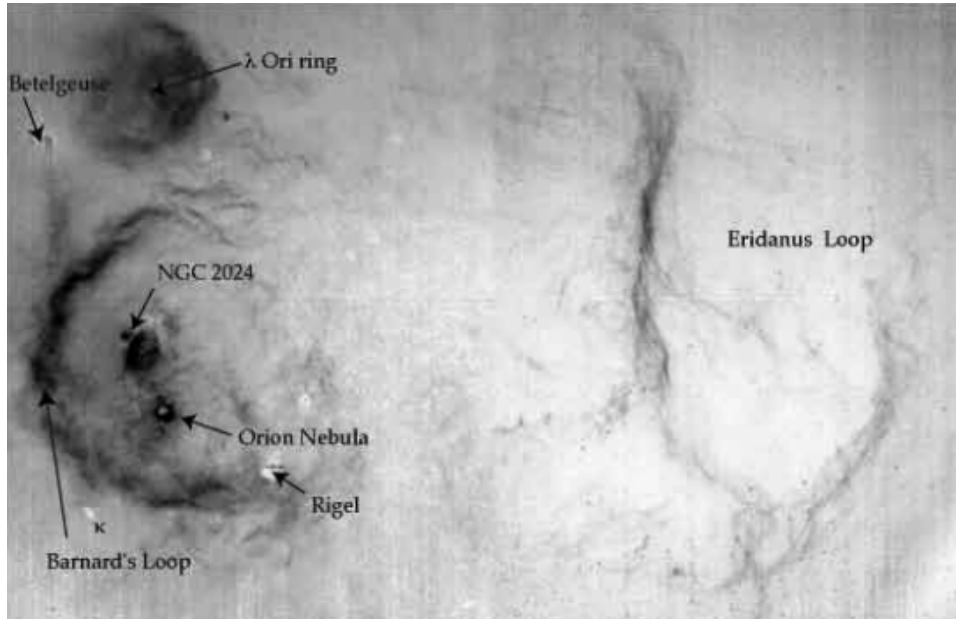
Obr. 3.2: Molekulárne mračná v Orione, farby reprezentujúce Doplerov posun: žltá – $v_{LSR} = 0 - 5$ km/s, červená – $v_{LSR} = 5 - 10$ km/s, modrá – $v_{LSR} = 10 - 15$ km/s. Invertovaný obrázok z publikácie Bally (2008)

Barnardova slučka, bublina hviezdneho materiálu Orion–Eridanus

Koncom 19. storočia bol s vývojom fotografie prvýkrát zachytený snímok Barnardovej slučky. Napriek svojmu menu, tento objekt ako prvý vyfotil William Henry Pickering a predstihol Barnarda približne o 5 rokov. Ide o polkruh materiálu vyžarujúceho v $H\alpha$ emisii, obkolesujúci východnú časť Orionu. Sivan (1974) a Reynolds & Ogden (1979) ukázali, že Barnardova slučka (Barnard's Loop) je najjasnejšia časť obrovskej bubliny z $H\alpha$ emisie, tiahnúca sa 40° na západ, až do súhvezdia Eridanus, viď Obr. 3.3. Pri jej uhlových rozmeroch $20^\circ \times 40^\circ$ a vo vzdialenosti 400 pc sú skutočné rozmery približne 140×300 pc.

Steny bubliny Orion – Eridanus sú pozorovateľné vo vzdialenom infračervenom pásme (Brown et al.1995) a na vlnovej dĺžke $\lambda = 21$ cm rádiovkej oblasti (Heiles 1976; Green 1991; Green & Padman 1993). Časti bubliny v oboch súhvezdiach prejavujú vláknitú štruktúru s maximom vyžarovania prichádzajúceho z regiónu mimo $H\alpha$ časti. Teplota vnútornej časti sa pre prítomnosť emisných čiar v UV a v mäkkej röntgenovej oblasti odhaduje približne na 10^5 K. Prítomnosť emisnej γ čiary krátko existujúceho ^{26}Al naznačuje nedávne znečistenie vnútornej časti supernovou (Diehl et al. 2004). Z absorpčných meraní medzihviezdnej látky v spektrách hviezd so známou vzdialenosťou vyplýva, že najbližšia

časť môže byť vzdialená 180 pc od Slnka. Neveľká vzdialenosť bubliny Orion–Eridanus a prítomnosť horúcej plazmy naznačuje, že supernova vybuchla na pol ceste medzi Slnkom a Oriónom v priebehu posledných niekoľkých miliónov rokov.



Obr. 3.3: Bublina Orion/Eridanus v $H\alpha$ s logaritmickou intenzitou, rozmer snímku $30^\circ \times 47^\circ$. Bally (2008)

3.3 σ Ori E

Hviezda σ Ori E (HD 37479) je súčasťou 5 hviezdneho systému, nachádzajúceho sa v už skôr spomínanej OB1 asociácii, konkrétne 1b podskupine v okolí Orionovho pásu. Je klasifikovaná ako B2Vp héliová hviezda a patrí medzi najštudovanejšie hmotné premenne hviezdy. Charakterizujú ju vlastnosti ako rýchla rotácia, silné magnetické pole a premenná okolohviezdná $H\alpha$ emisía. Pozorovania ukazujú zmeny počas 1,19 dňovej rotácie v magnetickom poly (Landstreet & Borra 1978), $H\alpha$ emisii (Walborn 1974), sile čiary hélia (Pedersen & Thomsen 1974), fotometrii (Hesser et al. 1976), sile UV čiar (Smith & Groote 2001), emisii v rádiovnej oblasti $\lambda = 6$ cm (Leone & Umana 1993) a lineárnej polarizácii (Kemp & Herman 1977). Priemerná hodnota rotačnej periódy bola pre obdobie 1976-1998 určená $\bar{P} = 1,190833$ dňa (Townsend et al., 2010).

Najnovší model obálky pre túto hviezdu sa nazýva The Rigidly Rotating Magne-

tosphere (Townsend et al., 2005). Analyticky popisuje okolohviezdnú plazmovú štruktúru rýchlo rotujúcej hviezdy, na ktorej magnetické pole premôže hviezdny vietor. To spôsobí, že plazma zostane uveznená v magnetosfére a korotuje s hviezdou. Silné magnetické pole roztáča a zároveň ohraňuje plazmu hviezdneho vetra, udržiujúc ju v prísnej korotácii ďaleko za Keplerovým korotačným polomerom. Zároveň tu pôsobia gravitačné a odstredivé sily vytvárajúce potenciálové minimá, v ktorých sa látka môže zdržiavať (Townsend & Owocki 2005).

Kapitola 4

Spracovanie dát

Dáta sme získali z archívu MAST [e₉]. Jedná sa o 7 spektier vyfotených družicou IUE v období 4. – 8.1.1980 a 16 spektier z obdobia 15. – 20.12.1981. Pri snímaní bola použitá veľká apertúra, vysoká disperzia a detektor SWP, ktorý pokrýva vlnové dĺžky v rozmedzí 1150 – 1930 Å. Expozičná doba má pre každé spektrum hodnotu 435 s. Pre vykreslenie týchto spektier sme museli v dátach vyhľadať a odstrániť chybné body, v ktorých sa tok žiarenia rovnal záporným hodnotám.

V našej práci sa venujeme premennosti čiar počas rotácie hviezdy. Bolo teda potrebné zaradiť tieto spektrá do príslušného bodu fázy rotácie. Ako bod nula sme si zvolili čas zosnímania prvého spektra dňa 15.12.1981. Fázu sme určovali odčítaním juliánskych dátumov s heliocentrickou korekciou daných spektier od toho, ktoré sme si označili ako bod nula. Následne sme rozdiel podelili periódou hviezdy $T = 1.190833$ d a získaný zvyšok nám určil fázu.

Spektrum	Dátum	Čas [UTC]	Fáza
SWP07556	1980-01-04	20:10:32	0,513
SWP07558	1980-01-04	22:37:26	0,427
SWP07560	1980-01-05	01:39:56	0,321
SWP07583	1980-01-06	15:23:35	0,001
SWP07587	1980-01-06	21:05:28	0,801
SWP07589	1980-01-06	23:26:27	0,719
SWP07607	1980-01-08	19:43:57	0,169

Tabuľka 4.1: Tabuľka priradenie fázy rotácie k spektru, rok 1980

Spektrum	Dátum	Čas [UTC]	Fáza
SWP15751	1981-12-15	04:30:13	0
SWP15753	1981-12-15	05:40:18	0,041
SWP15755	1981-12-15	06:46:15	0,079
SWP15757	1981-12-15	07:51:33	0,117
SWP15774	1981-12-17	02:44:30	0,618
SWP15778	1981-12-17	05:48:02	0,725
SWP15780	1981-12-17	06:57:03	0,765
SWP15782	1981-12-17	08:02:17	0,803
SWP15785	1981-12-18	02:21:11	0,444
SWP15786	1981-12-18	02:54:46	0,464
SWP15787	1981-12-18	03:31:54	0,485
SWP15811	1981-12-20	04:22:23	0,194
SWP15813	1981-12-20	05:28:14	0,233
SWP15815	1981-12-20	06:36:47	0,273
SWP15817	1981-12-20	07:42:09	0,311

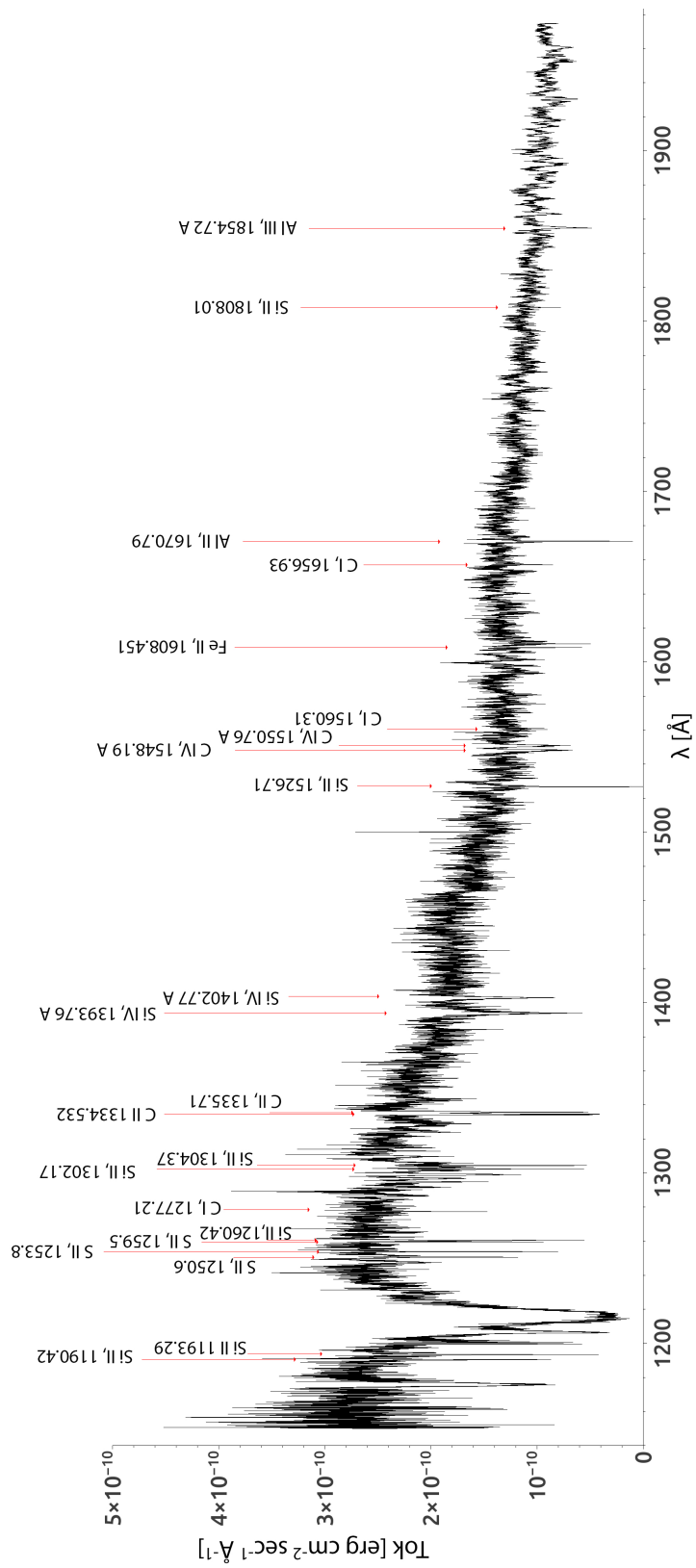
Tabuľka 4.2: Tabuľka priradenie fázy rotácie k spektru, rok 1981

4.1 Identifikácia spektrálnych čiar

V hviezdnom spektre sa nachádzajú 2 typy absorpčných čiar. Jedny vznikajú v hviezdnej atmosfére a druhé v medzihviezdnom prostredí. Podrobnejší popis v podkapitole 3.4 o rozšírení spektrálnych čiar nám odhalil, že čiary medzihviezdného prostredia majú len veľmi malú ekvivalentnú šírku. Práve vďaka tomu ich rozoznáme od čiar atmosférických. Na správnu identifikáciu čiar medzihviezdného prostredia potrebujeme zoznam laboratórnych vlnových dĺžok (λ_0) jednotlivých prvkov. V našej práci sme prevzali hodnoty λ_0 z národného archívu pre váhy a miery USA, NIST [e₁₀]. Pomimo čiar medzihviezdného prostredia sme identifikovali aj čiary atmosférické, konkrétne Al III, C IV, Si IV.

Ión	Poloha λ_0 [Å]	Ión	Poloha λ_0 [Å]
Si II	1193,290	S II	1250,584
Si II	1260,422	S II	1253,811
Si II	1304,370	S II	1259,519
Al II	1670,7874	Fe II	1608,45083

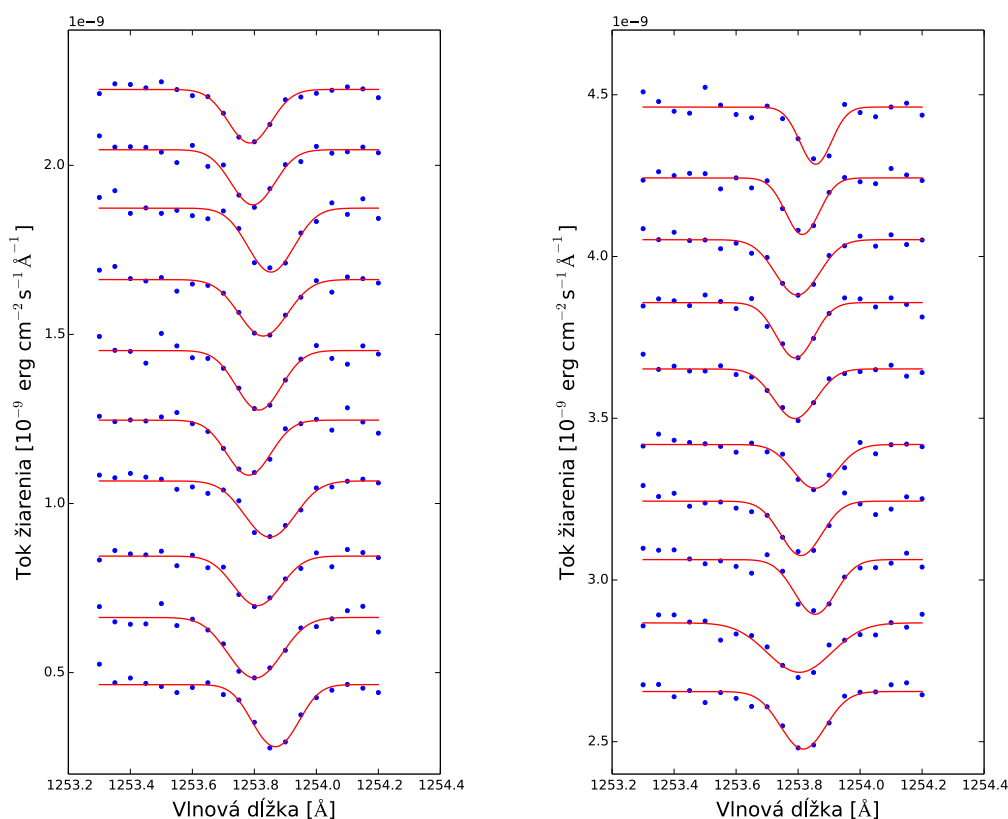
Tabuľka 4.3: Laboratórne vlnové dĺžky λ_0 pre spracovaných 8 čiar



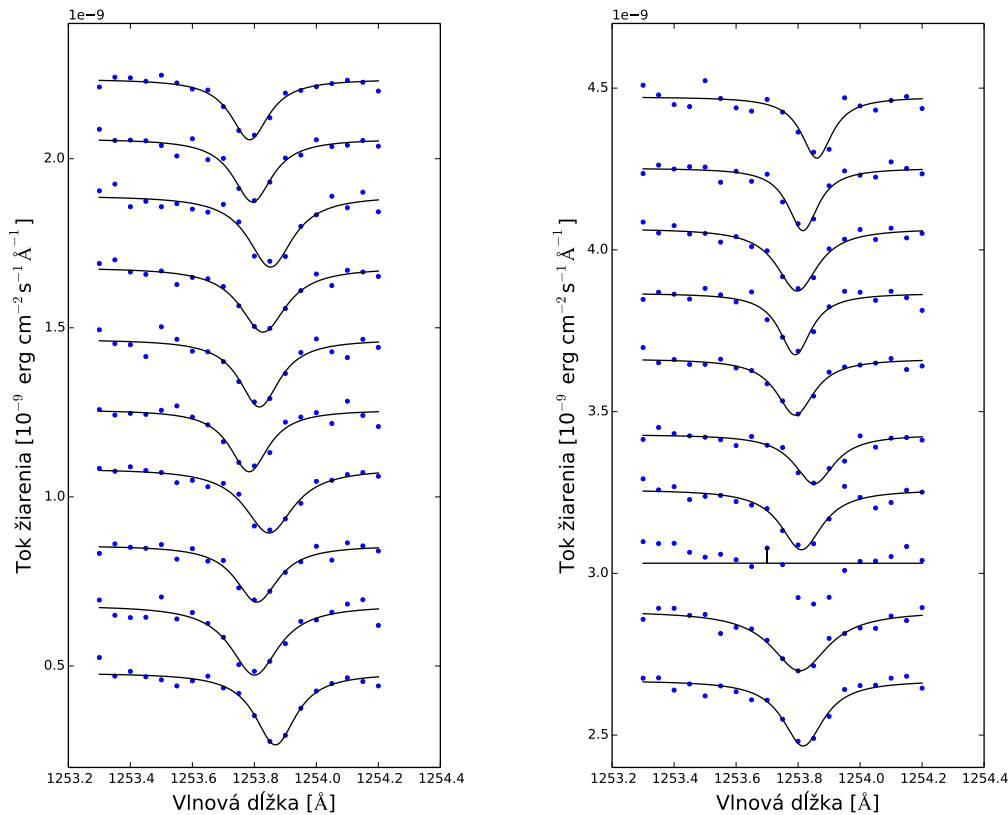
Obr. 4.1: Identifikácia spektrálnych čiar, prípona A značí atmosférickú čiaru

4.2 Fitovanie spektrálnych čiar

Identifikované spektrálne čiary medzihviezdneho prostredia sme fitovali pomocou zostrojeného kódu v programovacom jazyku Python. Na odhadnutie najlepších parametrov funkcií popísaných v podkapitole 3.5 program využíva metódu najmenších štvorcov, na minimalizáciu používa Levenberg – Marquardtov algoritmus. Z počiatku sme nafitovali vybranú spektrálnu čiaru Gaussovským aj Lorenzovským profilom. Pre lepšiu prehľadnosť boli jednotlivé spektra vzájomne posunuté.



Obr. 4.2: Fitovanie Gaussovou funkciou spektrálnej čiary S II ($\lambda_0 = 1253.811$) Å, pre lepšiu prehľadnosť boli jednotlivé spektra vzájomne posunuté



Obr. 4.3: Fitovanie Lorenzovou funkciou spektrálnej čiary S II ($\lambda_0 = 1253.811 \text{ \AA}$), pre lepšiu prehľadnosť boli jednotlivé spektra vzájomne posunuté

Z výsledkov nám vychádza, že parametre fitovania Lorenzovou funkciou majú v pološírke čiary približne dvojnásobnú relatívnu chybu oproti parametrom získaným Gaussovou funkciou. Pri určovaní polohy minima sú chyby podobné. Grafické porovnanie fitov, viď. Obr. 4.2, získané hodnoty sa nachádzajú v Tabuľke 5.4. Zároveň pre niektoré čiary mal program s Lorenzovou funkciou problém. Z týchto dôvodu sme v ďalších častiach práce použili výsledky získané fitovaním Gaussovou funkciou. Na nasledujúcich stránkach sa venujeme jednotlivým čiarom medzihviezdneho prostredia. V grafoch posudzujeme premennosť v ekvivalentnej šírke a polohe minima čiar počas rotácie hviezdy. V tabuľkách tieto hodnoty prehľadne vypisujeme aj s hodnotami ich chýb.

Spektrum	λ_G [Å]	$\delta\lambda_G$ [Å]	\tilde{w}_G [Å]	$\delta\tilde{w}_G$ [Å]	$\frac{\tilde{w}_G}{\delta\tilde{w}_G}$ [%]	λ_L [Å]	$\delta\lambda_L$ [Å]	\tilde{w}_L [Å]	$\delta\tilde{w}_L$ [Å]	$\frac{\tilde{w}_L}{\delta\tilde{w}_L}$ [%]
SWP15785	1253,868	0,007	0,147	0,016	10,9	1253,868	0,006	0,115	0,02	17,4
SWP07556	1253,802	0,009	0,172	0,021	12,2	1253,801	0,009	0,138	0,032	23,2
SWP07558	1253,81	0,007	0,156	0,017	10,9	1253,808	0,007	0,129	0,023	17,8
SWP15780	1253,851	0,006	0,165	0,015	9,1	1253,848	0,005	0,146	0,019	13,0
SWP07587	1253,782	0,007	0,145	0,016	11,0	1253,783	0,008	0,114	0,026	22,8
SWP15755	1253,815	0,009	0,146	0,021	14,4	1253,816	0,009	0,116	0,03	25,9
SWP15778	1253,829	0,007	0,16	0,017	10,6	1253,828	0,006	0,139	0,022	15,8
SWP15786	1253,854	0,008	0,147	0,018	12,2	1253,852	0,008	0,128	0,028	21,9
SWP15815	1253,795	0,008	0,143	0,018	12,6	1253,795	0,007	0,114	0,021	18,4
SWP07560	1253,785	0,005	0,137	0,011	8,0	1253,785	0,005	0,108	0,016	14,8
SWP15751	1253,826	0,009	0,129	0,02	15,5	1253,825	0,008	0,114	0,029	25,4
SWP15753	1253,817	0,007	0,145	0,016	11,0	1253,816	0,007	0,116	0,022	19,0
SWP15813	1253,804	0,011	0,208	0,028	13,5	1253,805	0,008	0,171	0,031	18,1
SWP15782	1253,854	0,008	0,133	0,018	13,5	1253,854	0,009	0,126	0,028	22,2
SWP15757	1253,81	0,009	0,134	0,02	14,9	1253,811	0,009	0,121	0,031	25,6
SWP15774	1253,855	0,008	0,145	0,017	11,7	1253,852	0,007	0,122	0,024	19,7
SWP07589	1253,789	0,006	0,142	0,015	10,6	1253,791	0,006	0,114	0,019	16,7
SWP07607	1253,79	0,006	0,127	0,014	11,0	1253,791	0,007	0,093	0,022	23,7
SWP15817	1253,798	0,006	0,142	0,014	9,9	1253,798	0,006	0,118	0,019	16,1
SWP07583	1253,814	0,005	0,109	0,012	11,0	1253,815	0,006	0,086	0,019	22,1
SWP15787	1253,856	0,008	0,101	0,02	19,8	1253,86	0,01	0,092	0,03	32,6
SWP15811	1253,806	0,008	0,18	0,019	10,6	1253,807	0,007	0,151	0,025	16,6

Tabuľka 4.4: Porovnanie parametrov študovaných veličín určených Gaussovským a Lorenzovským fitom

4.3 Radiálne rýchlosti

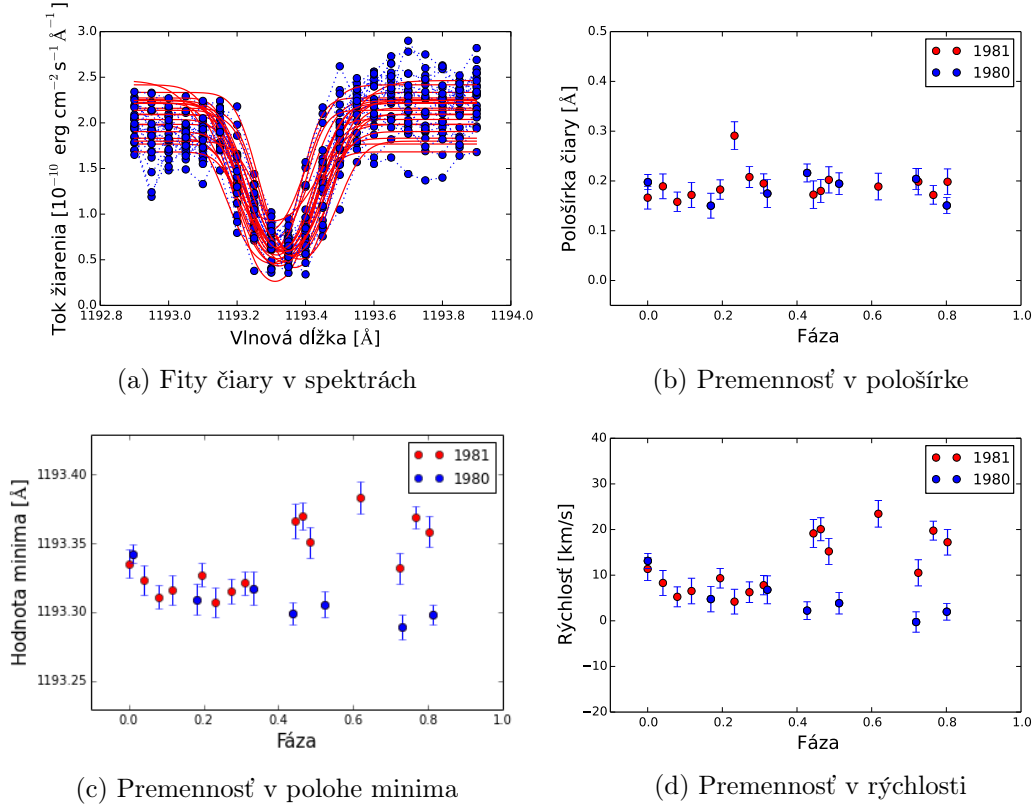
Na výpočet radiálnej rýchlosti použijeme vzťah

$$v_r = c \left(\frac{\lambda_{G0} - \lambda_0}{\lambda_0} \right) = c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right), \quad (4.1)$$

kde $\Delta\lambda$ je rozdiel medzi nameraným λ_{G0} a laboratórnym λ_0 minimom. Pre neistoty rýchlostí máme vzťah

$$\delta_{v_r} = \frac{c}{\lambda_0} \delta_{\Delta\lambda}. \quad (4.2)$$

4.4 Si II, $\lambda_0 = 1193,290 \text{ \AA}$

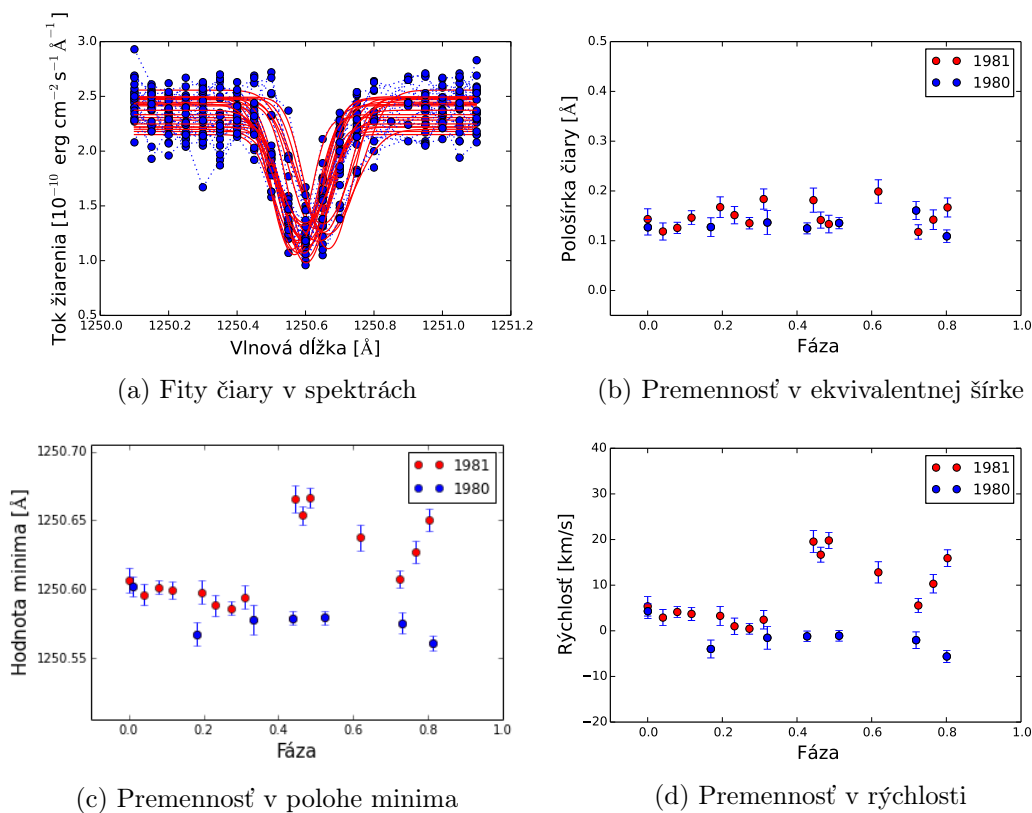


Obr. 4.4: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1193,290 \text{ \AA}$, $v_r = (9,9 \pm 6,6) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1193,366	0,012	0,173	0,028	SWP15753	1193,323	0,011	0,189	0,025
SWP07556	1193,305	0,009	0,194	0,022	SWP15813	1193,307	0,011	0,291	0,028
SWP07558	1193,299	0,008	0,216	0,018	SWP15782	1193,359	0,011	0,198	0,026
SWP15780	1193,369	0,008	0,172	0,019	SWP15757	1193,316	0,011	0,172	0,025
SWP07587	1193,298	0,007	0,151	0,016	SWP15774	1193,383	0,012	0,189	0,027
SWP15755	1193,311	0,009	0,158	0,020	SWP07589	1193,289	0,009	0,204	0,021
SWP15778	1193,332	0,011	0,199	0,026	SWP07607	1193,309	0,011	0,150	0,025
SWP15786	1193,370	0,010	0,180	0,023	SWP15817	1193,321	0,008	0,195	0,019
SWP15815	1193,315	0,009	0,208	0,021	SWP07583	1193,342	0,007	0,198	0,015
SWP07560	1193,317	0,012	0,175	0,028	SWP15787	1193,351	0,011	0,202	0,026
SWP15751	1193,335	0,010	0,166	0,023	SWP15811	1193,327	0,009	0,183	0,020

Tabuľka 4.5: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.5 S II, $\lambda_0 = 1250,584 \text{ \AA}$

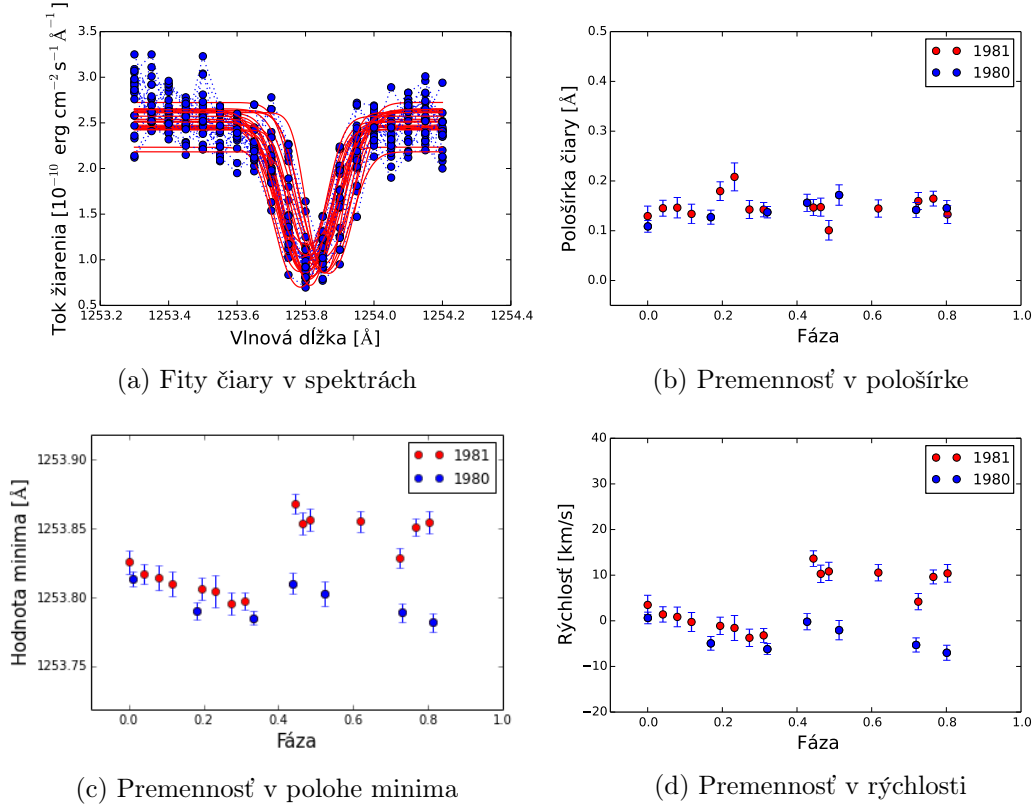


Obr. 4.5: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1250,584 \text{ \AA}$, $v_r = (5,1 \pm 7,4) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1250,666	0,010	0,182	0,024	SWP15753	1250,596	0,007	0,119	0,017
SWP07556	1250,579	0,005	0,136	0,011	SWP15813	1250,588	0,007	0,151	0,017
SWP07558	1250,579	0,005	0,125	0,011	SWP15782	1250,650	0,008	0,167	0,019
SWP15780	1250,627	0,008	0,142	0,020	SWP15757	1250,599	0,006	0,146	0,014
SWP07587	1250,561	0,006	0,109	0,013	SWP15774	1250,637	0,010	0,199	0,024
SWP15755	1250,601	0,005	0,126	0,011	SWP07589	1250,575	0,008	0,161	0,018
SWP15778	1250,607	0,006	0,118	0,015	SWP07607	1250,567	0,008	0,127	0,019
SWP15786	1250,654	0,007	0,141	0,016	SWP15817	1250,594	0,008	0,184	0,020
SWP15815	1250,586	0,005	0,135	0,011	SWP07583	1250,602	0,007	0,127	0,016
SWP07560	1250,578	0,010	0,137	0,024	SWP15787	1250,667	0,007	0,133	0,018
SWP15751	1250,606	0,009	0,143	0,021	SWP15811	1250,598	0,009	0,167	0,021

Tabuľka 4.6: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.6 S II, $\lambda_0 = 1253,811 \text{ \AA}$

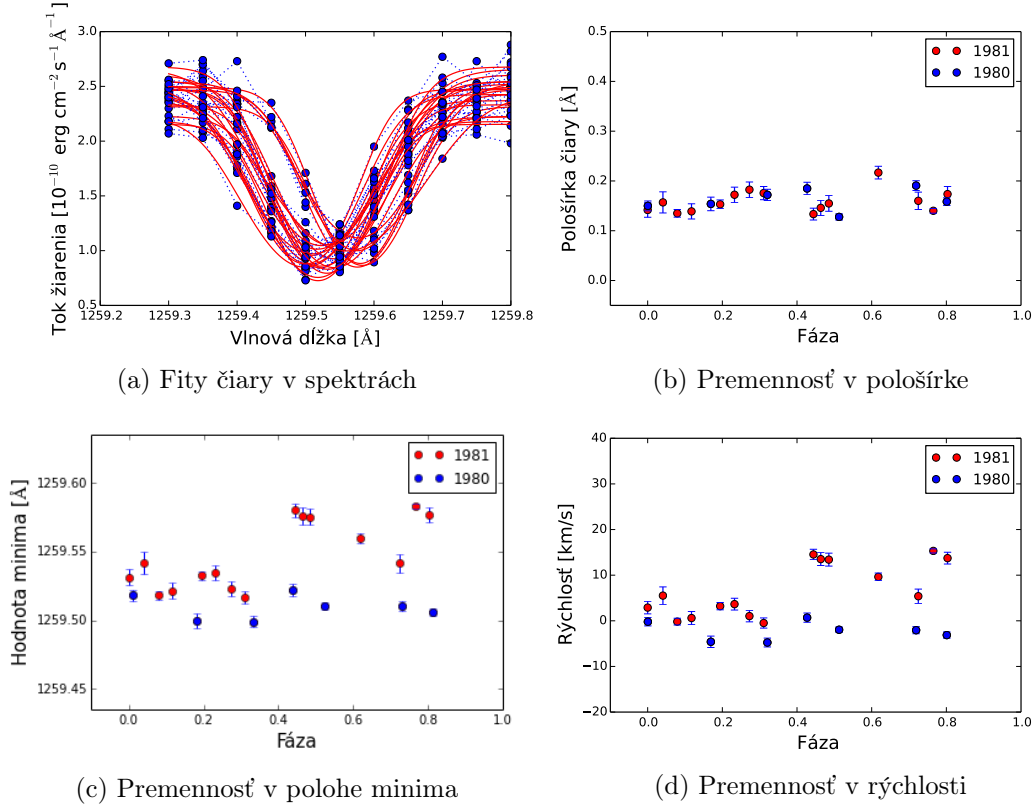


Obr. 4.6: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1253,811 \text{ \AA}$, $v_r = (1,8 \pm 6,2) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1253,868	0,007	0,147	0,016	SWP15753	1253,817	0,007	0,145	0,016
SWP07556	1253,802	0,009	0,172	0,021	SWP15813	1253,804	0,011	0,208	0,028
SWP07558	1253,810	0,007	0,156	0,017	SWP15782	1253,854	0,008	0,133	0,018
SWP15780	1253,851	0,006	0,165	0,015	SWP15757	1253,810	0,009	0,134	0,020
SWP07587	1253,782	0,007	0,145	0,016	SWP15774	1253,855	0,008	0,145	0,017
SWP15755	1253,815	0,009	0,146	0,021	SWP07589	1253,789	0,006	0,142	0,015
SWP15778	1253,829	0,007	0,160	0,017	SWP07607	1253,790	0,006	0,127	0,014
SWP15786	1253,854	0,008	0,147	0,018	SWP15817	1253,798	0,006	0,142	0,014
SWP15815	1253,795	0,008	0,143	0,018	SWP07583	1253,814	0,005	0,109	0,012
SWP07560	1253,785	0,005	0,137	0,011	SWP15787	1253,856	0,008	0,101	0,020
SWP15751	1253,826	0,009	0,129	0,020	SWP15811	1253,806	0,008	0,180	0,019

Tabuľka 4.7: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.7 S II, $\lambda_0 = 1259.519 \text{ \AA}$

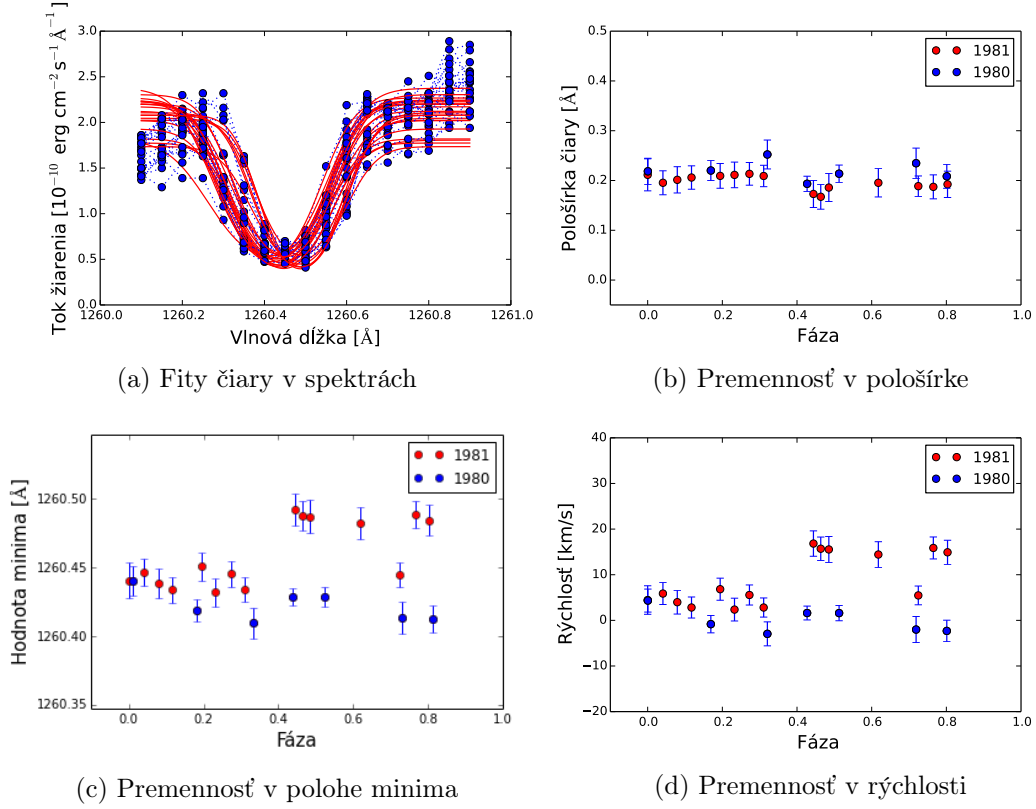


Obr. 4.7: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1259,519 \text{ \AA}$, $v_r = (3,9 \pm 6,4) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1259,580	0,005	0,133	0,012	SWP15753	1259,542	0,008	0,157	0,021
SWP07556	1259,511	0,003	0,128	0,006	SWP15813	1259,534	0,005	0,172	0,015
SWP07558	1259,522	0,004	0,185	0,012	SWP15782	1259,577	0,005	0,174	0,015
SWP15780	1259,583	0,002	0,140	0,005	SWP15757	1259,522	0,006	0,139	0,015
SWP07587	1259,506	0,003	0,158	0,008	SWP15774	1259,559	0,004	0,217	0,013
SWP15755	1259,518	0,003	0,135	0,008	SWP07589	1259,510	0,003	0,191	0,010
SWP15778	1259,542	0,007	0,160	0,017	SWP07607	1259,500	0,005	0,154	0,014
SWP15786	1259,576	0,006	0,146	0,015	SWP15817	1259,517	0,005	0,176	0,013
SWP15815	1259,523	0,005	0,182	0,015	SWP07583	1259,518	0,004	0,150	0,010
SWP07560	1259,499	0,004	0,172	0,011	SWP15787	1259,575	0,006	0,155	0,016
SWP15751	1259,531	0,006	0,142	0,015	SWP15811	1259,533	0,003	0,153	0,009

Tabuľka 4.8: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.8 Si II, $\lambda_0 = 1260,422 \text{ \AA}$

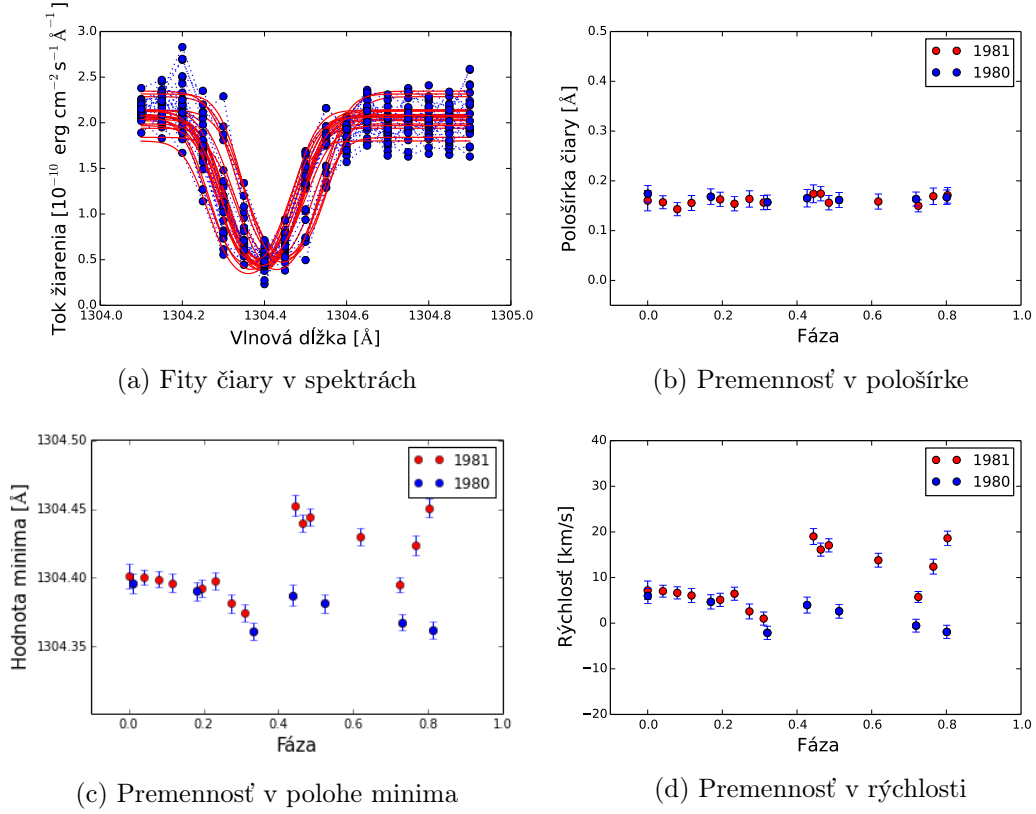


Obr. 4.8: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1260,422 \text{ \AA}$, $v_r = (6,0 \pm 6,4) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1260,493	0,012	0,173	0,027	SWP15753	1260,447	0,010	0,195	0,024
SWP07556	1260,429	0,007	0,214	0,017	SWP15813	1260,432	0,010	0,211	0,026
SWP07558	1260,429	0,006	0,193	0,015	SWP15782	1260,485	0,011	0,192	0,026
SWP15780	1260,489	0,010	0,187	0,024	SWP15757	1260,434	0,010	0,206	0,024
SWP07587	1260,412	0,010	0,208	0,024	SWP15774	1260,483	0,012	0,195	0,028
SWP15755	1260,439	0,011	0,201	0,026	SWP07589	1260,414	0,012	0,235	0,030
SWP15778	1260,445	0,009	0,189	0,020	SWP07607	1260,419	0,008	0,220	0,020
SWP15786	1260,488	0,011	0,167	0,025	SWP15817	1260,434	0,009	0,209	0,022
SWP15815	1260,445	0,009	0,213	0,023	SWP07583	1260,440	0,011	0,218	0,026
SWP07560	1260,410	0,011	0,252	0,029	SWP15787	1260,487	0,012	0,186	0,028
SWP15751	1260,441	0,013	0,211	0,032	SWP15811	1260,451	0,010	0,209	0,025

Tabuľka 4.9: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.9 Si II, $\lambda_0 = 1304,370 \text{ \AA}$

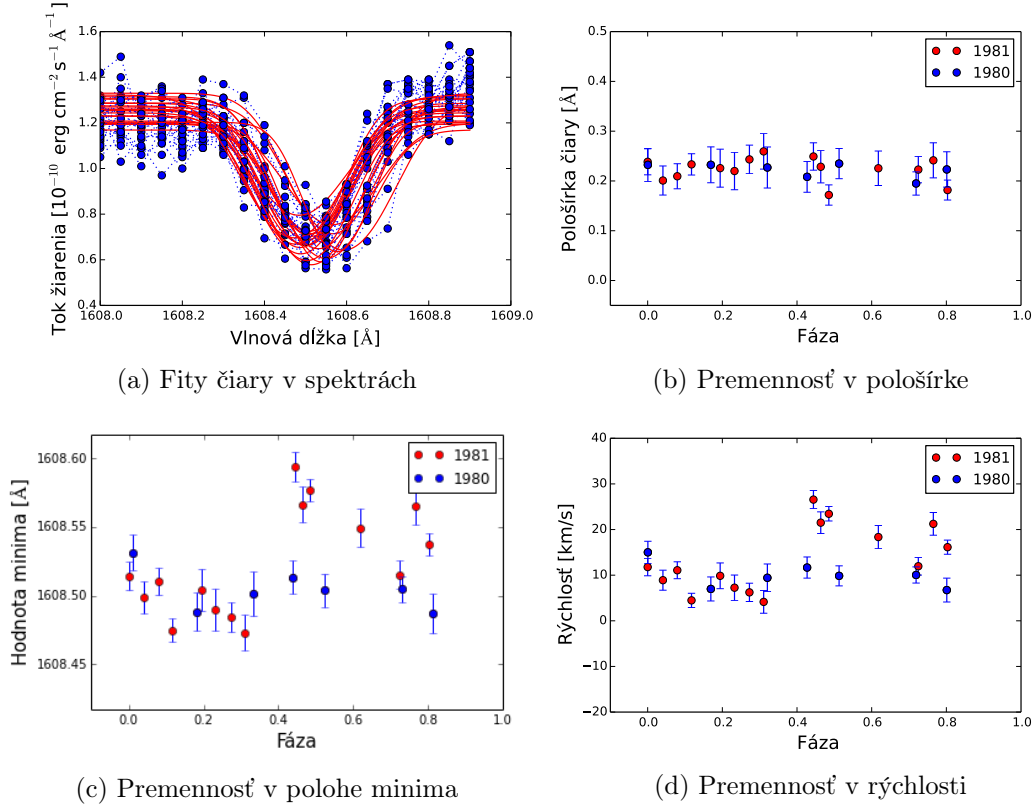


Obr. 4.9: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1304,370 \text{ \AA}$, $v_r = (7,1 \pm 6,2) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1304,453	0,008	0,174	0,018	SWP15753	1304,400	0,006	0,157	0,013
SWP07556	1304,381	0,007	0,161	0,015	SWP15813	1304,398	0,006	0,154	0,014
SWP07558	1304,387	0,008	0,165	0,018	SWP15782	1304,451	0,007	0,171	0,016
SWP15780	1304,424	0,007	0,169	0,016	SWP15757	1304,396	0,007	0,156	0,015
SWP07587	1304,362	0,006	0,167	0,015	SWP15774	1304,430	0,007	0,158	0,015
SWP15755	1304,399	0,006	0,143	0,013	SWP07589	1304,368	0,006	0,163	0,014
SWP15778	1304,395	0,005	0,150	0,012	SWP07607	1304,390	0,007	0,168	0,016
SWP15786	1304,440	0,006	0,174	0,015	SWP15817	1304,374	0,006	0,156	0,014
SWP15815	1304,381	0,007	0,164	0,016	SWP07583	1304,396	0,007	0,174	0,017
SWP07560	1304,361	0,006	0,157	0,014	SWP15787	1304,444	0,006	0,156	0,014
SWP15751	1304,401	0,009	0,160	0,020	SWP15811	1304,392	0,006	0,163	0,015

Tabuľka 4.10: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.10 Fe II, $\lambda_0 = 1608,45083 \text{ \AA}$

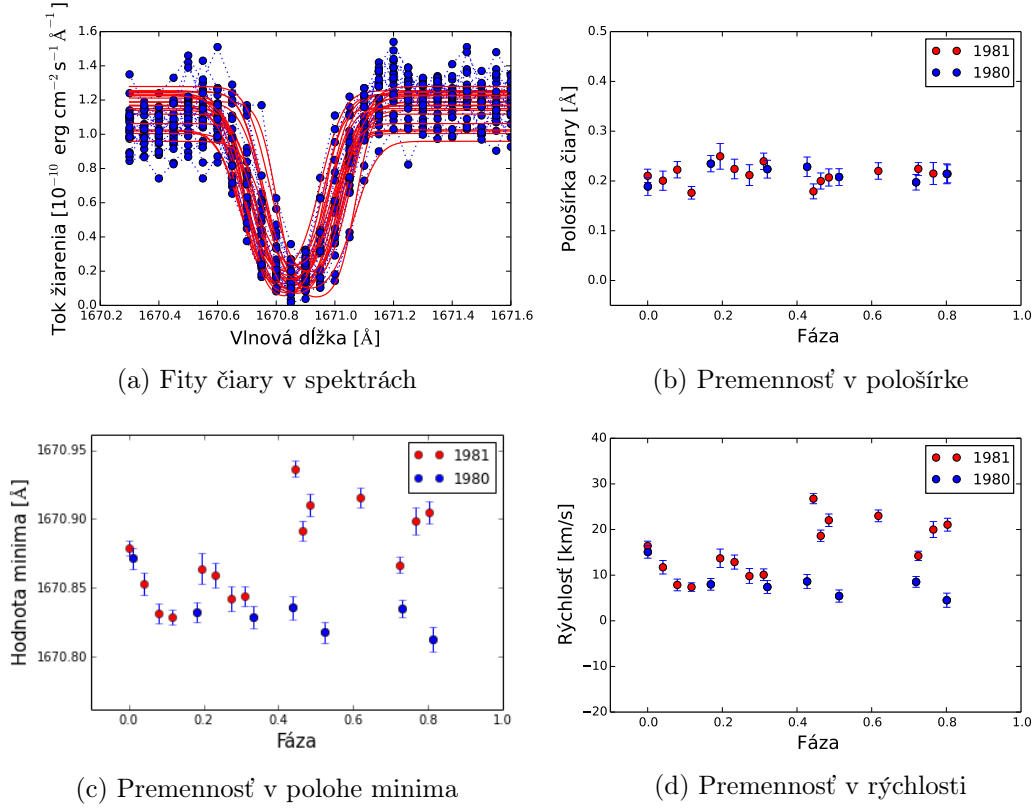


Obr. 4.10: Čiara medzihviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1608,45083 \text{ \AA}$, $v_r = (12,4 \pm 6,2) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1608,593	0,011	0,249	0,027	SWP15753	1608,499	0,012	0,201	0,029
SWP07556	1608,504	0,012	0,235	0,030	SWP15813	1608,490	0,015	0,220	0,038
SWP07558	1608,513	0,012	0,208	0,031	SWP15782	1608,537	0,008	0,182	0,020
SWP15780	1608,565	0,013	0,241	0,035	SWP15757	1608,475	0,008	0,233	0,021
SWP07587	1608,487	0,014	0,223	0,036	SWP15774	1608,549	0,014	0,225	0,035
SWP15755	1608,510	0,010	0,209	0,025	SWP07589	1608,505	0,009	0,195	0,023
SWP15778	1608,515	0,010	0,223	0,027	SWP07607	1608,488	0,014	0,232	0,036
SWP15786	1608,566	0,013	0,228	0,032	SWP15817	1608,473	0,013	0,259	0,036
SWP15815	1608,484	0,011	0,243	0,029	SWP07583	1608,531	0,013	0,232	0,033
SWP07560	1608,501	0,016	0,227	0,041	SWP15787	1608,577	0,008	0,172	0,020
SWP15751	1608,514	0,010	0,238	0,026	SWP15811	1608,504	0,015	0,226	0,038

Tabuľka 4.11: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.11 Al II, $\lambda_0 = 1670,7874 \text{ \AA}$



Obr. 4.11: Čiara medzhviezdneho prostredia $\lambda_0 = 1670,7874 \text{ \AA}$, $v_r = (13,3 \pm 6,2) \text{ km/s}$

Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$	Spektrum	$\lambda_{0G} [\text{\AA}]$	$\delta\lambda [\text{\AA}]$	$\tilde{w} [\text{\AA}]$	$\delta\tilde{w} [\text{\AA}]$
SWP15785	1670,937	0,006	0,179	0,015	SWP15753	1670,853	0,008	0,201	0,019
SWP07556	1670,818	0,007	0,208	0,017	SWP15813	1670,859	0,009	0,224	0,020
SWP07558	1670,835	0,008	0,228	0,020	SWP15782	1670,905	0,008	0,214	0,018
SWP15780	1670,899	0,010	0,215	0,022	SWP15757	1670,829	0,005	0,176	0,013
SWP07587	1670,813	0,009	0,214	0,020	SWP15774	1670,916	0,007	0,220	0,017
SWP15755	1670,831	0,007	0,223	0,017	SWP07589	1670,835	0,007	0,197	0,016
SWP15778	1670,867	0,006	0,224	0,013	SWP07607	1670,832	0,007	0,235	0,016
SWP15786	1670,891	0,007	0,200	0,016	SWP15817	1670,844	0,007	0,240	0,016
SWP15815	1670,842	0,009	0,212	0,021	SWP07583	1670,871	0,008	0,189	0,018
SWP07560	1670,829	0,008	0,224	0,018	SWP15787	1670,910	0,008	0,207	0,017
SWP15751	1670,879	0,006	0,210	0,013	SWP15811	1670,864	0,011	0,250	0,026

Tabuľka 4.12: Parametre študovaných veličín s ich chybami

4.12 Diskusia

Spriemerované radiálne rýchlosti pre jednotlivé spektrálne čiary medzihviezdneho prostredia sme zhrnuli v tabuľke 4.13.

λ_0 [Å]	v_r [km/s]	δv_r [km/s]	λ_0 [Å]	v_r [km/s]	δv_r [km/s]
1193,290	9,9	6,6	1260,422	6,0	6,4
1250,584	7,4	7,4	1304,370	7,2	6,2
1253,811	1,8	6,2	1608,45083	12,4	6,2
1259,519	3,9	6,4	1670,7874	13,3	6,2

Tabuľka 4.13: Radiálne rýchlosti a ich chyby určené pre rôzne spektrálne čiary

Ako vidno, výsledky sú zaťažené veľkou neistotou. Vznikla predovšetkým spriemerovaním hodnôt, ktoré sú vzájomne posunuté v rozmedzí 15 km/s, viď Obr. 4. 4 b) – 4.11 b). Tieto body nasnímal družica IUE v priebehu 2 dní. Predpokladáme preto, že sa jedná o chybu zariadenia, ktoré nebolo v danej dobe stabilné. Váženým aritmetickým priemerom sme získali priemernú hodnotu radiálnej rýchlosti $\bar{v}_r = (6.9 \pm 6.5)$ km/s.

Na porovnanie našich dát sme si vybrali dve najbližšie hviezdy z OB 1b asociácie, pre ktoré boli radiálne rýchlosti medzihviezdneho prostredia premerané v publikáciách Savage et al. (2001) a Cartledge et al. (2004). Jedná sa o hviezdy s označením HD 36841 a HD 37903. Hodnoty radiálnych rýchlostí pre spektrálne čiary C IV a Si II sú uvedené v tabuľke 4.14. V publikácii Cartledge et al. (2004) bola uvedená len jedna hodnota pre HD 36841: $(29,9 \pm 3,2)$ km/s.

Hviezda	$v_{r,C\ IV}$ [km/s]	$v_{r,Si\ II}$ [km/s]
HD 36841	$-7 \pm 3,1$	$12,9 \pm 3,2$
HD 37903	$-12,3 \pm 5,8$	$-13,1 \pm 1,1$

Tabuľka 4.14: Radiálne rýchlosti komponentov medzihviezdnej látky určené pre hviezdy v Orion OB1b asociácii, (Savage et al., 2001)

Z tohto porovnania vyplýva, že naše dáta by sa dali priradiť ku komponente Si II hviezdy HD 36841. To môže poukazovať na výskyt mračna, ktoré je buď dosť veľké alebo dosť blízko na to, aby cez neho prechádzalo žiarenie z oboch hviezd. Obr. 3.2. naznačuje, že by sa mohlo jednať o vzdialenejšiu časť molekulového mračna Orion B.

Doba medzi meraniami $\Delta t = 715,48029$ dní nám poskytuje informáciu, že študované mračno bolo v tomto čase homogénne na dráhe $l = 2843.6$ AU.

Záver

V našej práci sme sa zaoberali štúdiom spektrálnych čiar medzihviezdneho prostredia v spektre hviezdy σ Ori E. V spektrách zosnímaných družicou IUE sme identifikovali 17 čiar medzihviezdneho prostredia (C I, C II, S II, Si II, Fe II, Al II) a 5 čiar pochádzajúcich z hviezdnej atmosféry (Al III, C IV, Si IV). Pre štúdium sme si vybrali 8 čiar, ktorých neistoty fitovaných parametrov boli najmenšie. Porovnali sme fity Gaussovým a Lorenzovým profilom, pričom nám vyšli nižšie relatívne neistoty parametrov pre Gaussov profil. V ďalších častiach našej práce sme sa preto rozhodli používať pre štúdium spektrálnych čiar práve Gaussov profil.

Vybrané spektrálne čiary sme fitovali v 22 spektrách zosnímaných v rokoch 1980 a 1981, ku ktorým sme najskôr priradili fázu rotácie. Následne sme študované parametre, šírka čiary v polovici minima (\tilde{w}) a poloha minima čiary, vyniesli do grafov. Rozdiel polohy minima získaného laboratórne a z fitu sme prepočítali na radiálnu rýchlosť a opäť vyniesli do grafov.

Z výsledkov vyplýva, že sa šírka čiar v polovici minima počas rotácie hviezdy mení len v rozmedzí určených neistôt. Zaujímavejšie výsledky ukazuje závislosť polohy minima (radiálnej rýchlosti) na rotácii hviezdy. Ukazuje sa, že až na 7 spektier sa poloha (priemerná rýchlosť) výrazne nemení. Spomínaných 7 spektier družica vyhotovila 17. a 18.12.1981 a má hodnoty radiálnej rýchlosti posunuté približne o 15 km/s vyššie než zvyšok. Tieto výsledky sa dajú vysvetliť napríklad nestabilitou spektrografu družice.

Napriek tejto chybe sme sa pokúsili porovnať naše hodnoty radiálnych rýchlostí medzihviezdnej látky s dvoma hviezdami nachádzajúcimi sa v Orión OB1b asociácii. Možnú zhodu sme našli v publikácii (Savage et al., 2001) pri hviezde HD 36841, kde sa pre jednu z komponent udáva radiálna rýchlosť mračna ($12,9 \pm 3,2$) km/s.

Zároveň sme dospeli k záveru, že na študovanie premennosti čiar v spektrách získaných z družice IUE by bolo potrebné urobiť korekciu na predpokladanú chybu prístroja. V prípade, že by sme chceli študovať premennosť spektrálnych čiar vznikajúcich v atmosfére hviezdy, mohli by sme práve čiary medzihviezdneho prostredia použiť na túto korekciu. Vyplýva to z predpokladu, že sa tieto čiary nemenia a dali by sa tak použiť ako vzťažné body na odstránenie chyby.

Literatúra

- Bally, J., Langer, W. D., Stark, A. A., & Wilson, R. W. 1987, *The Astrophysical Journal*, 312, L45
- Bally, J. 2008, *Handbook of Star Forming Regions, Volume I*, 459
- Bally, J., Langer, W. D., Wilson, R. W., Stark, A. A., & Pound, M. W. 1991a, *Fragmentation of Molecular Clouds and Star Formation*, 147, 11
- Bally, J., Langer, W. D., & Liu, W. 1991b, *The Astrophysical Journal*, 383, 645
- Blaauw, A. 1964, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2, 213
- Briceño, C., Hartmann, L., Hernández, J., et al. 2007, *The Astrophysical Journal*, 661, 1119
- Brown, A. G. A., de Geus, E. J., & de Zeeuw, P. T. 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 289, 101
- Brown, A. G. A., Hartmann, D., & Burton, W. B. 1995, *Astronomy and Astrophysics*, 300, 903
- Cartledge, S. I. B., Lauroesch, J. T., Meyer, D. M., & Sofia, U. J. 2004, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 613, 1037
- Diehl, R., Cerviño, M., Hartmann, D. H., & Kretschmer, K. 2004, *New Astronomy Reviews*, 48, 81
- Dyson J.E., Williams D.A., *The physics of the interstellar medium*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1997.
- Green, D. A. 1991, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 253, 350

- Green, D. A., & Padman, R. 1993, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 263, 535
- Heiles, C. 1976, *The Astrophysical Journal*, 208, L137
- Hesser, J. E., Walborn, N. R., & Ugarte, P. P. 1976, *Nature*, 262, 116
- Hollas J.M., *Modern Spectroscopy 4th ed.*, John Wiley & Sons LTD, 2004
- Kemp, J. C., & Herman, L. C. 1977, *Astronomy and Astrophysics*, 218, 770
- Landstreet, J. D., & Borra, E. F. 1978, *The Astrophysical Journal*, 224, L5
- Leone, F., & Umana, G. 1993, *Astronomy and Astrophysics*, 268, 667
- Maddalena, R. J., Morris, M., Moscowitz, J., & Thaddeus, P. 1986, *The Astrophysical Journal*, 303, 375
- Mikulášek Z., Krtička J., *Úvod do fyziky hvězd*, ÚTFA PŘF Masarykova univerzita, Brno, 2005
- Pedersen, H., & Thomsen, B. 1977, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 30, 11
- Reynolds, R. J., & Ogden, P. M. 1979, *The Astrophysical Journal*, 229, 942
- Rutten, R. J., *Radiative Transfer in Stellar Atmospheres*, Institute of Astrophysical Astrophysics, Oslo, 2003
- Savage, B. D., Meade, M. R., & Sembach, K. R. 2001, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 136, 631
- Sivan, J. P. 1974, *Astronomy and Astrophysics*, 16, 163
- Smith, M. A., & Groote, D. 2001, *Astronomy and Astrophysics*, 372, 208
- Spitzer L. Jr., *Physical processes in the Interstellar Medium*, John Wiley & Sons, Canada, 1978.
- Townsend, R. H. D., Owocki, S. P., & Groote, D. 2005, *The Astrophysical Journal*, 630, L81
- Townsend, R. H. D., Oksala, M. E., Cohen, D. H., Owocki, S. P., & ud-Doula, A. 2010, *The Astrophysical Journal*, 714, L318

Vanýsek V., *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia, Praha, 1980.

Walborn, N. R. 1974, *The Astrophysical Journal*, 191, L95

Elektronické zdroje:

[e₁] HST, 2013, (<http://apod.nasa.gov/apod/ap130605.html>)

[e₂] HST, 2011, (<http://apod.nasa.gov/apod/ap111225.html>)

[e₃] HST, 2013, (<http://apod.nasa.gov/apod/ap130422.html>)

[e₄] R. Gendler, (<http://www.robgendlerastropics.com/M45STLmosaic.html>)

[e₅] T. Harrison, (<http://astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast105/Ast105week07.html>)

[e₆] D. Feldman, (<http://www.bdnyc.org/2012/03/02>)

[e₇] Rogelio Bernal Andreo,

(<http://www.deepskycolors.com/archive/2010/10/22/orion-from-Head-to-Toes.html>)

[e₈] Chandra (NASA), Spitzer (NASA), Calar Alto (O. Krause et al.)
(<http://apod.nasa.gov/apod/ap090317.html>)

[e₉] The Mikulski Archive for Space Telescopes
(<http://archive.stsci.edu/iue>)

[e₁₀] National Institute of Standards and Technology, USA
(http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)