

MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Studium čar mezihvězdného prostředí ve spektrech
získaných družicí FUSE**

Nikola Faltová

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

Brno 2017



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2016/2017

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Studentka: Nikola Faltová

Program: Fyzika

Obor: Astrofyzika

Ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky PíF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce: Studium čar mezihvězdného prostředí ve spektrech získaných družicí FUSE

Název práce anglicky: Study of interstellar lines in the spectra obtained using FUSE satellite

Oficiální zadání:

Družice FUSE získala velké množství spekter horkých hvězd, ve kterých jsou patrné také čáry vznikající v mezihvězdném prostředí. Cílem bakalářské práce je studium čar mezihvězdného prostředí ve spektrech získaných družicí FUSE. Ve vybraných spektrech horkých hvězd budou identifikovány čáry vznikající v mezihvězdném prostředí. Čáry budou fitovány vhodně zvolenou funkcí a bude určena rychlost jednotlivých oblaků mezihvězdné látky. Získané výsledky budou diskutovány.

Literatura:

SPITZER, Lyman. *Physical processes in the interstellar medium*. New York: John Wiley & Sons, 1978. xvii, 318. ISBN 0471022322.

DYSON, John Edward a David Arnold WILLIAMS. *The physics of the interstellar medium*. 2nd ed. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1997. xiv, 165 s. ISBN 0-7503-0306-9.

Jazyk závěrečné práce: *česky*

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

Datum zadání práce: 20. 10. 2016

V Brně dne: 24. 11. 2016

Souhlasím se zadáním (podpis, datum): *29. 11. 2016*

Nikola Faltová

Nikola Faltová
studentka

J. Krτίčka

prof. Mgr. Jiří Krτίčka, Ph.D.
vedoucí práce

R. von Unger

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

Bibliografický záznam

Autor:	Nikola Faltová Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Studium čar mezihvězdného prostředí ve spektrech získaných družicí FUSE
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Akademický rok:	2016/2017
Počet stran:	48
Klíčová slova:	Mezihvězdná látka, družice FUSE, UV

Bibliographic Entry

Author: Nikola Faltová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Study of interstellar lines in the spectra obtained using FUSE satellite

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

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

Academic Year: 2016/2017

Number of Pages: 48

Keywords: Interstellar medium, FUSE space telescope, UV

Velmi děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu prof. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D. za trpělivost, vlídnost a cenné rady. Dále děkuji mým rodičům za podporu a pochopení během studia. Michalovi Prišegenovi za odborné rady a Matúši Kockovi za hlubší obeznámení s Gnuplotem, oběma děkuji za ochotu pomoci. Děkuji Šklíbovi.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně, pouze za pomoci uvedených zdrojů a dle pokynů vedoucího práce.

V Brně dne

Nikola Faltová

Abstrakt:

Tato práce se zabývá studiem mezihvězdné látky ve směru hvězd SK -66 169, SK -67 167 a SK -67 111, které se nacházejí ve Velkém Magellanově oblaku. V první části teoreticky popisují horké hvězdy a mezihvězdnou látku. Ve druhé části zpracovávám spektra pořízená družicí FUSE, která byla pořízena v rozsahu vlnových délek 900 – 1 200 Å. Cílem práce je identifikovat absorpční spektrální čáry mezihvězdné látky v těchto spektrech a určit radiální rychlost jednotlivých oblaků mezihvězdné látky.

Abstract:

This thesis deals with the interstellar medium along the line of sight to stars SK -66 169, SK -67 167 a SK -67 111, located in the Large Magellanic Cloud. In the first part of the thesis, I give a theoretical description of hot stars and interstellar matter. The second part focuses on the analysis of the spectra obtained by the FUSE mission, which span the spectral range from 900 to 1200 Å. The aim of this work is to identify the spectral absorption lines arising due to the presence of the interstellar medium and to determine the radial velocities of the intervening interstellar clouds that produce this absorption.

Obsah

1	Mezihvězdná látka	9
	Úvod	9
1.1	Objev mezihvězdné látky	10
1.2	Rozložení mezihvězdné látky v prostoru	10
1.3	Vztah mezihvězdné látky a hvězd	10
1.4	Horké hvězdy	11
1.4.1	Herbigovy hvězdy typu Ae/Be	11
1.4.2	Horké hvězdy hlavní posloupnosti	12
1.4.3	Proměnné hvězdy typu δ Scuti	12
1.4.4	Proměnné hvězdy typu β Cephei	12
1.4.5	Hvězdy typu Be	13
1.4.6	Obří a veleobří populace I	13
1.4.7	Wolfovy-Rayetovy hvězdy	13
1.4.8	Zářivě modré proměnné hvězdy	13
1.4.9	Horcí podtrpaslíci	14
1.4.10	Jádra planetárních mlhovin	14
1.4.11	Bílí trpaslíci	14
1.4.12	Horizontální větev obrů populace II	14
2	Formy mezihvězdné látky	16
2.1	Mezihvězdný prach	16
2.1.1	Oblaka prachu	16
2.2	Mezihvězdný plyn	17
2.2.1	Oblasti H I	18
2.2.2	Oblasti H II	18
2.2.3	Molekulová oblaka	19
2.2.4	Planetární mlhoviny	19
2.2.5	Zbytky po supernovách	20
2.2.6	Koronální plyn	21
2.2.7	Mezegalaktická látka	21
3	Studium mezihvězdné látky	22
3.1	Družice FUSE	22
3.2	Spektrum a spektrální čáry	23
3.3	Interakce záření a hmoty	24
3.4	Mezihvězdná extinkce	25

4	Zpracování dat	28
4.1	Vybrané hvězdy pozorované družicí FUSE	28
4.2	Identifikace spektrálních čar	30
4.3	Fitování spektrálních čar	31
4.4	Radiální rychlosti	44
4.5	Diskuze výsledků	46
	Závěr	47
	Seznam použité literatury	48
	Elektronické zdroje	48

Kapitola 1

Mezihvězdná látka

V následující kapitole jsem čerpala ze zdrojů: [1], [2], [3], [4], [5] a [6].

Úvod

Prostor mezi galaxiemi i mezi hvězdami plní hmota, která je tvořena elementárními prachovými částicemi, atomy rozličných prvků jak v základním, tak v ionizovaném stavu, molekulami, částicemi kosmického záření a fotony různých vlnových délek. Pojmenovali jsme ji mezihvězdná látka, anglicky interstellar medium (ISM). Hypotetickou temnou (skrytou) hmotu, o které víme pouze díky jejím gravitačním účinkům do mezihvězdné látky neřadíme. Hustota mezihvězdné látky je velice nízká, typicky je hustota mezihvězdné hmoty v galaktickém disku $5 \cdot 10^{-21}$ kg/m³. Kdyby se nám podařilo takovéto hustoty dosáhnout v laboratořích na Zemi, považovali bychom ji za vakuum.

Mezihvězdná látka plní ve vesmíru velice důležitou funkci, díky ní se formují nové hvězdy i jejich planetární systémy. V naší Galaxii není rozmístěna rovnoměrně, vytváří oblaka o různé hustotě, velikosti i teplotě. Rozkládá se zde převážně ve spirálních ramenech, která jsou v tenké vrstvě galaktické roviny. Z celkové viditelné hmoty v naší Galaxii tvoří asi 10 %. Poměr hmotnosti plynu a prachu je zde 100:1.

Tato látka je značně obohacena o hmotu odmrštěnou umírajícími hvězdami. Zeslabuje svit hvězd, který jí prochází tzv. extinkcí. Na extinkci se podílí jak plynná, tak i prachová složka mezihvězdné hmoty rozptylem a absorpcí světla. Protože oblaka mezihvězdné hmoty se hojně vyskytují v blízkosti horkých hvězd, můžeme pozorovat jejich nádhernou záři. Vzniká tak, že záření z hvězdy ionizuje vodík, který je v plynném oblaku mezihvězdné hmoty zastoupen v největším množství. V okolí těchto horkých hvězd tvoří mezihvězdnou hmotu teplý plyn s teplotou zhruba 8 000 K a hustotou 0,1 – 1 částice/cm³. Horký plyn bychom hledali v pozůstatcích po supernovách, zde jsou miliony kelvinů a hustota 0,01 částice/cm³. Dále existuje ve formě studeného plynu jako atomární vodík (HI) nebo molekulová mračna, zde jsou teploty menší než 100 K hustota 10 částic/cm³.

Za jasných nocí můžeme mezihvězdnou látku vidět i pouhým okem, například když zaměříme svůj pohled k Orionu, spatříme emisní Velkou mlhovinu v Orionu (M42), která je od nás vzdálena 1 600 světelných let a je nejjasnější mlhovinou na naší obloze.

1.1 Objev mezihvězdné látky

Už v 5. století př. n. l. starořecký učenec Leukippos uvažoval mezihvězdný prostor jako tzv. éter, pátý živel, kvintesenci. Jeho pojetí mezihvězdné látky se však od našeho značně liší. Již v devatenáctém století se někteří vědci díky teoretickým výpočtům domnívali, že existuje mezihvězdná látka. S objevem přišel v roce 1930 americký astronom švýcarského původu Robert Julius Trümpler, pracující na Lickově observatoři. Prokázal, že se mezihvězdná látka projevuje extinkcí světla. Studoval závislost hvězdných velikostí a úhlového rozměru stovek otevřených hvězdokup v souvislosti s jejich vzdáleností. Trümpler na základě své práce zjistil systematickou odchylku, která souvisí se skutečnou vzdáleností hvězdokup a uvádí, že zeslabení světla činí průměrně 0,5 mag/1 kpc. V roce 1932 holandský astronom Jan Hendrik Oort uvádí, že mezihvězdná látka působí na své okolí gravitací. Roku 1939 dánský astronom Bengt Georg Daniel Stromgren, zkoumající ionizaci a excitaci atomů vodíku v mezihvězdné látce, přichází s myšlenkou, že kolem horkých hvězd jsou v důsledku působení UV záření vytvořeny oblasti H II ionizovaného vodíku.

1.2 Rozložení mezihvězdné látky v prostoru

Rozložení mezihvězdné látky v prostoru naší Galaxie je značně nerovnoměrné. Většina oblaků je soustředěna ve spirálních ramenech galaktického disku, který má poloměr 25 kpc a tloušťku 250 pc. Průměrná hustota mezihvězdné látky v galaktickém disku je $5 \cdot 10^{-21} \text{ kg/m}^3$, čemuž odpovídá koncentrace 10^6 atomů/m^3 . Díky pozorování můžeme říci, že nejvyšší hustoty nalezneme v centrech obřích molekulových oblaků. Zde je hustota o 5 až 6 řádů vyšší. V prostoru mezi oblaky je však hustota 10^5 atomů/m^3 .

Z pozorování víme, že v galaxiích je rozložení mezihvězdné látky asymetrické. Jiné galaxie jsou pro zkoumání mezihvězdné látky vhodnější. Studium vzdálenější mezihvězdné hmoty v naší Galaxii je pro nás obtížné, jelikož k nám bližší mezihvězdná hmota ji zakrývá. Nacházíme se v disku Galaxie a snažíme se dívat skrz mezihvězdnou látku.

1.3 Vztah mezihvězdné látky a hvězd

Mezihvězdná látka je pro hvězdy velice důležitá a interagují s ní celý svůj život. Zárodky nových hvězd vznikají gravitačním zhroucením hustého, relativně chladného oblaku mezihvězdné hmoty. V průběhu svého života hvězda ztrácí část své obálky například díky hvězdnému větru nebo výbuchu supernov. Jelikož termonukleární reakce probíhají v nitrech hvězd, hvězdný vítr mladých hvězd navrácí do prostoru materiál, který není obohacen o těžší prvky a mohou z něj vznikat další zárodečná mračna. Těžší prvky se do mezihvězdného prostoru

dostávají například právě kvůli výbuchům supernov. Velká část mezihvězdné hmoty je také vyvržena hvězdami v pozdní fázi jejich vývoje.

1.4 Horké hvězdy

Ve své bakalářské práci se zmiňuji o horkých hvězdách proto, že spektra, která zkoumám, patří těmto hvězdám a nesou známky průchodu mezihvězdnou látkou.

Hvězdy dělíme na chladné a horké. Horkými hvězdami nazýváme ty, které mají vyšší efektivní teplotu než 7 000 K. Tuto hranici lidé určili kvůli způsobu přenosu energie v atmosférách hvězd. V horkých hvězdách (nad 7 000 K) se energie přenáší zářivou difuzí, zatímco u chladných hvězd konvekcí. Horkými hvězdami jsou hvězdy spektrálního typu O, B, A a částečně F. (Hranici pro horké hvězdy nalezneme u F2). Mezi horké hvězdy patří například Deneb, Sirius, Regulus, Altair a Vega. Naše Slunce se s efektivní teplotou 5 780 K řadí mezi hvězdy chladné. Horké hvězdy obecně nemají korónu a magnetické pole mají stabilní. Předpokládá se, že prvními hvězdami ve vesmíru byly právě velmi hmotné, horké hvězdy obsahující vodík a helium. Tyto hvězdy vybuchly jako supernovy typu II, a obohatily tak okolní prostor o těžší prvky.

Pokud pohlédneme na noční nebe, horké hvězdy tvoří dvě pětiny těch nejjasnějších hvězd díky svému zářivému výkonu. Vztah pro zářivý výkon je

$$L = 4\pi r^2 F, \quad (1.1)$$

kde L je zářivý výkon hvězdy, r je vzdálenost hvězdy, F je bolometrická jasnost (tedy hustota zářivého toku, je to tok záření, který za 1s projde 1m^2 plochy kolmo nastavené ke směru paprsků přicházejících z hvězdy). Pro zářivý výkon platí také vztah

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4, \quad (1.2)$$

kde R je poloměr hvězdy, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a T_{ef} je efektivní teplota hvězdy (teplota černého tělesa, které vyzařuje z jednoho m^2 stejné množství energie jako daná hvězda).

1.4.1 Herbigovy hvězdy typu Ae/Be

Mezi horké hvězdy patří nepravidelně proměnné Herbigovy hvězdy typu Ae/Be náležící do spektrálních typů A, B. Typicky mají hmotnost větší než $1,5 M_{\odot}$. Jsou to hvězdy, které prozatím nedosáhly hlavní posloupnosti, probíhá v nich gravitační smršťování.

1.4.2 Horké hvězdy hlavní posloupnosti

Nejvíce zastoupeny jsou mezi horkými hvězdami horké hvězdy hlavní posloupnosti (na HR diagramu). Na hlavní posloupnosti hvězda tráví většinu času svého aktivního života a projde jí každá hvězda s hmotností vyšší než $0,075 M_{\odot}$. V jejím nitru se díky termonukleárním reakcím přeměňuje vodík na helium.

Víme, že zářivý výkon hvězdy je úměrný třetí mocnině hmotnosti hvězdy. Můžeme tedy říci, že čím hmotnější hvězda je, tím méně času tráví na hlavní posloupnosti. Také zde platí, že čím má hvězda větší hmotnost M , tím větší má poloměr R a efektivní teplotu T_{ef} a také tím menší má průměrnou hustotu a povrchové gravitační zrychlení g . Horké hvězdy hlavní posloupnosti mají hmotnosti typicky více než $1,35 M_{\odot}$. Do této kategorie patří i výše zmíněný Sirius, Regulus, Altair a Vega. Mezi chladnými a horkými hvězdami na hlavní posloupnosti je rozdíl také v jejich rotaci. Zatímco horké hvězdy obecně rotují rychle, chladné hvězdy na hlavní posloupnosti rotují o 1 až 2 řády pomaleji.

Modří opozdilci jsou horké, rychle rotující hvězdy v hlavní posloupnosti. Mají hmotnost $1,2$ až $1,7 M_{\odot}$ a stáří nejméně 10 miliard let. Jsou jasní a často se objevují v centrech hvězdokup. Je pravděpodobné, že vznikly srážkou hvězd v těchto hvězdokupách, při které se promíchal materiál hvězdy a ta se stala opět složením homogenní.

1.4.3 Proměnné hvězdy typu δ Scuti

Na HR diagramu pás hvězd hlavní posloupnosti křížuje pás nestability, jenž obsahuje pulzující proměnné hvězdy. Tyto proměnné hvězdy typu δ Scuti pulzují současně v několika módech a proto je jejich amplituda i tvar světelné křivky časem proměnlivý. Jejich světelné křivky mají amplitudu od $0,003$ do $0,9$ mag a periodu menší než 2 dny.

1.4.4 Proměnné hvězdy typu β Cephei

Dalšími horkými proměnnými hvězdami na hlavní posloupnosti jsou proměnné hvězdy typu β Cephei. Tyto hvězdy jsou spektrálního typu B0 až B2 a na hlavní posloupnosti se vyskytují v horní části. Jejich světelné křivky mají amplitudu od $0,01$ do $0,3$ mag a periodu $0,1$ až $0,6$ dne.

1.4.5 Hvězdy typu Be

Mezi horké hvězdy také patří nepříliš početná skupina B[e] hvězd. Jsou to hvězdy spektrálního typu B. Do této skupiny hvězd spadají jak horké hvězdy hlavní posloupnosti, tak i veleobři v pokročilém stádiu vývoje a proto-planetární mlhoviny. Díky prachové obálce okolo hvězdy, vyzařují velkou část svého záření v infračervené oblasti spektra. Vyzařování v optické a UV oblasti spektra je podobné jako u hvězd raných typů. Ve spektru těchto hvězd se nachází emisní spektrální čáry, které se zde objevují díky plynné obálce, která hvězdu obklopuje.

1.4.6 Obři a veleobři populace I

Obři a veleobři populace I jsou chemicky nehomogenní hmotné hvězdy v pokročilém stádiu vývoje. Hvězdy populace I dosahují stáří nanejvýš několik miliard let a nalezneme je pouze v galaktickém disku. Mají vyšší podíl těžších prvků. V těchto hvězdách už vodík v jádře vyhořel a vodíkové termonukleární reakce probíhají ve slupce, která obklopuje heliové jádro. Příkladem je hvězda náležející do souhvězdí Labutě veleobr Deneb.

1.4.7 Wolfovy-Rayetovy hvězdy

Wolfovy-Rayetovy hvězdy jsou dalšími horkými hvězdami, také v pokročilém stádiu vývoje. Efektivní teplota těchto hvězd je 30 000 až 70 000 K, a jejich poloměr se pohybuje od 2 do 20 R_{\odot} . V jejich spektrech nalezneme silné emisní čáry vzniklé opět v obálce obepínající hvězdu, do které se materiál dostává díky hvězdnému větru. Kvůli tomuto hvězdnému větru, jehož rychlost je 1 000 až 3 000 km/s, hvězdy výrazně ztrácí svoji obálku. Dle spektra dělíme Wolfovy-Rayetovy hvězdy na: WN, kde nalezneme především čáry ionizovaného hélia, dusíku a vodíku, WC, kde nalezneme především čáry hélia, uhlíku, kyslíku a vodíku a WO, kde nalezneme velice silné čáry kyslíku. Wolfovy-Rayetovy hvězdy poznáme podle spektra, tyto hvězdy nemají žádné absorpční čáry ve viditelné oblasti spektra, mají zde pouze emisní spektrální čáry.

1.4.8 Zářivě modré proměnné hvězdy

Zářivě modré proměnné hvězdy jsou velice hmotní veleobři. Jedná se o nestabilní hvězdy, které za zvýšené jasnosti nepravidelně uvolňují do prostoru část své hmoty. Díky tomuto procesu se kolem dané hvězdy vytvoří hustá obálka s efektivní teplotou 8 000 až 9 000 K. Uvnitř této velké obálky nalezneme hvězdu

s povrchovou teplotou 20 000 až 25 000 K. Ve spektrech zářivě modrých proměnných hvězd se objevují čáry vodíku, helia a železa.

1.4.9 Horcí podtrpaslíci

K horkým hvězdám patří také horcí podtrpaslíci, obsahující vysoký podíl helia. V jádru hvězdy se spaluje helium na kyslík a uhlík. Horcí podtrpaslíci obecně s efektivní teplotou až 20 000 – 60 000 K jsou málo hmotnými horkými hvězdami.

1.4.10 Jádra planetárních mlhovin

Planetární mlhovina je vnější vrstva červeného obra, kterou odhodil v závěru svého života. V centrální části této obálky plynu nalezneme horkou hvězdu s efektivní teplotou 20 000 až 250 000 K. Tato horká hvězda obsahuje husté, elektronově degenerované uhlíkokyslíkové jádro s hmotností typicky $0,6 M_{\odot}$. Jádro hvězdy silně vyzařuje v UV oblasti spektra a excituje obálku plynu, která jej obklopuje. Ta září desítky tisíc let, načež se rozptýlí do prostoru.

1.4.11 Bílí trpaslíci

Bílý trpaslík je velice malá hvězda, velká asi jako Země. Jeho hmotnost se pohybuje od 0,1 do $1,4 M_{\odot}$. Díky tomuto rozměru a hmotnosti je hustota hvězdy značně vysoká 10^7 až 10^{11} kg/m³. Žádný bílý trpaslík není viditelný pouhým okem, absolutní hvězdná velikost těchto hvězd je 10 až 15 mag. Kvůli svým, na hvězdu menším rozměrům, vyzařují velice málo světla. Hvězda je tvořena zejména elektronově degenerovaným plynem. Nejznámějším bílým trpaslíkem je Sirius B.

Speciálním případem jsou proměnné hvězdy typu ZZ Ceti. Jedná se o neradiálně pulzujícího bílého trpaslíka s periodou 30 s až 25 min a světelnými změnami 0,001 až 0,2 mag.

1.4.12 Horizontální větev obrů populace II

Mezi nejstarší objekty ve vesmíru patří hvězdy populace II. Efektivní teplota obrů populace II dosahuje až 10 000 K, jejich hmotnost je zhruba $0,5 M_{\odot}$ a jejich zářivý výkon je zhruba $80 L_{\odot}$. V jádrech těchto hvězd se spaluje hélium na těžší prvky a ve slupce okolo jádra se spaluje vodík na helium.

Proměnné typu RR Lyrae, známé jako krátkoperiodické cefeidy nalezneme na HR diagramu tam, kde pulsační pás nestability protíná horizontální větev obrů. Tyto hvězdy mají periodu světelných změn od 0,2 do 1,2 dne a amplitudu 0,2 až 2 mag. Jedná se o radiálně pulsující cefeidy spektrálního typu A až F. Hvězdy tohoto typu mají všechny střední absolutní hvězdnou velikost zhruba $M_V = 0,7$ mag.

Kapitola 2

Formy mezihvězdné látky

V následující kapitole jsem čerpala ze zdrojů: [1], [2], [3], [4] a [5].

2.1 Mezihvězdný prach

Prachová zrnka v mezihvězdné látce mají pevné skupenství, jsou velikosti setiny až desetin mikronu. Z chemického hlediska se prach skládá z prvků těžších než je helium, především z uhlíku, krystalků křemičitanů, silikátů, grafitu, polycyklických aromatických uhlovodíků a někdy vodního ledu. V mezihvězdné látce tvoří prach pouze 1% hmotnosti, je však její důležitou součástí. Také díky němu se z mezihvězdné látky rodí nové hvězdy a vznikají jejich planetární systémy.

Částečky prachu se výrazně podílí na extinkci. Světlo z hvězd zeslabují absorpcí, přeměnou světelné energie na tepelnou, díky čemuž prach září také v infračervené a ultrafialové oblasti spektra a my jej můžeme pozorovat. Hvězdný svit prachová zrnka zeslabují také rozptylem do různých směrů.

Důležitou skutečností je, že světlo z hvězd je částečně polarizované v důsledku průchodu oblakem prachu. To nám dává informaci o protáhlém tvaru prachových zrn a také o jejich podobné orientaci. Podobnou orientaci vysvětlujeme působením magnetického pole Galaxie. Magnetická indukce tohoto pole je o velikosti řádově 10^{-10} T. Delší osa prachových zrn svírá pravý úhel se siločarami tohoto magnetického pole, což znamená, že rovina polarizace je s galaktickou rovinou rovnoběžná.

Částečky mezihvězdného prachu vznikají například při výbuchu supernov, v atmosférách chladných obřích hvězd spektrálního typu M, nebo uhlíkových hvězd spektrálního typu C. Odtud jsou zářivou silou hvězdy přemístovány do prostoru. V hustých oblastech mezihvězdného prostoru připadá průměrně 1 prachová částečka na $10 - 100 \text{ m}^3$, v řídkých oblastech připadá průměrně 1 prachová částečka na 10^7 m^3 .

2.1.1 Oblaka prachu

Prachové částice nejsou ve vesmíru rozptýleny stejnou měrou, uskupují se do shluků nazývaných prachová oblaka. Tyto shluky mezihvězdné látky s velkým zastoupením prachu se v Galaxii objevují především v galaktické rovině, kde nalezneme i Slunce. Právě kvůli poloze Slunce a extinkci nám blízkých oblaků

nemůžeme pozorovat oblaka vzdálenější. Avšak díky pozorování oblaků mezihvězdného prachu v jiných spirálních galaxiích víme, že existují převážně v blízkosti spirálních ramen. Rozměry oblaků prachu jsou od průměru zlomku světelného roku až po průměr 200 světelných let. Mívají hmotnosti stovek Sluncí. Nejmenší oblaka jsou nejvyšší hustoty.

Projevy těchto shluků vidíme převážně v tlumení světla vzdálených hvězd. Zajímavé jsou temné neboli absorpční mlhoviny. Velmi výrazně zeslabující světlo hvězd. Příkladem je mlhovina Koňská hlava v Orionu. Nalezneme však i reflexní mlhoviny. Jsou to oblaka prachu, která sama září díky rozptylu světla blízkých jasných hvězd, můžeme je vidět ve viditelném oboru spektra.



Obrázek 2.1: Temná mlhovina Koňská hlava v Orionu.
Zdroj [e1].

2.2 Mezihvězdný plyn

Plynná složka mezihvězdné látky je velice podobného chemického složení jako atmosféry hvězd. Tedy na 1 000 atomů vodíku náleží 80 atomů helia a jeden atom těžšího prvku. Vodík tvoří 70 % hmotnosti plynné složky. V mezihvězdné látce se s ním setkáváme v ionizovaném stavu v oblastech H II, s neutrálním vodíkem v základním stavu v oblastech H I a také s molekulárním vodíkem v molekulových mračnecích. Helium zde nalezneme pouze v atomární formě.

2.2.1 Oblasti H I

Oblasti H I jsou chladnějšími mezihvězdnými oblaky tvořenými neutrálním vodíkem, tedy atomy vodíku v základním stavu. Tyto oblasti mají typicky teplotu 80 K. Je opticky zcela neaktivní, protože se zde nenachází žádný zdroj záření, který by mohl vodík excitovat. Tato oblast tedy významně nezáří ani nepohlcuje záření. Avšak v důsledku hyperjemného rozštěpení základní hladiny neutrální vodík září v radiové oblasti spektra na vlnové délce 21 cm a my jej můžeme detekovat za pomoci radioteleskopů. Radiové záření neutrálního vodíku může projít celou Galaxií. Z tohoto záření získáváme informace o spirální struktuře naší Galaxie, protože oblasti H I se hojně vyskytují v oblasti spirálních ramen.

2.2.2 Oblasti H II

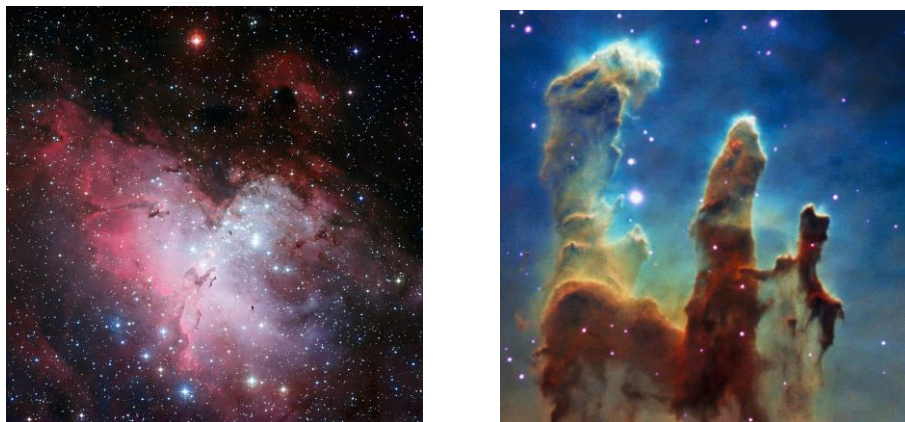
Svítící oblaka tvořena především ionizovaným vodíkem nazýváme oblasti H II. Jejich charakteristická teplota je 8 000 K, jsou jedněmi z nejzářivějších objektů ve vesmíru. Mlhovina je ohřívána žhavou hvězdou uvnitř (spektrální typ O, B), která září v ultrafialové oblasti spektra ($\lambda \leq 920 \text{ \AA}$). Tyto fotony ionizují atom vodíku. Ionizované atomy znovu rekombinují s volnými elektrony, během čehož jsou vyzářeny i fotony viditelného záření. Koncentrace částic ionizované části oblasti H II je 10 až 10^2 cm^{-3} . V oblastech H II se mimo vodíku nachází i helium, uhlík, dusík a kyslík a další prvky. Nejznámější emisní mlhovinou je M42 v Orionu.



Obrázek 2.2: Emisní mlhovina M42 v Orionu. Zdroj [e2].

2.2.3 Molekulová oblaka

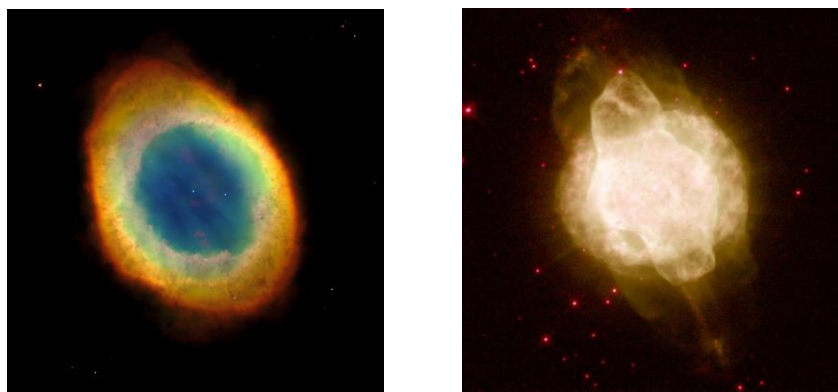
Molekulová oblaka jsou relativně husté a chladné oblasti, které tvoří molekulární vodík, neutrální vodík, helium a dalšími prvky. Důležitou součástí molekulových oblak jsou zrna mezihvězdného prachu udržující nízkou teplotu uvnitř oblaku. V obřích molekulových mračnecích (GMC) se nachází více než polovina mezihvězdné látky v Galaxii. Vnitřní teplota těchto mračen je 20 K a koncentrace částic je zde $2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$. Jedná se o největší souvislé, gravitačně vázané objekty ve vesmíru. Jsou složitě strukturované. Uvnitř mračen se nachází jádra - horké zhustky látky GMC, která svým pohybem zajišťují vnitřní stabilitu mračen. Teplota těchto jader je 100 až 200 K. V chladnějších místech GMC se rodí nové hvězdy. Známa je Orlí mlhovina M16.



Obrázek 2.3 a 2.4: Vlevo Orlí mlhovina M16, vpravo část mlhoviny M16.
Zdroj [e2].

2.2.4 Planetární mlhoviny

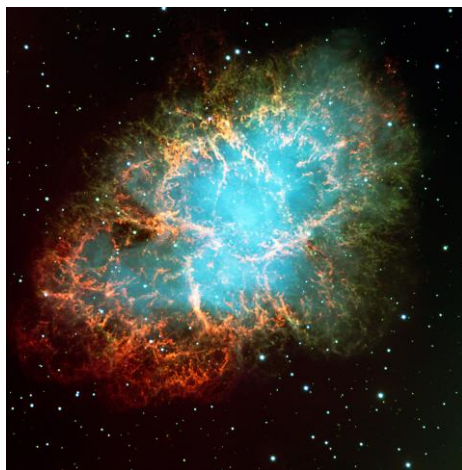
Planetární mlhoviny jsou obálky plynu, které odvrhla hvězda zhruba sluneční hmotnosti ve svém závěrečném vývojovém stadiu. Planetární mlhovina je buzena k záření centrální, velmi horkou hvězdou s teplotou 10^4 až 10^5 K, která je elektronově degenerovaná a stává se bílým trpaslíkem. Tato hvězda převážně září v ultrafialové oblasti spektra. Ultrafialové záření je transformováno na viditelné záření mlhoviny podobně jako v oblasti H II. Typická koncentrace částic planetární mlhoviny je 10^2 až 10^4 cm^{-3} . Mívají souměrné sférické nebo eliptické tvary převážně s prstencovou strukturou, existují desítky tisíc let. Rozpínají se rychlostí zhruba 20 km s^{-1} . Příkladem planetární mlhoviny je M 57 v souhvězdí Lyry nebo NGC 3918 v souhvězdí Andromedy.



Obrázek 2.5 a 2.6: Vlevo prstencová mlhovina M57 v Lyře, vpravo NGC 3918 v souhvězdí Andromedy. Zdroj [e1].

2.2.5 Zbytky po supernovách

Při výbuších supernov je do prostoru velkou rychlostí vymrštěno množství materiálu. Takto vzniklá mlhovina září zejména díky synchrotronovému záření volných elektronů. Centrální hvězda dále existuje jako neutronová hvězda nebo černá díra a odtržený plyn se rozpíná rychlostí několik tisíc km s^{-1} . Zahřátý plyn pak pomalu chladne a stává se znovu běžnou součástí mezihvězdné látky. Příkladem je Krabí mlhovina M1 v souhvězdí Býka.



Obrázek 2.7: Krabí mlhovina M1 v souhvězdí Býka. Zdroj [e2].

2.2.6 Koronální plyn

Vlastnosti koronárního plynu jsou podobné vlastnostem látky v horkých korónách hvězd. Jedná se o velice řídký, horký plyn s teplotou 10^5 až 10^6 K a koncentrací částic 10^3 m^{-3} . Tento ionizovaný plyn se projevuje především v krátkovlnné oblasti spektra a je silně ovlivňován magnetickým polem Galaxie. Je pozůstatkem po výbuších supernov.

2.2.7 Mezigalaktická látka

Látka v mezigalaktickém prostoru není rozmístěna rovnoměrně, nýbrž do mezigalaktických oblaků. Ve spektrech vzdálených kvazarů můžeme identifikovat absorpční spektrální čáry He II ($\lambda_0 = 340 \text{ \AA}$), díky čemuž víme, že se v prostoru mezi galaxiemi vyskytuje ionizované helium. Analýzou spektra těchto kvazarů jsme zjistili, že v mezigalaktickém prostředí se vyskytuje také ionizovaný vodík a malé množství těžších prvků. Průměrná hustota v mezigalaktických oblacích je 1 atom/m^3 . Jak dosvědčuje pozorování družicové observatoře ROSAT v rentgenové oblasti spektra, tyto oblaky jsou velice horké, až s několika miliony K.

Kapitola 3

Studium mezihvězdné látky

V následující kapitole jsem čerpala ze zdrojů: [1], [2], [3], [4], [5] a [e3].

3.1 Družice FUSE

Astronomická družice FUSE, tedy Far Ultraviolet Spectroscopy Explorer odstartovala 24. června 1999 z mysu Canaveral za pomoci nosné rakety Delta II. Byla vynesena na oběžnou dráhu do výšky 775 km se sklonem 25°. Pro NASA ji postavila a provozovala Johns Hopkins University v Baltimoru v USA. Na vývoji a stavbě se ale podílely i další univerzity včetně University of California v Berkeley. Na provozu družice se také podílelo francouzské Národní středisko pro kosmický výzkum CNES (Centre National d'Études Spatiales).

Družice FUSE studovala vesmír v ultrafialové oblasti spektra (900 – 1 200 Å). Ultrafialové záření má vyšší energii než záření viditelné a ze Země tuto oblast v důsledku absorpce UV záření atmosférou pozorovat nemůžeme. Zkoumání vesmíru družicí FUSE mělo přinést informace o koncentraci deuteria, které se utvořilo v počátečním vývoji našeho vesmíru, a které zaniká v nitrech hvězd termonukleárními reakcemi. Dalším důležitým bodem mise družice bylo zkoumání chemického složení mezihvězdných a mezigalaktických oblaků plynu, okolí aktivních jader galaxií, kvasarů a pozůstatků po supernovách. Dále pak zkoumání atmosfér horkých hvězd a chemického složení planetárních atmosfér a komet.

Družice byla velice úspěšná. Díky ní jsme našli poblíž hvězdy eta Carinae druhou hvězdu. Také nám podle množství molekulárního vodíku ukázala, že z Marsu se vypařilo velké množství vody. Pozorovala také molekulární dusík za naší Sluneční soustavou.

„Tříose stabilizovaná družice tvaru dvou spojených čtyřbokých hranolů o celkové délce na dráze přibližně 7.6 m je vybavena 2 panely slunečních baterií dodávajícími 520 W elektrické energie. Na palubě je jediný vědecký přístroj:

- vysokorozlišující mřížkový spektrometr, který tvoří:
 - dalekohled typu Wolter-Schwartzchild II (vstupní apertura 0.8 m) se čtyřmi zrcadly (rozměry 390×350 mm, ohnisková délka 2.245 m);
 - mřížkový spektrometr Rowlandova typu (spektrální rozlišení =24 000 až 30 000, tj. 0.005 nm);
 - dva soubory detektorů PCA [=Photon Counting Array]:
 - 2 detektory za zrcadly potaženými SiC (rozsah 90.5-110.0 nm);

- 2 detektory za zrcadly potaženými LiF (rozsah 100.0-119.5 nm);
- pointační elektronická kamera FES [=Fine Error Sensor].

Stabilizační a orientační systém umožňuje zaměření dalekohledu s přesností $\pm 0.5''$. Využívá 4 silových setrvačnicků RW [=Reaction Wheel] a magnetů [=Magnetic Torquer Bar]. Telemetrický systém pracuje v pásmu S (2 GHz, výkon vysílače 5 W, rychlost přenosu vědeckých dat 40 Kbit/s, technických 2 Kbit/s). Pro spojení lze využívat i družice systému TDRSS [=Tracking and Data Relay Satellite System].“

Uvedená část je přesnou citací ze zdroje:

<http://www.kosmo.cz/modules.php?op=modload&name=kosmo&file=index&fil=/s/1999/035A.HTM> [e3]

3.2 Spektrum a spektrální čáry

Spektroskopie je v astronomii důležitým pracovním nástrojem. Analýzou záření hvězd můžeme určit jejich povrchové chemické složení, efektivní teplotu i tíhové zrychlení. Přímo ze spektra ovšem nemůžeme sledovat celkové složení hvězd, protože záření, které k nám přichází, vzniká pouze v atmosféře hvězdy.

Elektromagnetické záření je příčné postupné vlnění elektromagnetického pole. Spektrum je záření rozložené na jednotlivé vlnové délky, jdoucí od rádiového záření přes viditelné světlo až ke gama záření. Jako příklad části spektra známý každému člověku mohou uvést duhu. Částicí elektromagnetického vlnění je foton. Energii fotonu spočteme jako

$$E = hf, \tag{3.1}$$

kde f je frekvence a h je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s.

Záření hvězd je tedy elektromagnetické vlnění. Dává nám informace jak o hvězdě, tak o prostředí, kterým se šíří od zdroje k nám. Spektrum dělíme na spojité a čarové. Spojité spektrum obsahuje všechny vlnové délky. Intenzita jeho záření se vzhledem k vlnové délce mění plynule. Pokud se intenzita spektra v závislosti na vlnových délkách mění, získáváme čarové spektrum, které je množinou různě tlustých čar v oblasti s určitou vlnovou délkou. Pokud se změna intenzity projevuje poklesem vůči kontinuu (hladině odpovídající úrovni spojitého spektra), jedná se o absorpční spektrální čáry, pokud zvýšením, jedná se o emisní spektrální čáry.

Spektrum jednotlivých prvků v plynném stavu je složeno z čar. Vlnové délky a počet těchto čar jsou stejné za všech fyzikálních podmínek, zde se mění pouze výraznost čar. Typicky platí, že spektrální čáry plynu, který se nachází mezi námi a zdrojem spojitého záření, pozorujeme jako absorpční, pokud je tento plyn

chladnější než zdroj záření, a jako emisní, pokud je tento plyn teplejší než zdroj záření.

Atomy, molekuly i ionty mohou absorbovat nebo emitovat záření. Také u každého prvku, molekuly i atomu nalezneme charakteristické skupiny spektrálních čar. Nejjednodušší spektrum má vodík. Absorpční čáry vznikají při přechodu mezi vázanými stavy atomu, kdy dochází k vyzáření nebo pohlcení fotonu.

Ve spektrech se nenachází ostré spektrální čáry odpovídající jednotlivým energetickým přechodům v atomu, ale čáry „rozmazané“. Toto „rozmazání“ nazveme profilem spektrální čáry. Spektrální čáru dělíme na centrální část nazvanou jádro čáry a na křídla čáry. Abychom spektrální čáru matematicky správně popsali, představíme si atom jako tlumený harmonický oscilátor. Touto myšlenkou dojdeme k Lorentzovu profilu, jenž vyjádříme vztahem

$$I(f) \propto \frac{1}{(f - f_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{4\pi}\right)^2}, \quad (3.2)$$

kde I je intenzita záření, γ je šířka profilu spektrální čáry a f_0 je frekvence středu čáry. Přesný popis spektrální absorpční čáry získáme Lorentzovým a Gaussovým profilem.

3.3 Interakce záření a hmoty

Elektromagnetické záření sestává z proudu elementárních částic zvaných fotony. Mezi hmotou a zářením ve vesmíru dochází k interakci a výměně energie. Při této interakci platí zákon zachování energie a hybnosti a také skutečnost, že energetické hladiny atomu jsou kvantovány. Pokud interaguje záření s atomem, dochází k přechodu mezi kvantovými stavy atomu. Tyto přechody dělíme na vázaně-vázané, vázaně-volné, volně-vázané a volně-volné.

Vázaně-vázané přechody probíhají v nitru atomu. Atom se excituje na vyšší energetickou hladinu nebo deexcituje na nižší. Excitace nebo deexcitace souvisí s absorpcí nebo emisí fotonu o energii odpovídající energiovému rozdílu jednotlivých hladin energie u přechodu, který se udál. Excitace také nastane, pokud dojde k nepružné srážce atomu s jinou částicí a deexcitace nastane, pokud se odehraje superepružná srážka atomu s jinou částicí.

U vázaně-volného přechodu se z vázaného elektronu stane volný a atom opustí, to znamená, že dochází k ionizaci. K přechodu dochází, pokud nastane nepružná srážka atomu s jinou částicí, nebo pohlcení fotonu s energií stejnou nebo vyšší, jako je daná ionizační energie.

K volně-vázanému přechodu dochází, pokud je elektron při srážce s iontem polapen v atomu ve vázaném stavu. Tento děj je nazvaný rekombinace. Zářivá rekombinace nastane, přiskočí-li do elektronového obalu atomu volný elektron a stane se vázaným. Součet ionizační a kinetické energie takového elektronu je následně vyzářen fotonem. Možná je také tříčásticová rekombinace, kdy se srazí iont, elektron a jiná částice, která si částečně vezme energii elektronu.

Volně-volný přechod nastane, pokud elektron emituje nebo absorbuje foton a sníží nebo zvýší tak svoji energii při průletu v blízkosti iontu. Kinetická energie elektronu je stále taková, aby elektron nebyl atomem zachycen. V mezihvězdné látce se odehrávají také přechody mezi rotačními a vibračními stavy molekul.

3.4 Mezihvězdná extinkce

Extinkcí nazýváme zeslabení elektromagnetického záření, které prochází mezihvězdnou látkou. Toto zeslabení způsobuje absorpce elektromagnetického záření v mezihvězdné látce a rozptyl elektromagnetického záření na částicích mezihvězdné látky. Budeme předpokládat, že v mezihvězdném prostředí, jímž prochází záření, se nachází rovnoměrně rozmístěné částice o koncentraci n , a o účinném průřezu σ .

Toto záření má počáteční hustotou zářivého toku I_0 a pozorovanou hustotu zářivého toku I . Jakmile elektromagnetické záření v tomto prostředí projde malou dráhou ds , část tohoto záření bude pohlcena a opět vyzářena nebo rozptýlena do jiného směru. Část toku záření dI , o kterou bude tok záření I menší, vyjádříme součinem

$$dI = -I(n\sigma ds). \quad (3.3)$$

kde $I(n\sigma ds)$ je část záření, která je v prostředí pohlcena nebo rozptýlena. Provedeme malou úpravu vztahu, abychom vyjádřili přírůstek optické tloušťky prostředí $d\tau$.

$$\frac{dI}{I} = -(n\sigma ds) = -d\tau. \quad (3.4)$$

Tímto jsme provedli separaci proměnných diferenciální rovnice, dále rovnici zintegrujeme

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\int_0^h n\sigma ds, \quad (3.5)$$

kde h je délka sloupce. Dále počítáme

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^h n\sigma ds\right) = I_0 \exp(-\tau). \quad (3.6)$$

V této rovnici je τ optická tloušťka. Pokud je $\tau < 1$ považujeme vrstvu za opticky tenkou, pokud je $\tau > 1$ považujeme vrstvu za opticky tlustou. V případě, že je účinný průřez částic σ v pozorované vrstvě neměnný, můžeme σ vytknout před integrál jako konstantu.

$$\tau = \sigma \int_0^h n ds = \sigma N_d, \quad (3.7)$$

kde N_d je celkový počet částic v pozorovaném směru obsažených ve sloupci se základnou 1m^2 a výškou h . Za předpokladu, že je rozložení těchto částic v pozorovaném směru rovnoměrné, vytkneme jako konstantu i koncentraci částic n , a zapíšeme pomocí vztahu

$$\tau = \sigma n \int_0^h ds = \sigma n h. \quad (3.8)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že pokud uvažujeme homogenní prostředí, jsou optická délka a délka sloupce (vzdálenost) přímo úměrné.

Mezihvězdná extinkce, hvězdná velikost a vzdálenost hvězdy jsou provázány tímto vztahem

$$m - M = 5 \log r - 5 + A, \quad (3.9)$$

kde m je pozorovaná hvězdná velikost, M je absolutní hvězdná velikost, r je vzdálenost hvězdy a A je přírůstek hvězdné velikosti. Abychom matematicky správně popsali přírůstek hvězdné velikosti A v závislosti na optické tloušťce τ , zapíšeme vztah

$$A = -2,5 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = 2,5 \log (e^\tau) = (2,5 \log e) \tau = 1,086 \tau. \quad (3.10)$$

V tomto vztahu vidíme, že při aproximaci můžeme uvažovat A rovno τ , nebo minimálně že tyto veličiny jsou přímo úměrné.

Díky praktickým zkušenostem z pozorování víme, že přírůstek hvězdné velikosti A je závislý na vlnové délce pozorovaného elektromagnetického záření. Tato informace z mikroskopického hlediska ukazuje, že účinný průřez částic σ je jiný než jejich geometrický průřez S , který nezávisí na vlnové délce. Vztah pro účinný průřez částic σ zapíšeme ve tvaru:

$$\sigma(\lambda) = f(\lambda) S, \quad (3.11)$$

kde $f(\lambda)$ je funkce závisící na mechanismu extinkce.

Mezi tyto mechanismy patří:

Thomsonův rozptyl

Jsou-li částice mezihvězdné látky o mnoho menší než vlnová délka, dochází k Thomsonově rozptylu, $f(\lambda)$ zde konstanta.

Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl je na vázaných stavech atomů a molekul. Tento rozptyl zapíšeme ve vztahu $f(\lambda) \sim \lambda^{-4}$.

Mieův rozptyl

Mieův rozptyl nastává, pokud mají mezihvězdné částice 100 nm – 1 μ m. Ve viditelném oboru spektra, vztah zapíšeme $f(\lambda) \sim \lambda^{-1}$.

Kapitola 4

Zpracování dat

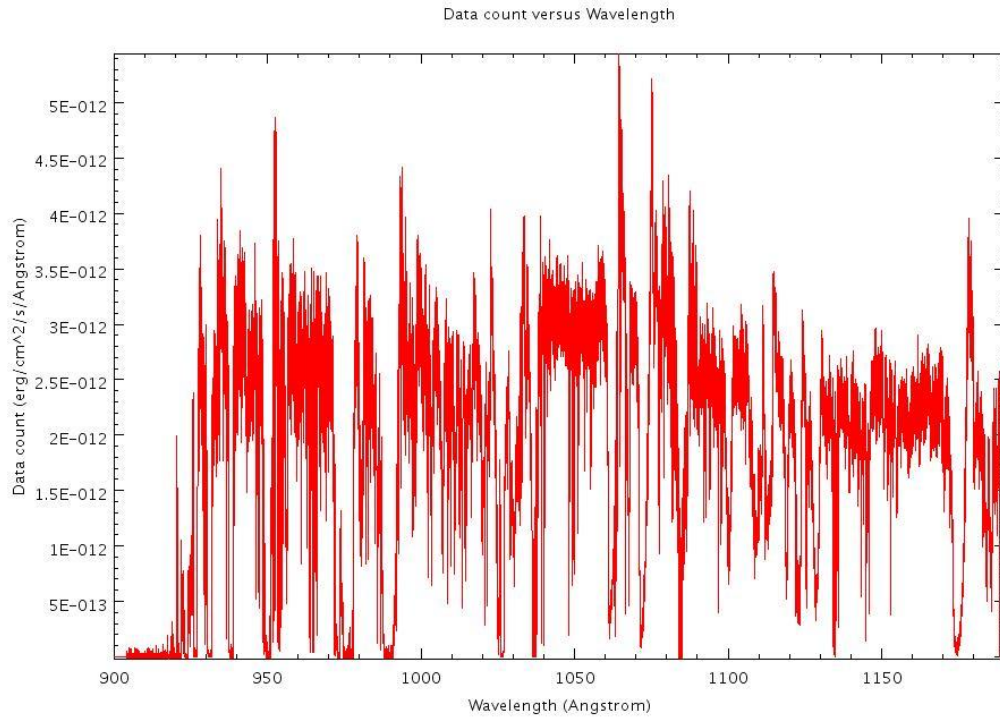
4.1 Vybrané hvězdy pozorované družicí FUSE

K analýze spektra jsem si vybrala hvězdy SK -66 169, SK -67 167 a SK -67 111, které pozorovala družice FUSE. Všechny tři hvězdy leží ve Velkém Magellanově oblaku. Velký Magellanův oblak je velmi jasná galaxie viditelná pouhým okem z jižní polokoule Země. Nachází se v souhvězdí Mečouna. Všechny tři hvězdy jsou spektrálního typu O (podle Harvardské klasifikace), jedná se tedy o horké hvězdy. Hvězdy spektrálního typu O mají obecně efektivní teplotu 30 000 – 50 000 K. Spektra těchto hvězd jsem získala pomocí programu SPLAT-VO, přesněji ze zdroje [e5].

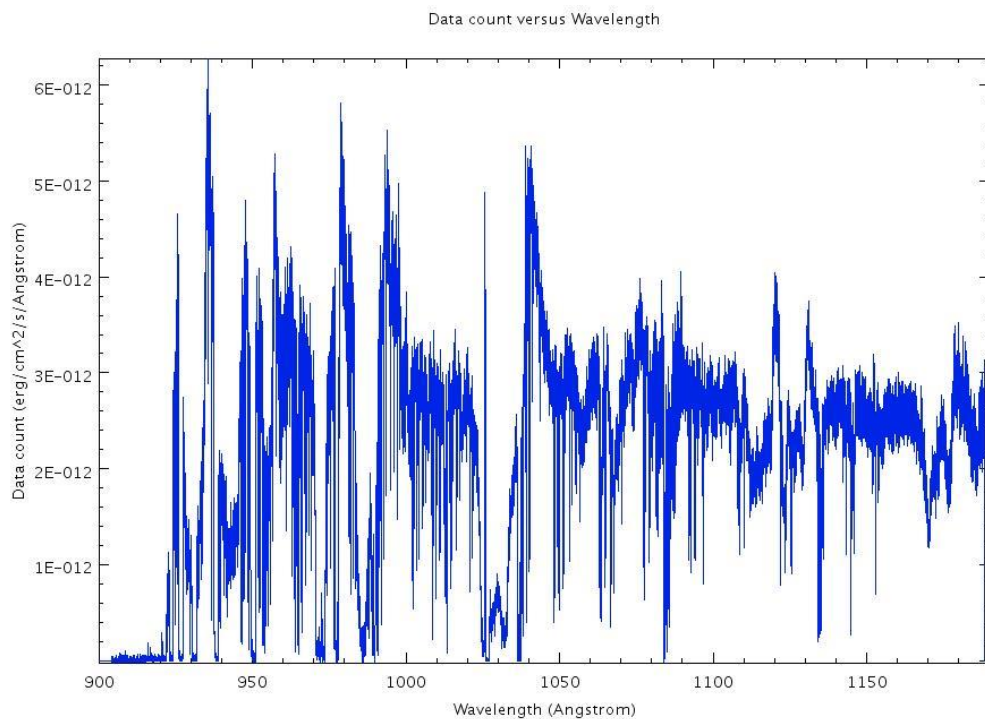
Hvězda	SK -66 169	SK -67 167	SK -67 111
ST	O9.7Ia+	O4If+n	O6Iaf(n)pv
RA	05 ^h 36 ^m 54,645 ^s	05 ^h 31 ^m 51,92 ^s	05 ^h 26 ^m 48,085 ^s
DE	-66° 38' 22,40''	-67° 39' 41,40''	-67° 29' 29,56''
M(B)	12,46 mag	12,36 mag	12,33 mag
M(V)	12,56 mag	12,59 mag	12,42 mag

Tabulka 4.1: Informace o vybraných hvězdách. Převzato ze zdroje [e6].

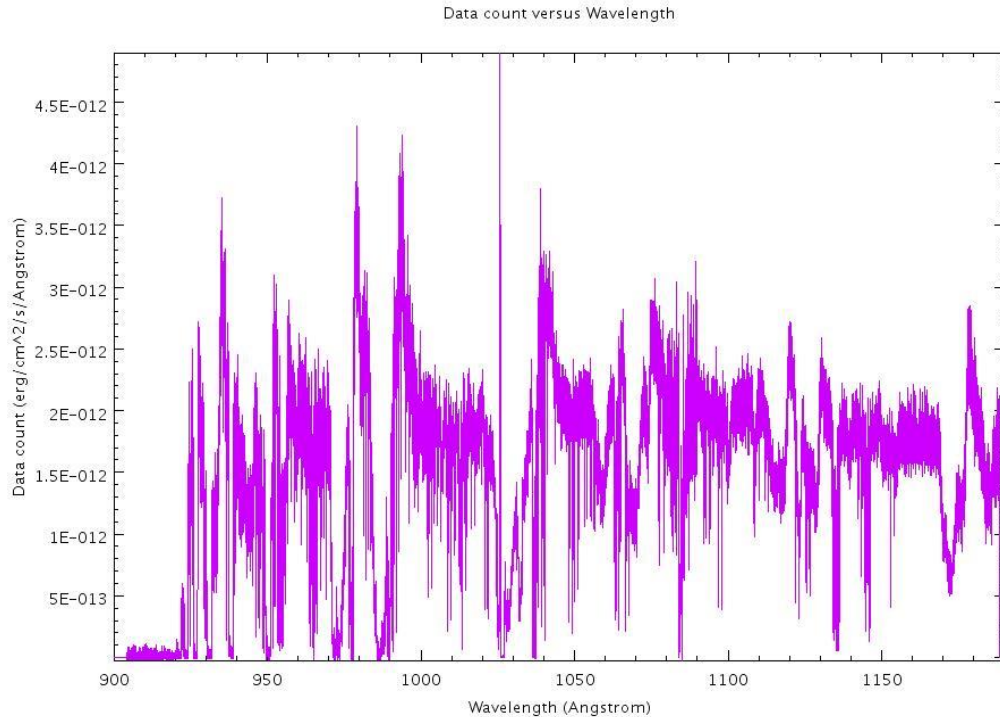
V této tabulce je ST spektrální typ hvězdy, RA je rektascenze, DE je deklinace, M(B) je hvězdná velikost ve filtru B a M(V) je hvězdná velikost ve filtru V.



Obrázek 4.1: Spektrum hvězdy SK -66 169 zobrazené pomocí programu SPLAT-VO.



Obrázek 4.2: Spektrum hvězdy SK -67 167 zobrazené pomocí programu SPLAT-VO.



Obrázek 4.3: Spektrum hvězdy SK -67 111 zobrazené pomocí programu SPLAT-VO.

4.2 Identifikace spektrálních čar

V praktické části své bakalářské práce zkoumám spektra tří hvězd ve Velkém Magellanově oblaku. Ve spektrech těchto hvězd jsem identifikovala absorpční čáry mezihvězdné látky, které se od čar vzniklých v atmosféře hvězd liší svojí hloubkou a profilem. Čáry mezihvězdné látky ve spektru vznikají v prostoru mezi hvězdou a pozorovatelem, v tomto případě družicí FUSE. Mnou hledané čáry vznikají tak, že elektromagnetické záření z hvězdy prochází oblaky mezihvězdné látky, ve kterých se částečně absorbuje. Abych byla schopna identifikovat nalezené spektrální čáry mezihvězdné látky, našla jsem seznam laboratorních vlnových délek jednotlivých prvků na adrese [e7], za pomoci NIST (Národní institut standardů a technologie-National Institute of Standards and Technology), na adrese [e4] a ve zdroji [7]. Srovnáním vlnových délek nalezených absorpčních čar s těmito laboratorními vlnovými délkami jsem schopna částečně určit chemické složení mezihvězdného prostředí v pozorované oblasti. Do své práce jsem nezahrnula všechny nalezené spektrální čáry, protože v některých případech bylo velmi těžké určit, kterému prvku spektrální čára náleží.

Ve spektrech zvolených hvězd jsem identifikovala absorpční čáry mezihvězdné látky v tabulce níže.

SK -66 169			SK -67 167			SK -67 111		
Iont	λ [Å]	λ_0 [Å]	Iont	λ [Å]	λ_0 [Å]	Iont	λ [Å]	λ_0 [Å]
Fe II	1144,939	1144,926	Fe II	1144,934	1144,926	Fe II	1144,948	1144,926
Fe II	1145,884	1144,926	Fe II	1145,917	1144,926	Fe II	1146,070	1144,926
Fe II	1125,449	1125,442	Fe II	1125,449	1125,442	Fe II	1125,460	1125,442
Fe II	1143,232	1143,220	Fe II	1143,225	1143,220	Fe II	1143,245	1143,220
Fe II	1144,184	1143,220	P II	1152,824	1152,818	Fe II	1144,372	1143,220
P II	1152,823	1152,818	P II	1153,840	1152,818	Fe II	1121,988	1121,967
P II	1153,759	1152,818	Ar I	1048,278	1048,220	P II	1152,840	1152,818
Ar I	1048,252	1048,220	Ar I	1049,149	1048,220	P II	1153,956	1152,818
Ar I	1049,123	1048,220	Si II	1020,744	1020,700	Ar I	1048,278	1048,220
Si II	1020,718	1020,700	Si II	1021,667	1020,700	Ar I	1049,292	1048,220
Si II	1021,589	1020,700	C II	1036,450	1036,337	Si II	1020,731	1020,700
C II	1036,435	1036,337	C II	1037,250	1036,337	Si II	1021,745	1020,700
C II	1037,202	1036,337	O I	1039,321	1039,230	C II	1036,555	1036,337
O I	1039,256	1039,230	O I	1040,116	1039,230	C II	1037,317	1036,337
O I	1040,153	1039,230	H ₂	1050,033	1049,960	O I	1039,282	1039,230
H ₂	1050,007	1049,960	H ₂	1077,775	1077,690	O I	1040,127	1039,230
H ₂	1077,701	1077,690				H ₂	1050,020	1049,960
						H ₂	1077,778	1077,690

Tabulka 4.2: Nalezené absorpční čáry ve spektrech.

4.3 Fitování spektrálních čar

Pro další výpočet je nutné nalézt přesné středy vybraných čar mezihvězdné látky. Tyto středy mohou nalézt pomocí fitování. Fitování spektrálních absorpčních čar pro vybrané ionty provedu v programu Gnuplot. Žádná z vybraných čar není satureovaná, postačí je tedy fitovat upraveným Gaussovým profilem. Uvažuji přenos záření, dosadím do vztahu pro relativní tok záření a fituji za pomoci vztahu

$$I = I_0 \exp \left[-A \exp \left(-\frac{(x - m)^2}{2s^2} \right) \right], \quad (4.1)$$

viz zdroj [8]. V tomto vztahu je I funkce vlnové délky, I_0 je tok záření v kontinuu, A je amplituda, x je nezávislá proměnná (vlnová délka), m je střed absorpční čáry kde

$m = \lambda$ a s je směrodatná odchylka. Gnuplot mi poskytl potřebné parametry i s nejistotami. Vypočítám $\Delta\lambda$, abych následně mohla určit radiální rychlosti. Posun $\Delta\lambda$ získám vztahem

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, \quad (4.2)$$

kde λ je nalezená vlnová délka určité čáry iontu a λ_0 je jeho laboratorní vlnová délka. Nejistoty $\delta_{\Delta\lambda}$ [%] jsou počítány procentuálně pouze z nejistot δ_λ [Å] z důvodu, že λ_0 [Å] je laboratorní vlnová délka.

Fitování spektrálních absorpčních čar pro vybrané ionty:

Iont	λ [Å]	δ_λ [Å]	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [%]	A	δ_A	s [Å]	δ_s [Å]
Fe II	1144,939	0,002	1144,926	0,013	15,2	2,47	0,36	0,030	0,002
Fe II	1145,884	0,003	1144,926	0,958	0,3	1,51	0,09	0,047	0,004
Fe II	1125,449	0,002	1125,442	0,007	38,3	1,34	0,15	0,031	0,003
Fe II	1143,232	0,003	1143,220	0,012	22,9	1,12	0,11	0,035	0,003
Fe II	1144,184	0,002	1143,220	0,964	0,2	0,48	0,05	0,016	0,002
P II	1152,823	0,002	1152,818	0,005	38,9	1,45	0,15	0,030	0,002
P II	1153,759	0,004	1152,818	0,941	0,4	0,42	0,04	0,048	0,007

Tabulka 4.3: Parametry a jejich nejistoty, získané z fitování spektrálních absorpčních čar ve spektru hvězdy SK -66 169.

Iont	λ [Å]	δ_λ [Å]	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [%]	A	δ_A	s [Å]	δ_s [Å]
Fe II	1144,934	0,004	1144,926	0,008	47,0	1,61	0,22	0,043	0,004
Fe II	1145,917	0,006	1144,926	0,991	0,6	0,54	0,03	0,135	0,010
Fe II	1125,449	0,002	1125,442	0,007	28,0	0,89	0,06	0,034	0,002
Fe II	1143,225	0,001	1143,220	0,005	28,0	0,86	0,04	0,033	0,002
P II	1152,824	0,002	1152,818	0,006	27,9	1,09	0,08	0,029	0,002
P II	1153,840	0,008	1152,818	1,022	0,8	0,23	0,03	0,054	0,009

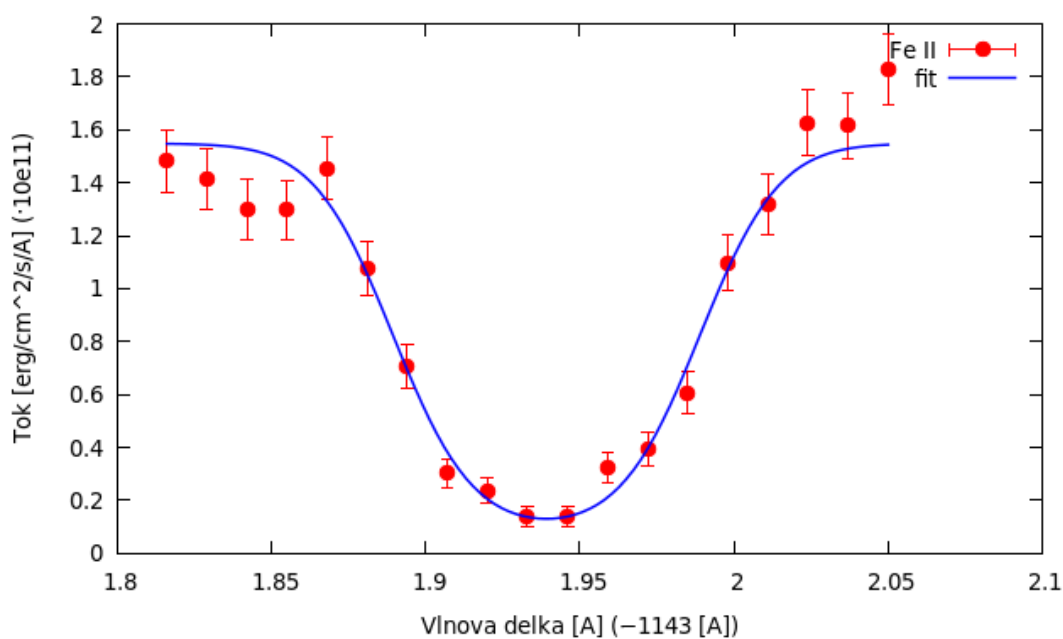
Tabulka 4.4: Parametry a jejich nejistoty, získané z fitování spektrálních absorpčních čar ve spektru hvězdy SK -67 167.

Iont	λ [Å]	δ_λ [Å]	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [%]	A	δ_A	s [Å]	δ_s [Å]
Fe II	1144,948	0,002	1144,926	0,022	10,4	1,80	0,17	0,041	0,002
Fe II	1146,070	0,002	1144,926	1,144	0,2	2,26	0,22	0,045	0,002
Fe II	1125,460	0,002	1125,442	0,018	13,7	1,10	0,12	0,029	0,002
Fe II	1143,245	0,003	1143,220	0,025	12,0	0,86	0,08	0,036	0,003
Fe II	1144,372	0,003	1143,220	1,152	0,2	1,06	0,10	0,037	0,003
Fe II	1121,988	0,002	1121,967	0,021	8,2	1,24	0,09	0,033	0,002
P II	1152,840	0,002	1152,818	0,022	8,6	1,21	0,09	0,036	0,002
P II	1153,956	0,006	1152,818	1,138	0,5	0,41	0,05	0,054	0,007

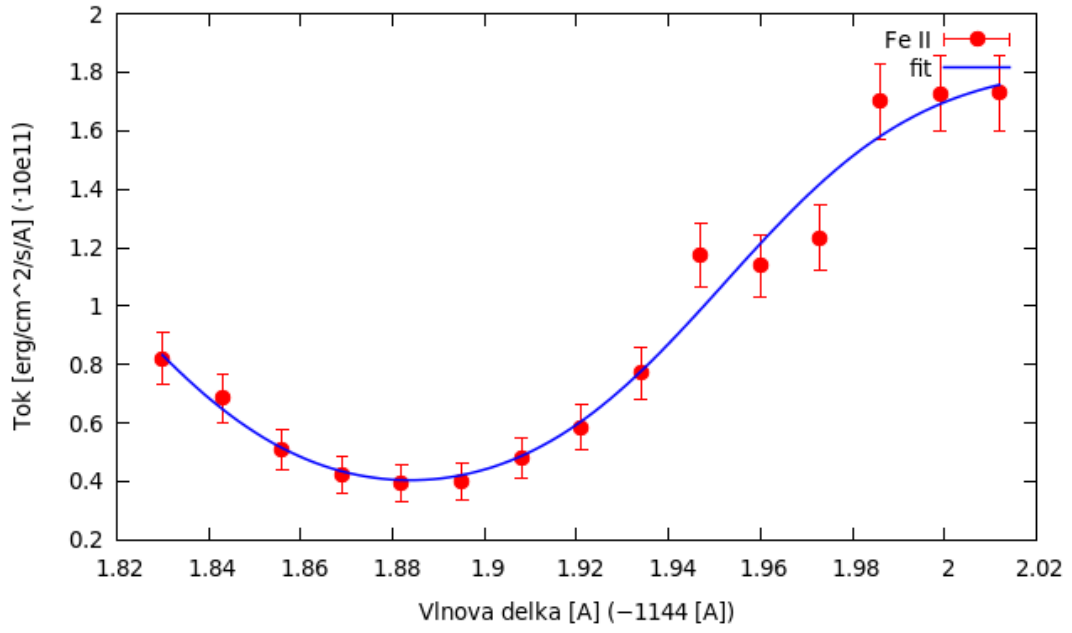
Tabulka 4.5: Parametry a jejich nejistoty, získané z fitování spektrálních absorpčních čar ve spektru hvězdy SK -67 111.

Grafy spektrálních absorpčních čar pro vybrané ionty:

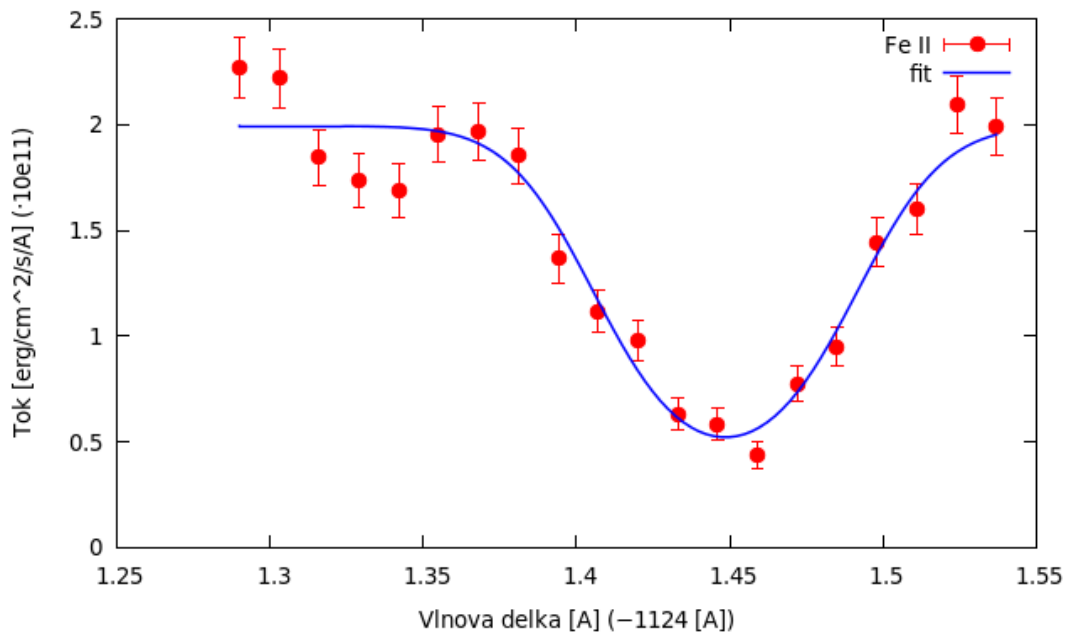
Hvězda SK -66 169



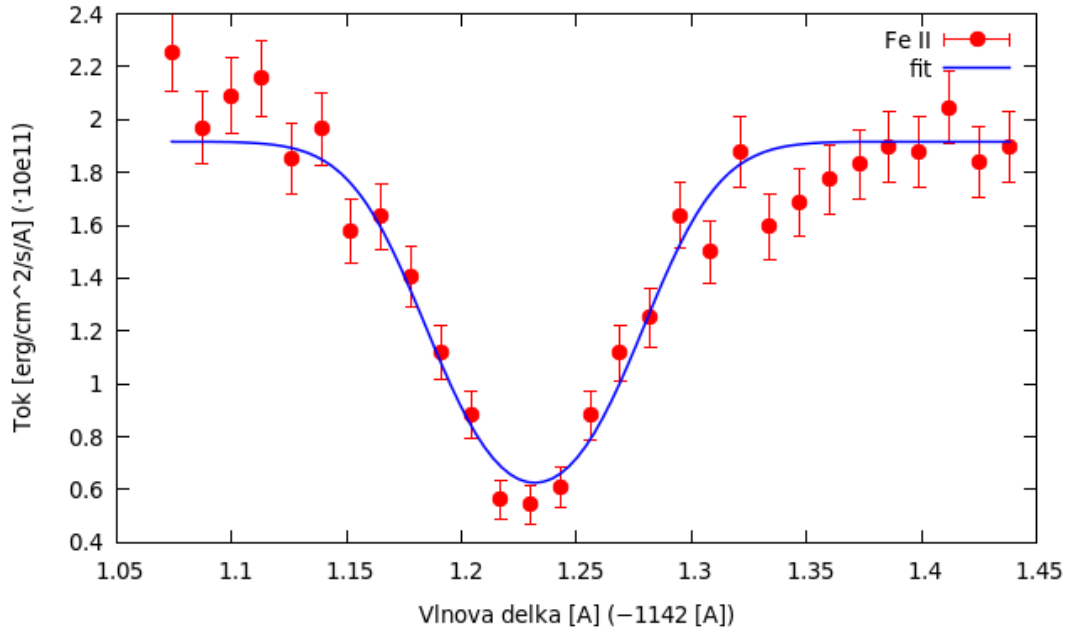
Obrázek 4.4: Fe II $\lambda = 1144,9392 \text{ Å}$



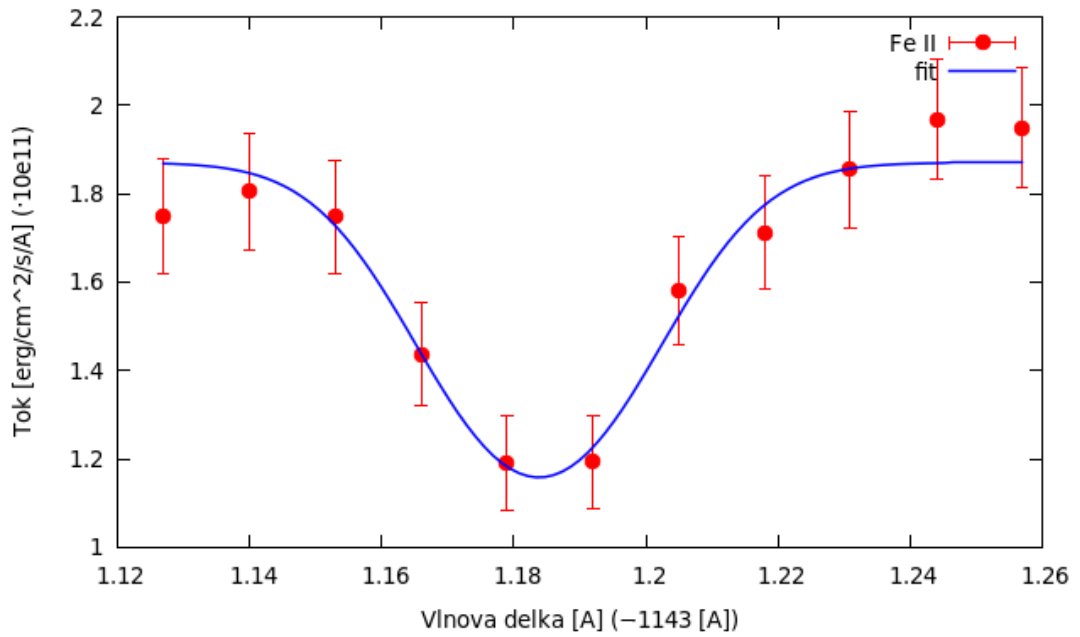
Obrázek 4.5: Fe II $\lambda=1145,8838 \text{ \AA}$



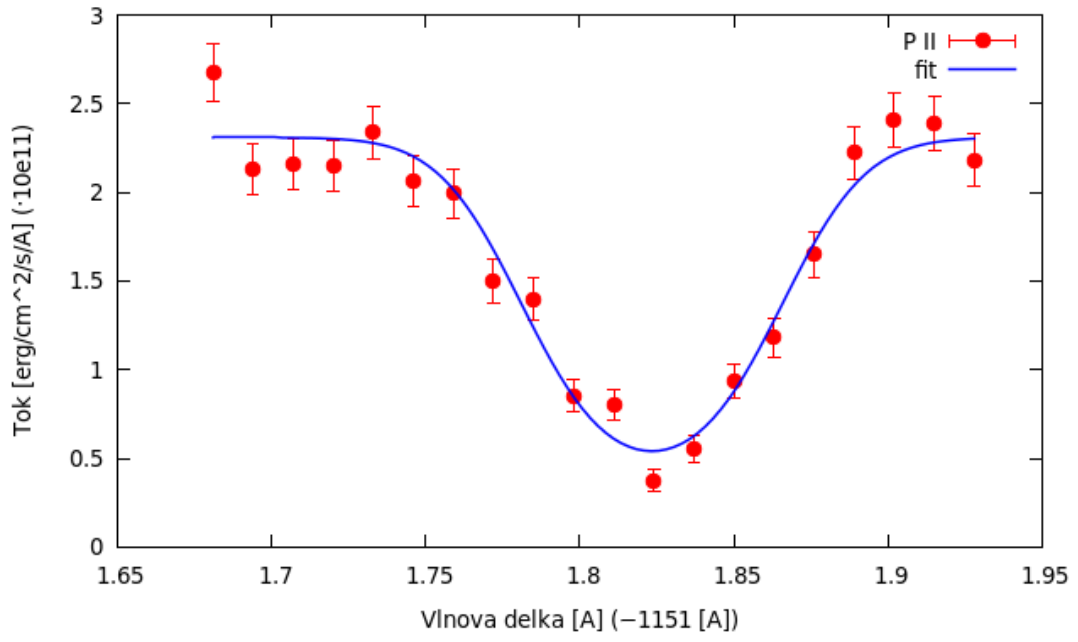
Obrázek 4.6: Fe II $\lambda=1125,4485 \text{ \AA}$



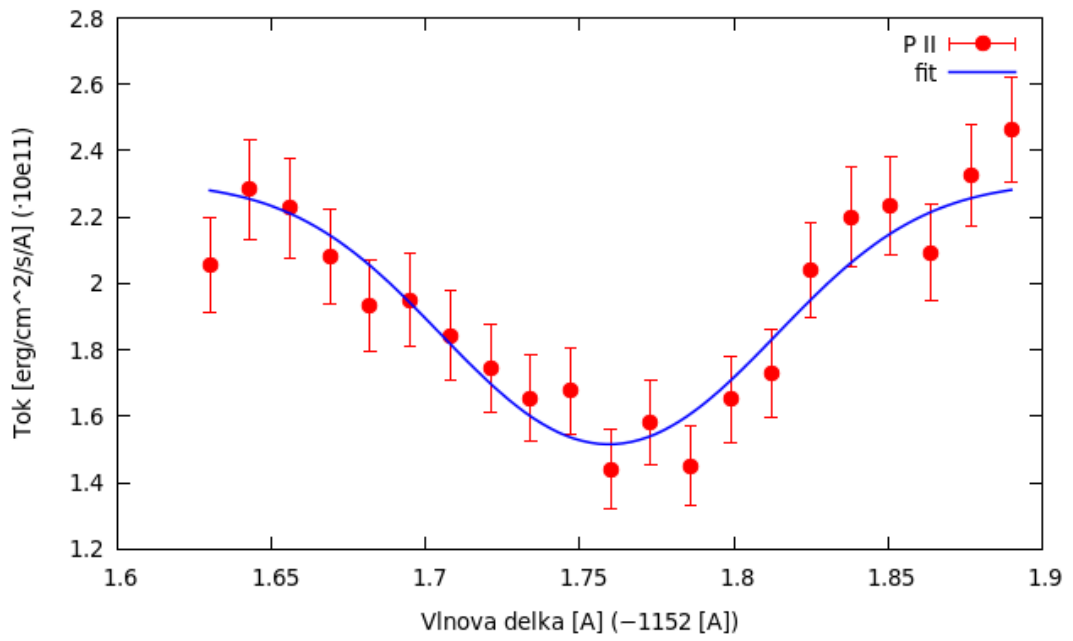
Obrázek 4.7: Fe II $\lambda = 1143,2318 \text{ \AA}$



Obrázek 4.8: Fe II $\lambda = 1144,1838 \text{ \AA}$

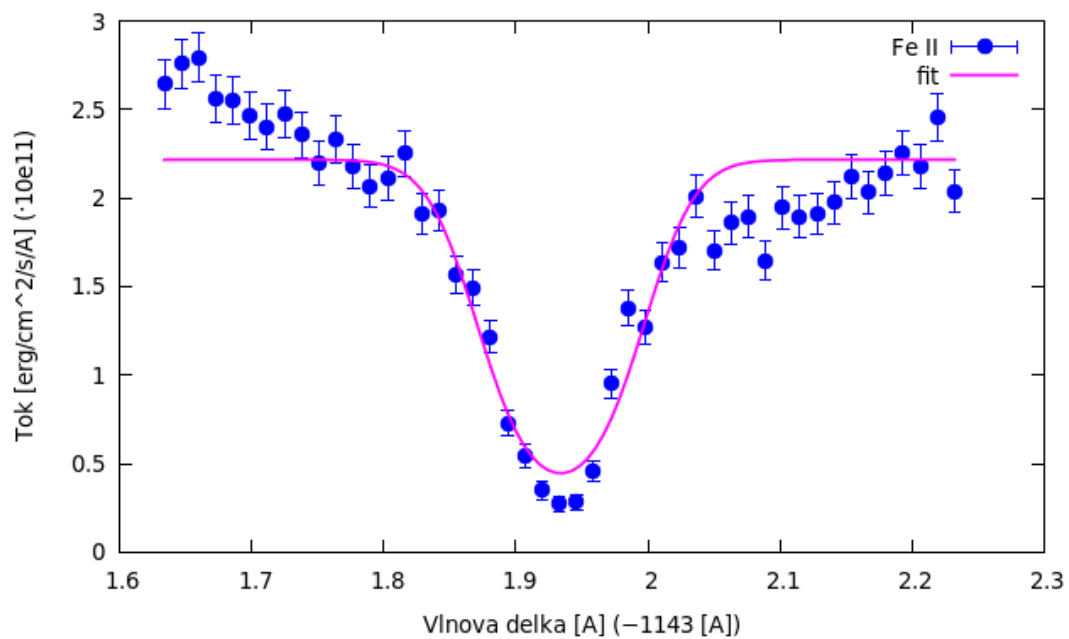


Obrázek 4.9: P II $\lambda = 1152,8234 \text{ \AA}$

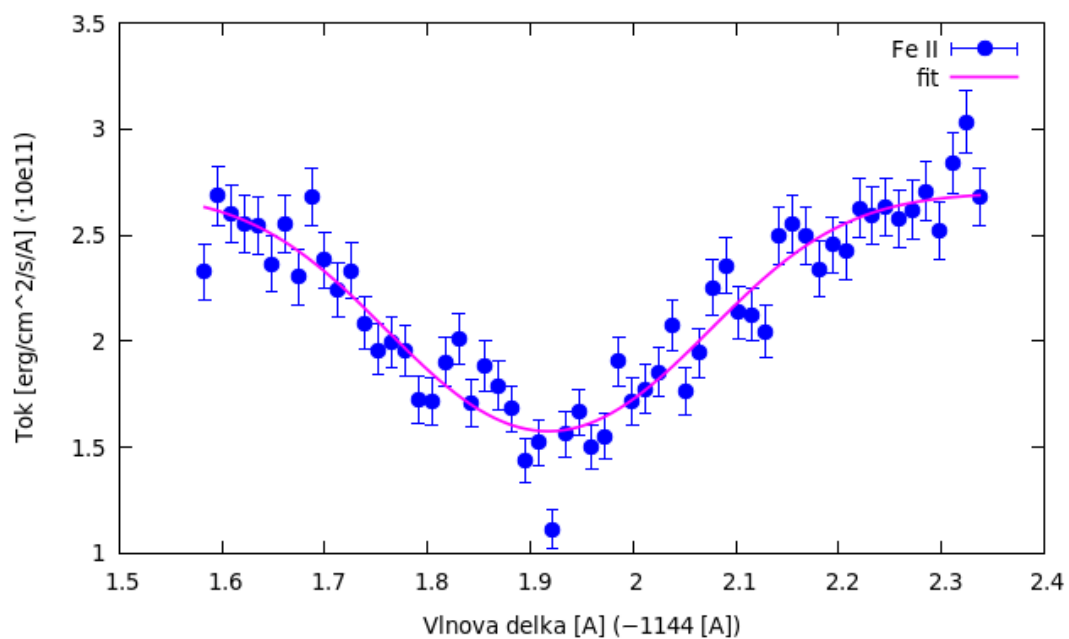


Obrázek 4.10: P II $\lambda = 1153,7594 \text{ \AA}$

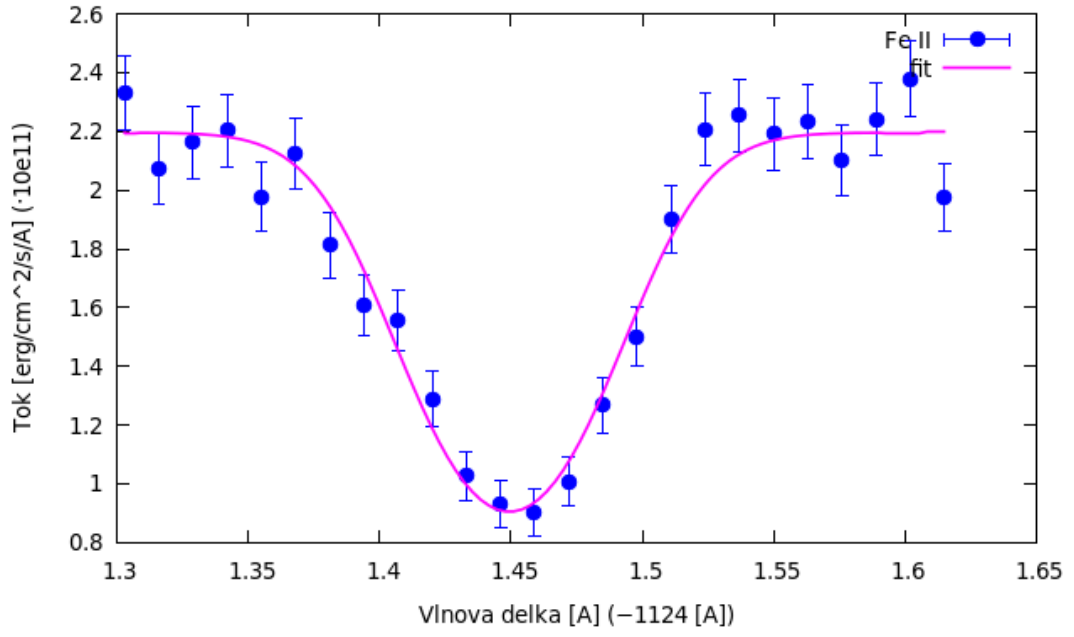
Hvězda SK -67 167



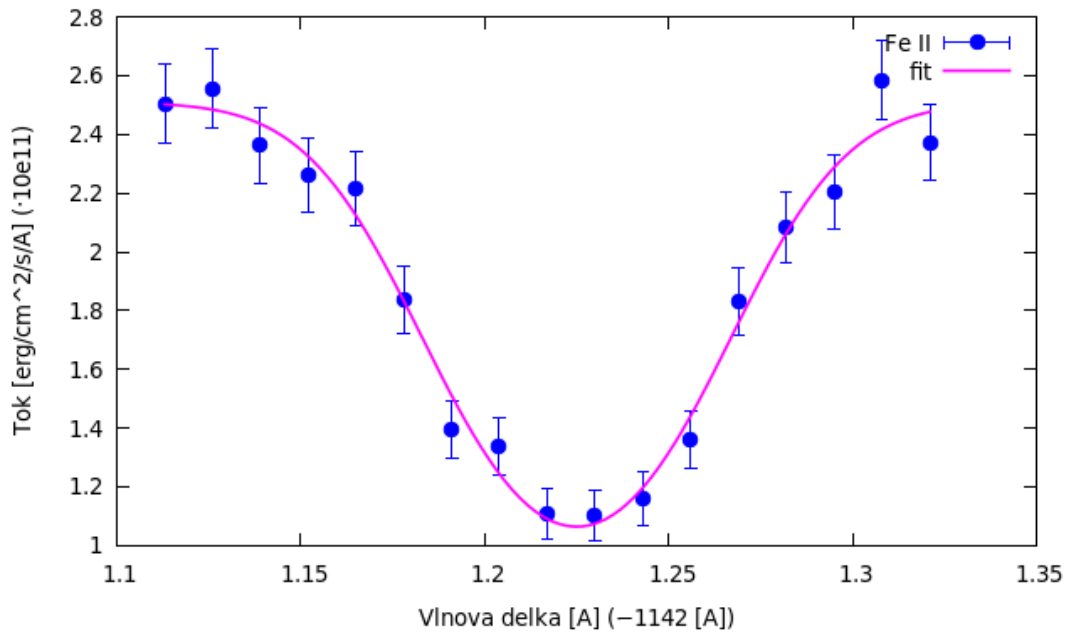
Obrázek 4.11: Fe II $\lambda = 1144,9340 \text{ \AA}$



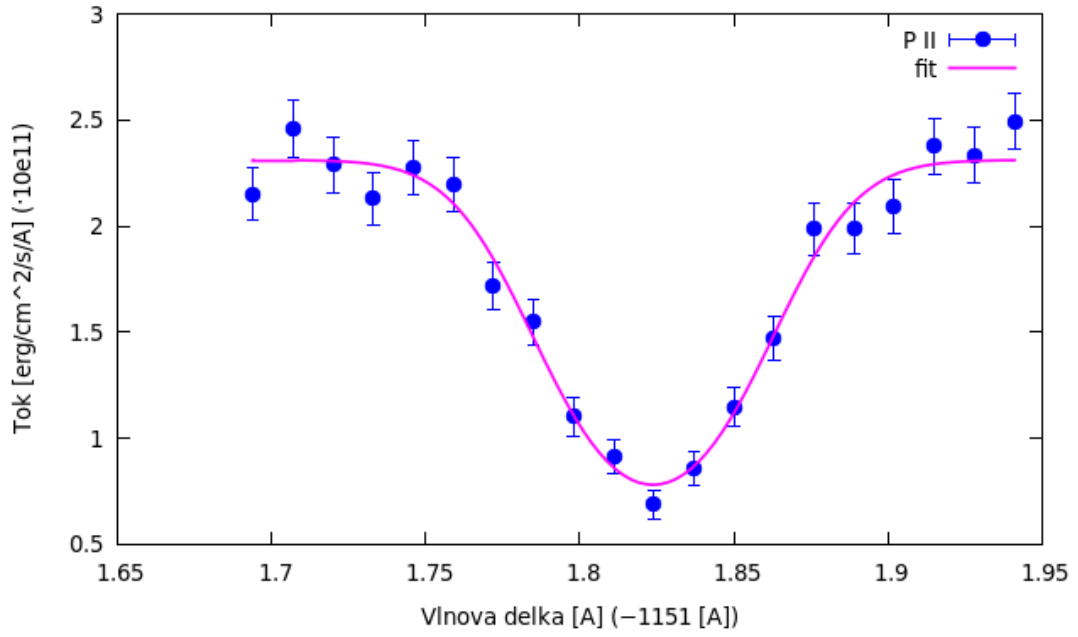
Obrázek 4.12: Fe II $\lambda = 1145,9174 \text{ \AA}$



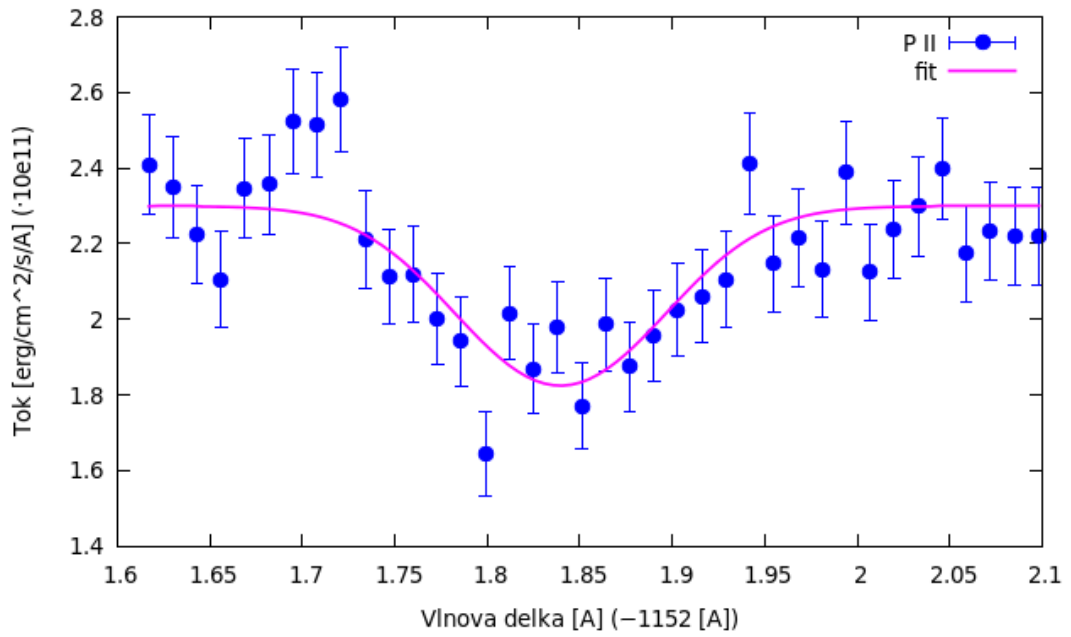
Obrázek 4.13: Fe II $\lambda=1125,4494 \text{ \AA}$



Obrázek 4.14: Fe II $\lambda=1143,2250 \text{ \AA}$

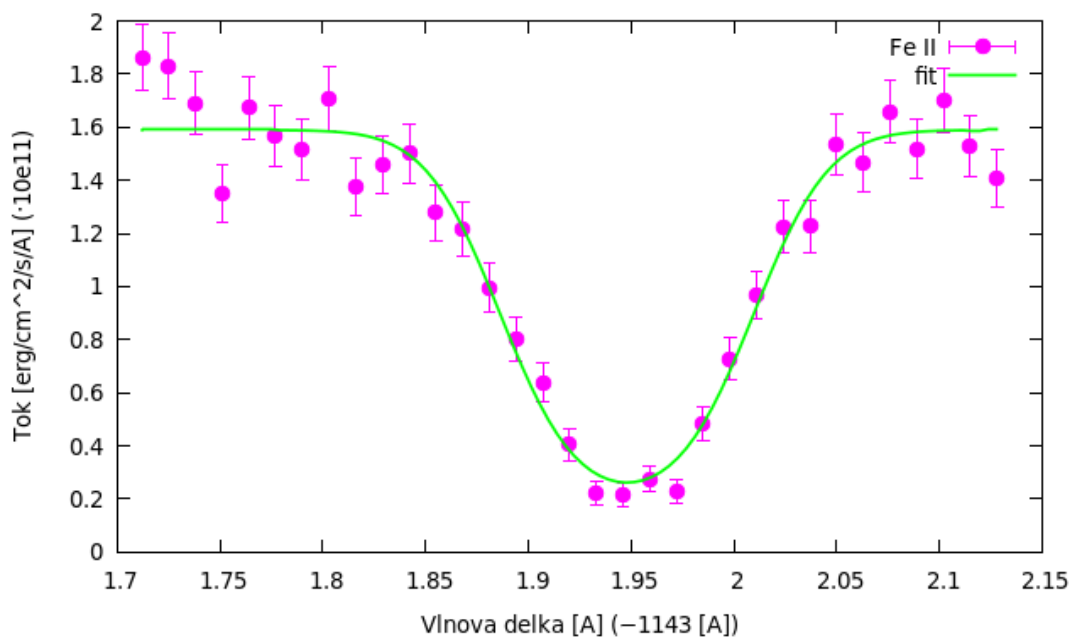


Obrázek 4.15: P II $\lambda = 1152,8238 \text{ \AA}$

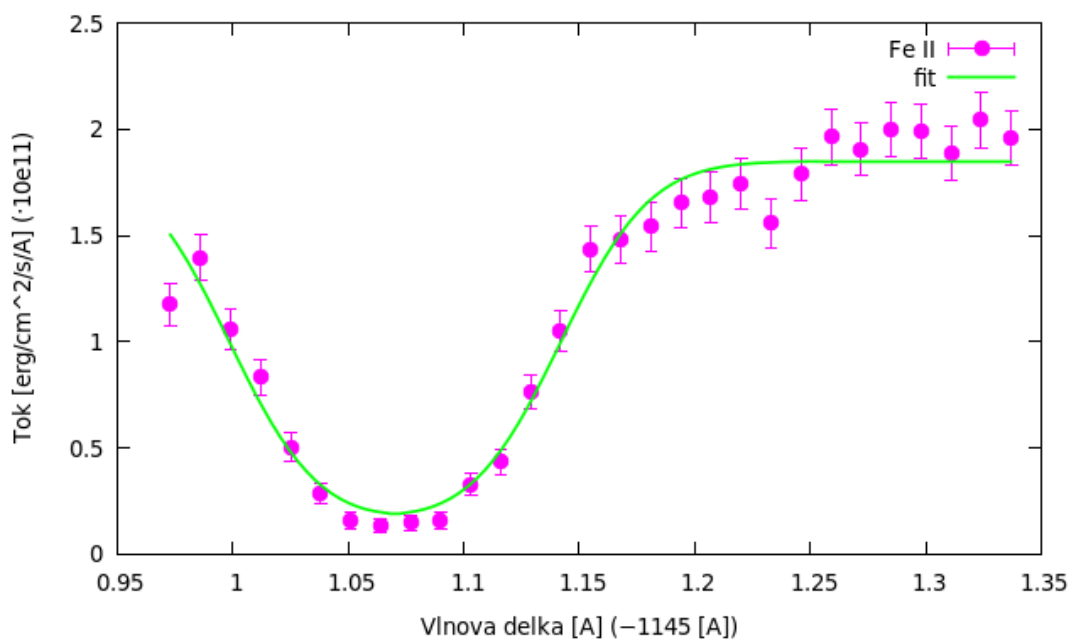


Obrázek 4.16: P II $\lambda = 1153,8397 \text{ \AA}$

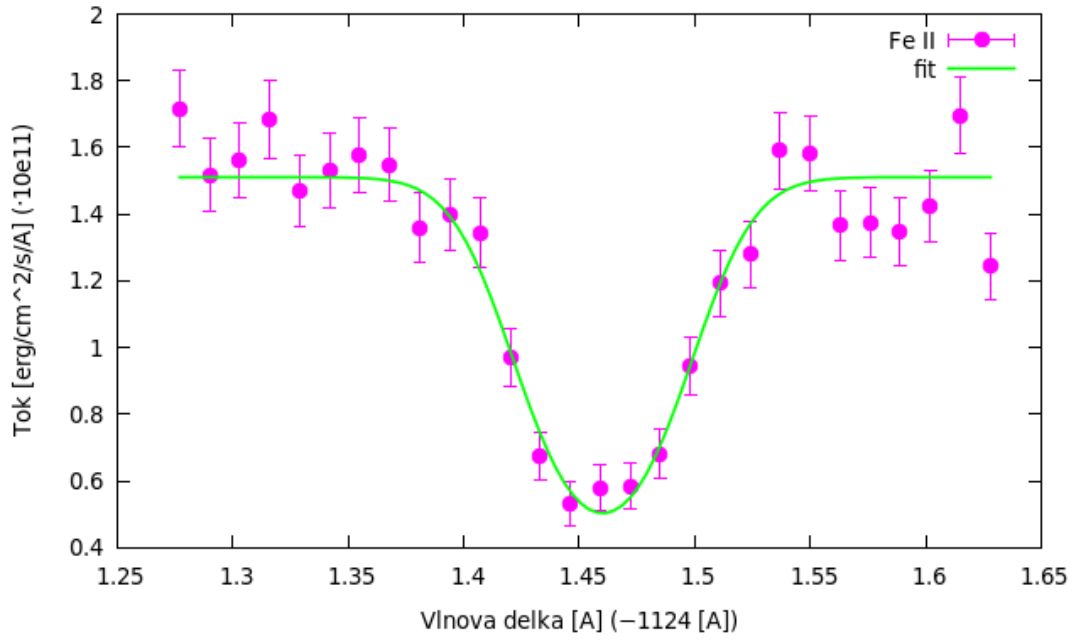
Hvězda SK -67 111



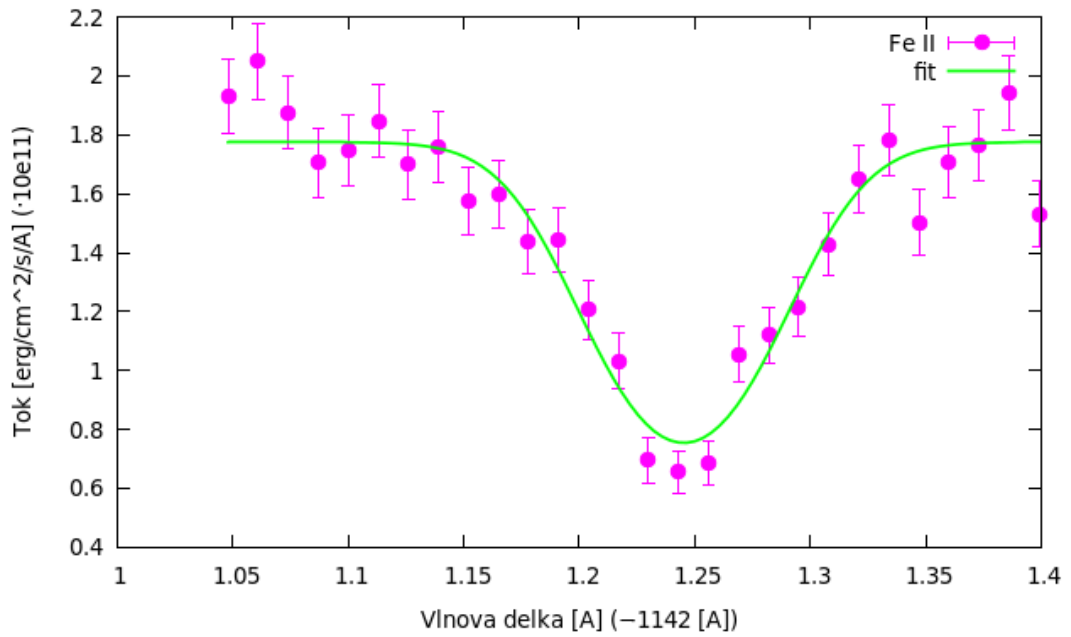
Obrázek 4.17: Fe II $\lambda = 1144,9480 \text{ \AA}$



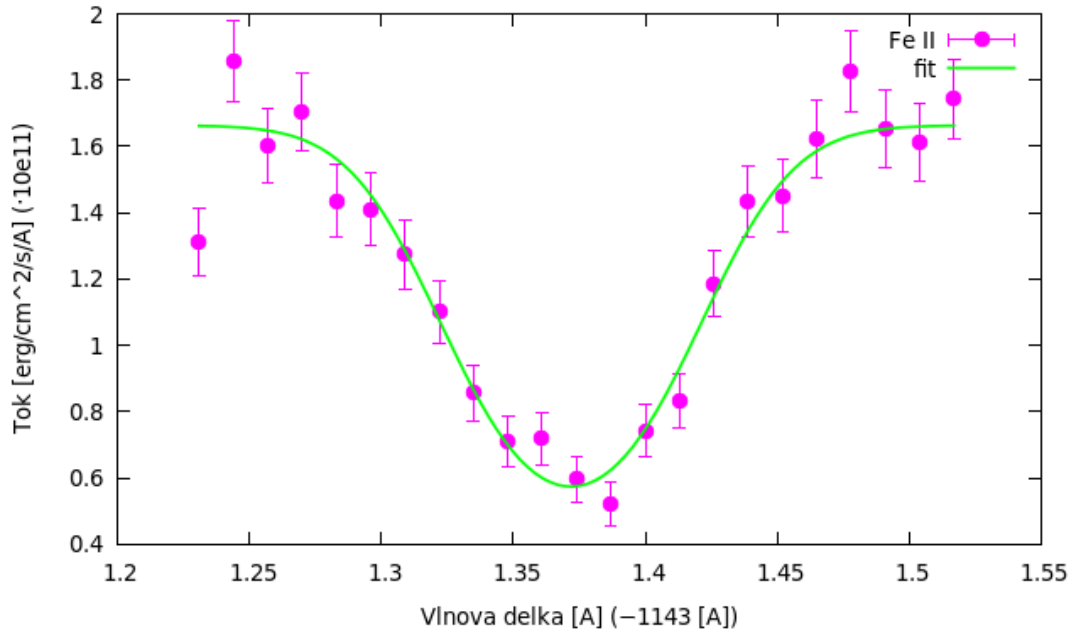
Obrázek 4.18: Fe II $\lambda = 1146,0703 \text{ \AA}$



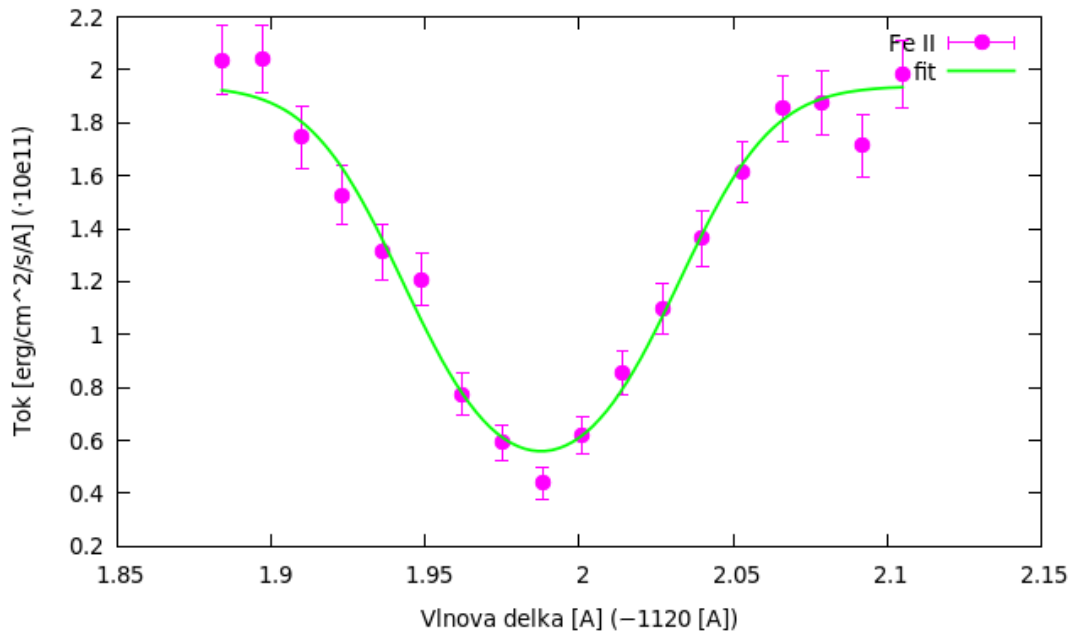
Obrázek 4.19: Fe II $\lambda = 1125,4602 \text{ \AA}$



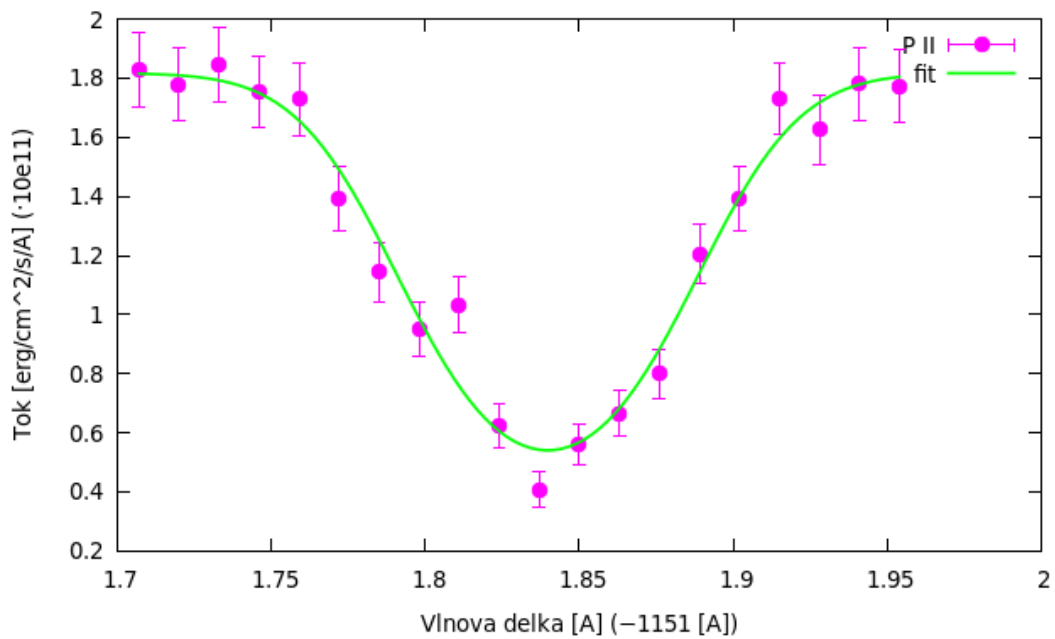
Obrázek 4.20: Fe II $\lambda = 1143,2453 \text{ \AA}$



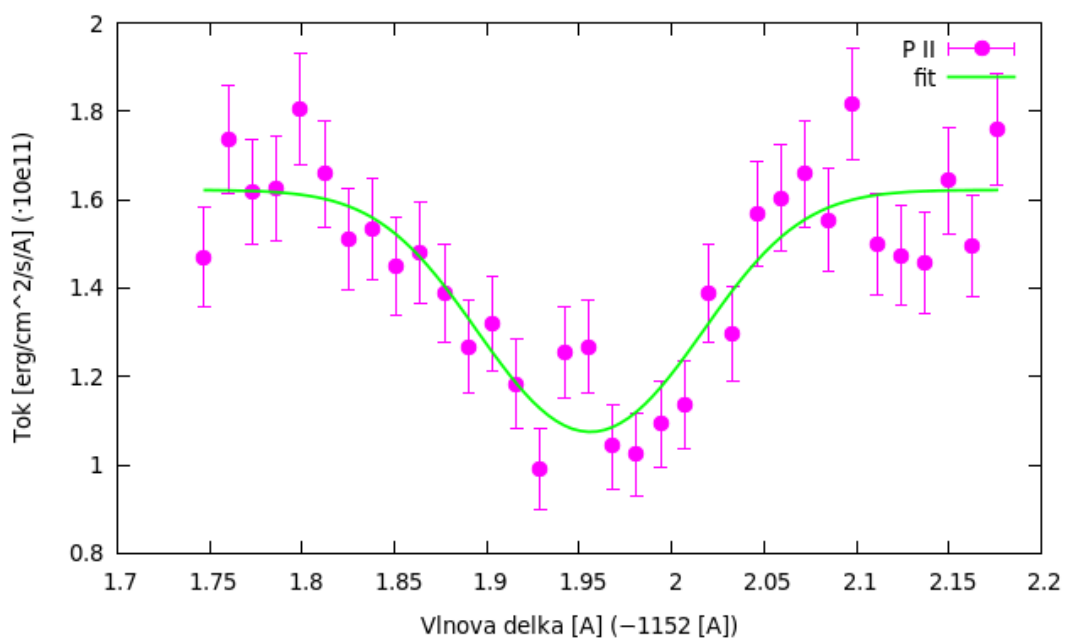
Obrázek 4.21: Fe II $\lambda=1144,3719 \text{ \AA}$



Obrázek 4.22: Fe II $\lambda=1121,9876 \text{ \AA}$



Obrázek 4.23: P II $\lambda = 1152,8398 \text{ \AA}$



Obrázek 4.24: P II $\lambda = 1153,9559 \text{ \AA}$

4.4 Radiální rychlosti

Cílem mé bakalářské práce je vypočítat radiální rychlosti oblaků mezihvězdné látky mezi družicí FUSE a vybranými hvězdami. Radiální rychlosti jednotlivých prvků v těchto oblacích získám ze vztahu

$$v_r = c \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right), \quad (4.3)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792,458$ km/s, λ_0 je již zmíněná laboratorní vlnová délka daného iontu a $\Delta\lambda$ je posun středu nalezené spektrální čáry vůči laboratorní vlnové délce vypočtený výše. Nejistoty radiálních rychlostí závisí pouze na nejistotách $\Delta\lambda$, vypočítám je jako

$$\delta v_r = v_r \left(\frac{\delta\lambda}{100} \right). \quad (4.4)$$

Tabulky s vypočtenými radiálními rychlostmi:

Č. čáry	Iont	λ [Å]	v_r [km/s]	δv_r [km/s]
1	Fe II	1144,939	3,45	0,52
2	Fe II	1145,884	250,79	0,71
3	Fe II	1125,449	1,74	0,67
4	Fe II	1143,232	3,1	0,71
5	Fe II	1144,184	252,74	0,44
6	P II	1152,823	1,4	0,55
7	P II	1153,759	244,82	1,03

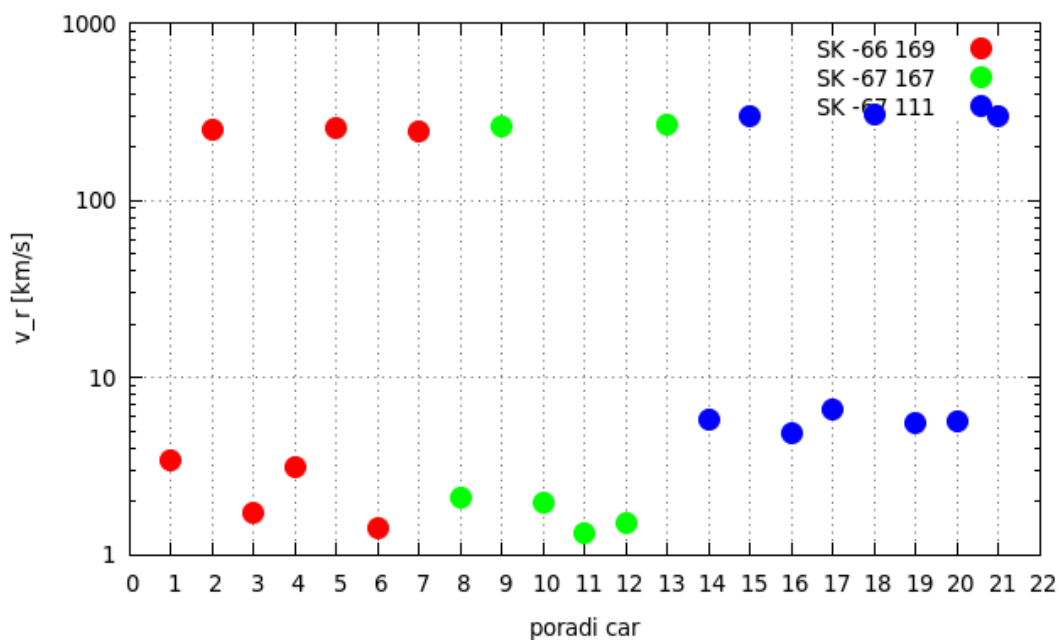
Tabulka 4.6: Vypočtené radiální rychlosti pro hvězdu SK -66 169.

Č. čáry	Iont	λ [Å]	v_r [km/s]	δv_r [km/s]
8	Fe II	1144,934	2,08	0,98
9	Fe II	1145,917	259,58	1,65
10	Fe II	1125,449	1,98	0,55
11	Fe II	1143,225	1,32	0,37
12	P II	1152,824	1,5	0,42
13	P II	1153,84	265,69	2,08

Tabulka 4.7: Vypočtené radiální rychlosti pro hvězdu SK -67 167.

Č. čáry	Iont	λ [Å]	v_r [km/s]	δv_r [km/s]
14	Fe II	1144,948	5,75	0,6
15	Fe II	1146,07	299,62	0,56
16	Fe II	1125,46	4,85	0,66
17	Fe II	1143,245	6,63	0,79
18	Fe II	1144,372	302,06	0,71
19	Fe II	1121,988	5,49	0,45
20	P II	1152,84	5,66	0,49
21	P II	1153,956	295,91	1,57

Tabulka 4.8: Vypočtené radiální rychlosti pro hvězdu SK -67 111.



Obrázek 4.25: Graf s radiálními rychlostmi pro vybrané ionty. Pořadí čar jsem stanovila pro názornost grafu.

4.5 Diskuze výsledků

K hlubší analýze bylo ze spekter tří zvolených hvězd vybráno 21 absorpčních čar patřících mezihvězdné látce. Jedná se o čáry Fe II, protože jich bylo nalezeno nejvíce, a o čáry P II, protože fosfor je v této oblasti mezihvězdného prostoru poměrně vzácný. Ve spektrech zvolených hvězd jsou vlastnosti čar mezihvězdného prostředí velice podobné, právě proto, že mají velmi podobné souřadnice a světlo, které k nám z nich vyzařuje, prochází téměř totožným mezihvězdným prostorem. Identifikovala jsem čtyři oblaka mezihvězdné látky. Dvě z nich byla pozorována v blízkosti našeho Slunce a dvě ve Velkém Magellanově oblaku. Ze získaných výsledků vidíme, že oblaka mezihvězdné látky se projevují ve více zkoumaných čarách, tedy že jeden oblak určíme z více identifikovaných čar. Vypočtené radiální rychlosti jsou v rámci jednotlivých oblaků velmi podobné.

Průměrné rychlosti dvou oblaků nacházejících se v blízkosti našeho Slunce, zřejmě v disku Galaxie, jsou $(2,07 \pm 0,60)$ km/s a $(5,68 \pm 0,60)$ km/s. Průměrné rychlosti dvou oblaků nacházejících se ve Velkém Magellanově oblaku, jsou $(254,72 \pm 1,18)$ km/s a $(299,20 \pm 0,95)$ km/s. Hodnoty pro radiální rychlost v Magellanově oblaku jsem ověřila se zdrojem [e6], který udává radiální rychlost $(262,2 \pm 3,4)$ km/s. S touto rychlostí se mé výsledky poměrně dobře shodují.

V grafu na obrázku 4.25 s radiálními rychlostmi jsou dobře rozpoznatelná oblaka v naší Galaxii a oblaka ve velkém Magellanově oblaku, jelikož se svou radiální rychlostí výrazně liší. Z vypočteného Dopplerova posuvu víme, že se všechny nalezené a vypočtené komponenty mezihvězdné látky pohybují směrem od pozorovatele (družice FUSE), tedy že se od nás tyto oblaka vzdalují.

Při zkoumání spekter zvolených hvězd bylo identifikováno 51 absorpčních čar mezihvězdného prostředí. Nicméně prvotní počet čar vybraných k identifikaci byl vyšší. Některé absorpční čáry se mi nepodařilo identifikovat z důvodu, že jsem nebyla schopna přesně rozhodnout, kterému prvku náleží.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo určení radiálních rychlostí oblaků mezihvězdné látky, které se nacházejí ve směru hvězd SK -66 169, SK -67 167 a SK -67 111. Hvězdy leží ve Velkém Magellanově oblaku a jejich spektra byla pořízena družicí FUSE. Ve spektrech jsem identifikovala 51 absorpčních čar mezihvězdné látky, z nichž bylo vybráno 21 čar k dalšímu rozboru. Porovnáním zjištěné a laboratorní vlnové délky vybraných čar byl určen Dopplerův posuv pro jednotlivé čáry. Vypočetla jsem radiální rychlosti náležící čtyřem oblakům mezihvězdné látky. Dvě oblaka se nachází v naší Galaxii v blízkosti Slunce a další dvě ve Velkém Magellanově oblaku. Výsledky této bakalářské práce se shodují s informacemi o radiálních rychlostech nalezenými ve zdroji [e6]. Pro zpřesnění informací o radiálních rychlostech by bylo přínosné zpracovat i další prvky ve spektru hvězd a identifikovat prvky také v dalších oblastech spektra.

Seznam použité literatury:

- [1] Mikulášek Z., Krtička J., *Fyzika hvězd a hvězdných soustav*, MU, Brno, 2005.
- [2] Dyson J. E., Williams D. A., *The Physics of The Interstellar Medium*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1997.
- [3] Spitzer L. Jr., *Physical Processes in the Interstellar Medium*, John Wiley and Sons, Canada, 1978.
- [4] Kleczek J., *Velká Encyklopedie Vesmíru*, Academia, Praha, 2002.
- [5] Osterbrock D. E., *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, University Science Books, Sausalito, California, 1989.
- [6] Mikulášek Z., *Fyzika horkých hvězd I*, MU, Brno, 2011.
- [7] Draine B. T., *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*, Princeton University Press, Princeton, 2011.
- [8] Tichý A., *Studium mezihvězdného prostředí ve směru hvězdy HD 210809*, bakalářská práce, Masarykova Univerzita, Brno, 2007.

Elektronické zdroje:

- [e1] <http://www.hubblesite.org>
- [e2] <https://www.eso.org>
- [e3] <http://www.kosmo.cz/modules.php?op=modload&name=kosmo&file=index&fl=/s/1999/035A.HTM>
- [e4] <http://www.pa.uky.edu/~peter/atomic/>
- [e5] <http://archive.stsci.edu/pub/vospectra/fuse2>
- [e6] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad>
- [e7] http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html