

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Hmotné hvězdy v pozorování družice FUSE

Jan Puchýř

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

Brno 2016

Bibliografický záznam

Autor: Jan Puchýř
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Hmotné hvězdy v pozorování družice FUSE

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

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

Akademický rok: 2015/2016

Počet stran: 46

Klíčová slova: hvězdný vítr, profil typu P Cyg, daleké UV, Lymanův skok

Bibliographic Entry

Author: Jan Puchýř
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Massive stars in the observations of the FUSE satellite

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

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

Academic Year: 2015/2016

Number of Pages: 46

Keywords: stellar wind, P Cyg profile, far-UV, Lyman limit

Rád bych poděkoval prof. Krtičkovi za mnoho zkušených rad k obsahu práce a také mojí rodině za podporu a toleranci mého pracovního rytmu.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 18. 5. 2016

Jan Puchýř

Abstrakt

V předložené práci studujeme spektra horkých hvězd pořízená družicí FUSE, která snímala v rozsahu vlnových délek 900–1200 Å. V této oblasti dalekého UV záření se nachází Lymanův skok, většina čar Lymanovy série vodíku a mnoho spektrálních čar vznikajících ve hvězdném větru, které mají profil typu P Cyg. Cílem práce bylo identifikovat ve spektrech profily typu P Cyg a z jejich průběhu stanovit terminální rychlost hvězdného větru. Hodnotu terminální rychlosti jsme určili pro celkem 33 hvězd různých spektrálních typů, i když u 16 z těchto hvězd je výsledná hodnota pouze dolní limitou terminální rychlosti.

Klíčová slova: hvězdný vítr, profil typu P Cyg, daleké UV záření, Lymanův skok

Abstract

In the present work we study hot stars' spectra taken by the FUSE satellite, which has observed the wavelength range of 900–1200 Å. This part of far-UV spectrum features the Lyman limit, most of the Lyman series of hydrogen lines and many spectral lines originating in the stellar winds, which have a P Cyg profile. The goal of this thesis was to identify P Cyg profiles in the spectra and determine the terminal velocity of stellar winds by examining their profiles. In the end we have found the values of terminal velocity for 33 stars of various spectral types, though the final value for 16 of these stars is only the lower limit of the terminal velocity.

Keywords: stellar wind, P Cyg profile, far-UV light, Lyman limit



MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2015/2016

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Student: Jan Puchýř

Program: Fyzika

Obor: Astrofyzika

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

Téma práce: Hmotné hvězdy v pozorování družice FUSE

Téma práce anglicky: Massive stars in the observations of FUSE satellite

Oficiální zadání:

Družice FUSE patří k výjimečným družicím, které pozorovaly v dalekém ultrafialovém záření v oblasti Lymanova skoku. To je zcela jedinečná spektrální oblast pro studium horkých hvězd. V této oblasti jsou pozorovatelné jak četné spektrální čáry vodíku, vznikající ve hvězdné atmosféře, tak čáry vynikající ve hvězdném větru. Cílem bakalářské práce je studium horkých hvězd v této zajímavé oblasti spektra. Pro vybrané horké hvězdy budou identifikovány jednotlivé spektrální čáry nacházející se v této oblasti. Čáry hvězdného větru budou použity pro určení konečné rychlosti větru.

Literatura:

- Fullerton, A. W.; Massa, D. L.; Prinja, R. K. 2006, *ApJ*, 637, 1025
- Z. Mikulášek, J. Krtička: Fyzika horkých hvězd, MU, 2007

Jazyk závěrečné práce: *česky*

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

Datum zadání práce: 23. 6. 2015

V Brně dne: 1. 12. 2015

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):

Jan Puchýř

Jan Puchýř
student

J. Krtička

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

Rikard von Unge

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

Obsah

1	Spektrum prvků	10
1.1	Vodík	12
1.2	Jednoelektronové (vodíkpodobné) atomy	13
1.3	Víceelektronové atomy	14
2	Spektrum hvězdné atmosféry	15
2.1	Záření řídkého a hustého plynu	15
2.2	Typy profilů spektrálních čar	17
2.3	Rozšíření spektrálních čar	19
3	Hvězdný vítr	24
3.1	Základní informace	24
3.2	Vznik profilu typu P Cyg	25
3.3	Analýza profilu typu P Cyg	25
3.3.1	Klasické (saturované) profily	25
3.3.2	Nesaturované profily	26
4	Zpracování dat	29
4.1	Získání dat	29
4.2	Identifikace čar	29
4.3	Radiální rychlost hvězd	30
4.4	Hledání absorpčních hran	31
4.5	Výpočet v_∞ a Δv_∞	34
5	Závěr	37

Úvod

Spektroskopie byla a je jedním z nejdůležitějších odvětví astronomie. Analýza hvězdných spekter nám umožnila zjistit fyzikální charakteristiky hvězd jako je teplota, povrchové složení nebo tíhové zrychlení. Díky těmto znalostem jsme časem byli schopni porozumět mnoha detailům hvězdné struktury a jejich vývoje. Právě v důsledku rozvoje astronomické spektroskopie se od 19. století dá hovořit o astrofyzice.

Během 19. a většiny 20. století byla možná spektroskopická pozorování astronomických objektů pouze ve viditelném záření, tj. v oblasti vlnových délek zhruba 400–800 nm (4000–8000 Å), případně v omezené oblasti blízkého ultrafialového a infračerveného záření. Např. ultrafialové záření s vlnovou délkou menší než 300 nm (3000 Å) ale zemská atmosféra zcela pohlcuje. Pozorování (především záznam spekter) v této oblasti bylo tedy možné až v 60. letech 20. století pomocí spektrografů na raketách, od 70. let pak pomocí astronomických družic.

Jednou z ultrafialových spektroskopických družic byla družice FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer), která byla v provozu od června 1999 do října 2007. Na jejích datech jsme založili tuto práci, a to z velmi dobrého důvodu. Ostatní družice pozorující v UV totiž měřily buď na vlnových délkách větších než 1100 Å (Hubble Space telescope STIS, HST COS), nebo menších než 800 Å, na hranici rentgenového záření (ROSAT XUV, EUVE), viz [E2, E5]. FUSE jako jediná z družic měřila spektra v oblasti 900–1200 Å (90–120 nm), což je oblast velmi zajímavá. Nachází se v ní jednak mnoho čar Lymanovy série vodíku (hrana série, tzv. Lymanův skok, je na vlnové délce 912 Å), ale především mnoho čar vznikajících ve hvězdném větru – a právě ty jsou hlavním předmětem této práce.

Naším úkolem bylo u vybraných horkých hvězd určit terminální rychlost hvězdného větru v_∞ , což je velmi užitečná informace pro výzkum vývoje horkých hvězd, u nichž hvězdný vítr a s ním spojená ztráta hmoty hraje zásadní roli. K tomu bylo třeba změřit šířku absorpce u spektrálních čar s profilem typu P Cyg, typickým pro čáry vznikající ve hvězdném větru. Výsledkem práce je tabulka změřených hodnot.

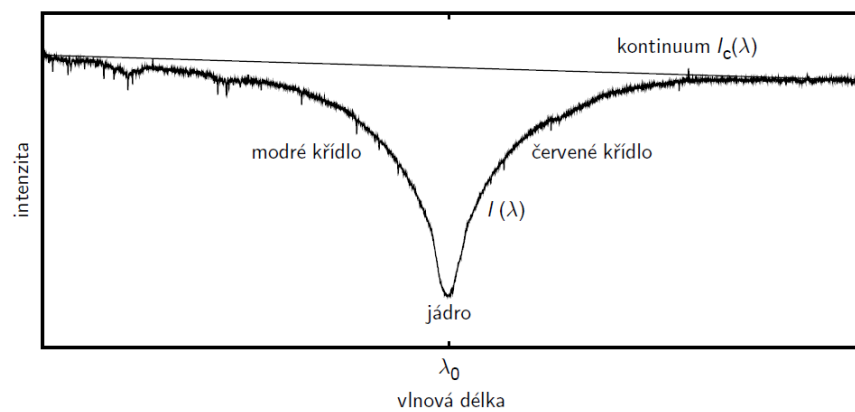
Kapitola 1

Spektrum prvků

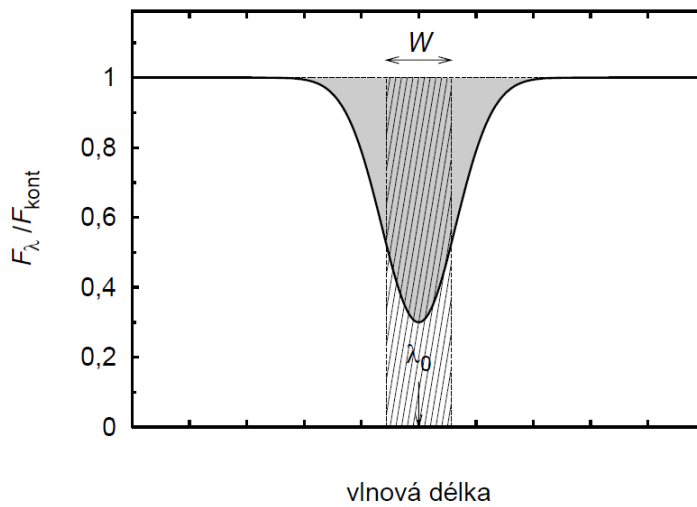
V této kapitole jsme čerpali z [2] a [3].

Spektrum je funkce vyjadřující závislost mezi vlnovou délkou elektromagnetického záření λ a intenzitou záření zdroje na dané vlnové délce $I(\lambda)$, která je úměrná hustotě zářivého toku na této vlnové délce F_λ (energii záření připadajícího na jednotku vlnové délky, která projde za 1 s jednotkou plochy, $[F_\lambda] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{Å}^{-1}$, případně $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$). Spektrum libovolného zdroje se dělí na 2 složky: a) *spojité spektrum (kontinuum)*, b) *čarové spektrum*. Spektrální čáry mohou být emisní, absorpční nebo kombinace obojího (o tom se zmíníme podrobněji v kapitole 2). Z hlediska struktury rozdělujeme každou čáru na jádro, modré křídlo a červené křídlo, viz obr. 1.1. Množství záření, které daná čára celkově vyzařuje, nebo pohlcuje ve srovnání s kontinuem, udává tzv. *ekvivalentní šířka čáry* - což je šířka obdélníku, který má výšku intenzity kontinua a stejnou plochu jako daná čára (viz obr. 1.2).

Čarová a spojitá složka spektra vzniká velice odlišným způsobem. Čarové spektrum vzniká při vázaně-vázaných přechodech, protože vázané kvantové stavy atomu mají pevně dané diskrétní hladiny energie. Naopak volný elektron může mít jakoukoliv energii. Spojité spektrum tedy vzniká při vázaně-volných a volně-volných přechodech a také při rozptylu fotonů na volných elektronech nebo na jiných částicích. Protože rozložení energetických stavů je různé pro atomy různých prvků i pro různé ionty stejných prvků, každý druh atomu má své specifické spektrum, čarové i spojité. Poměrně jednoduché je spektrum vodíku a iontů těžších prvků s jedním elektronem, složitější situace je u víceelektronových atomů. (Ještě složitější je u molekul, ty se ale v horkých hvězdách prakticky nenachází, takže je můžeme vynechat.)



Obrázek 1.1: Kontinuum a spektrální čára. Převzato z [1]



Obrázek 1.2: Ekvivalentní šířka čáry. Převzato z [1]

1.1 Vodík

Energetické stavy pro atom vodíku se dají zjistit řešením stacionární Schrödingerovy rovnice $[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r)]\psi = E\psi$ pro coulombovský potenciál $V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ (r – vzdálenost elektronu od jádra, e – velikost náboje elektronu, ϵ_0 – permitivita vakua) a efektivní hmotnost $m = \mu_H \approx m_e$ (redukováná hmotnost soustavy proton–elektron)

$$E_n = -\frac{\mu_H e^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2} \approx \frac{-13,6 \text{ eV}}{n^2}, \quad (1.1)$$

kde $n \in \mathbf{N}$ je hlavní kvantové číslo a E_1 je energie základní hladiny, neboli záporně vzatý ionizační potenciál. Z tvaru rovnice 1.1 plyne, že s rostoucím n se hladiny postupně zhušťují a pro $n \rightarrow \infty$ přecházejí ve spojité spektrum energií ($E \rightarrow 0$, elektron se uvolní z atomu). Kvantový stav udávají celkem 4 čísla $[n, l, m, s]$, takže každou z těchto hladin tvoří $2n^2$ degenerovaných stavů o stejné energii (v prvním přiblížení)¹.

V atomu dochází k deexcitaci elektronu z vyšší hladiny energie s číslem n_1 na nižší hladinu s číslem n_2 , spojené s vyzářením fotonu. Analogickým procesem je absorpce fotonu, spojená s excitací elektronu do vyššího stavu — proto se spektrální čáry prvků vyskytují jako emisní i absorpční čáry. Místo absorpce někdy dochází ke stimulované emisi. Čára se nachází na vlnové délce, jejíž foton má energii rovnou rozdílu jednotlivých energií hladin.

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} = E_1 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (1.2)$$

Z tohoto vztahu pak vyplývá Balmerův experimentálně odvozený vzorec pro čáry vodíku

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right), \quad (1.3)$$

kde $R_H = R_\infty \frac{\mu_H}{m_e}$ je hodnota Rydbergovy konstanty pro vodík, kterou můžeme aproximovat R_∞ – idealizovanou hodnotou Rydbergovy konstanty pro nekonečně hmotné jádro

$$R_\infty = \frac{e^4 m_e}{8\epsilon_0^2 \hbar^3 c} = 1,0973731568525(73) \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}. \quad (1.4)$$

¹Reálná situace je složitější. Tyto hladiny jsme totiž získali z nerelativistické Schrödingerovy rovnice. Přesné energetické hladiny získáme až po započtení relativistické korekce a spin-orbitální interakce, ty pak obecně závisí na číslech n, l, m, s . Praktické je v tomto případě zavést kvantové číslo j , udávající velikost celkového momentu hybnosti. Výsledné hladiny energie vodíku pak vlivem výslednice zmíněných dvou veličin závisí pouze na n a j .

Spektrální čáry vodíku proto vytvářejí tzv. série – přechody do základní hladiny ($n_2 = 1$) tvoří Lymanovu sérii, přechody do první excitované hladiny ($n_2 = 2$) tvoří Balmerovu sérii, přechody do dalších hladin tvoří Paschenovu sérii, Brackettovu sérii, Pfundovu sérii atd. Všechny tyto série mají stejnou strukturu. Nej- silnější je čára na největší vlnové délce, která odpovídá přechodu z hladiny číslo ($n_2 + 1$) a značí se α . Následují čáry na stále nižších vlnových délkách, vzdálenost mezi nimi se snižuje, stejně tak i jejich intenzita. Na určité vlnové délce pak jde hustota čar k nekonečnu², zde je tzv. hrana série, jejíž energie fotonu odpovídá přechodu z hladiny číslo n_2 do volného stavu s $E = 0$ ($n \rightarrow \infty$). V tomto místě čáry série skončí a zároveň dojde ke skoku v kontinuu (v případě emisního spektra je intenzita na vlnových délkách menších než hrana série vyšší, v případě absorpčního spektra nižší) – proto se místo „hrana Balmerovy série“ říká někdy „Balmerův skok“ a „hrana Lymanovy série“ je též „Lymanův skok“.

1.2 Jednoelektronové (vodíkupodobné) atomy

Analogická situace jako u vodíku je u iontů těžších prvků s jedním elektronem, např. He II (= He⁺) nebo Li III (= Li²⁺). Od vodíku se liší Z -krát větším nábojem jádra a nepatrně nižší redukovanou hmotností μ , jejich potenciál jádra je tedy $V(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$, velikost energie stavů je zhruba Z^2 -krát větší (přesněji $Z^2 \cdot \frac{\mu}{\mu_H}$ -krát).

$$E_n = -\frac{\mu Z^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2} \approx \frac{-Z^2 \cdot 13,6 \text{ eV}}{n^2} \quad (1.5)$$

Spektrum těchto atomů tvoří stejnou strukturu sérií jako vodík, vlnová délka čar je ale ($Z^2 \cdot \frac{\mu}{\mu_H}$)-krát menší. Proto např. přechod mezi 4. a 6. hladinou He II téměř splývá s čarou H α (2.–3. hladina H).

1.3 Víceelektronové atomy

Mnohem složitější situace je v případě atomů s více elektrony. Zde totiž na elektron nepůsobí pouze přitažlivá síla jádra, ale také odpudivá síla ostatních elektronů. Dochází zde k tzv. stínění náboje jádra – výsledná energie elektronu závisí na tom, jak moc se v daném orbitalu nachází blíž k jádru a jak moc dál

²V atomu sice vzniká nekonečně mnoho čar, ale v důsledku jejich rozšíření ve spektru reálně pozorujeme vždy konečné množství čar.

od jádra než ostatní elektrony. Obvykle se vyjadřuje pomocí efektivního náboje jádra

$$E_{nl} \approx hc \frac{Z_{\text{ef}}^2 R}{n^2} , \quad (1.6)$$

$$Z_{\text{ef}} = Z - \sigma = \zeta + p , \quad (1.7)$$

kde $R = R_{\infty} \frac{\mu}{m_e}$ je hodnota Rydbergovy konstanty pro daný prvek, σ je zastínovací parametr, ζ je efektivní náboj jádra při plném stínění a p je penetrační parametr. $\zeta = Z - N + 1$, kde N je počet elektronů, tzn. pro neutrální atomy je $\zeta = 1$, pro ionty $1+$ je $\zeta = 2$, pro ionty $2+$ je $\zeta = 3$ atd. (Proto se ve spektroskopii značí neutrální atom I, jednou ionizovaný atom II, ...)

Stínění je větší pro stavy s vyšším l , a to tak výrazně, že např. d-orbitaly jsou téměř plně stíněné ($\sigma \approx N - 1$, $p \approx 0$, $Z_{\text{ef}} \approx \zeta$). To je mj. příčinou pravidla, že „d-orbitaly neutrálních atomů jsou hydrogenické“ (jejich energie je stejná jako u d-orbitalů vodíku).

Vlivem stínění jádra, výměnné a spin-orbitální interakce ve výsledku hladiny energie elektronů závisí obecně na všech kvantových číslech n , l , m , s jednotlivých elektronů. Energetický stav atomu je pak jednoznačně určen celkovými kvantovými čísly L , S , J , která udávají velikost výsledného orbitálního, spinového a celkového momentu hybnosti všech elektronů v obalu. Dané trojici čísel $[L, S, J]$ se říká *spektrální term*.

Kapitola 2

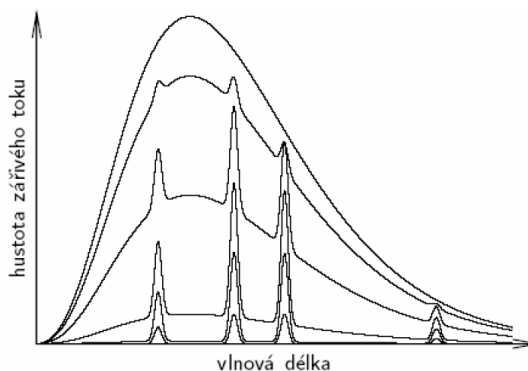
Spektrum hvězdné atmosféry

V této kapitole jsme čerpali z [1] a z [2].

2.1 Záření řídkého a hustého plynu

Abychom pochopili, kdy a proč plyn září spíše v kontinuu, v emisních a v absorpčních čarách, představíme si nejprve oblak velmi řídkého plynu zahřátého na určitou teplotu. V závislosti na teplotě jsou atomy plynu excitované na různé energetické hladiny a nachází se zde i různé množství ionizovaných atomů. Plyn proto září a) v důsledku deexcitace (tím vzniká záření v čarách) a b) v důsledku rekombinace volných elektronů a volně-volných přechodů (tím vzniká záření v kontinuu). Protože je plyn velmi řídký, prakticky zde nedochází k absorpci ani rozptylu a téměř všechno záření z něj přímo uniká. To mimo jiné vede k tomu, že se plyn zářením ochlazuje, a je tedy potřeba zdroj energie, který ho udržuje na konstantní teplotě.

Takovýto plyn bude mít spektrum, kde dominují emisní čáry odpovídající přechodům mezi vázanými stavy atomů, kontinuum je mnohem slabší. Relativní intenzita kontinua a poměr



Obrázek 2.1: Náznak spektra různě hustých plynů. Převzato z [2]

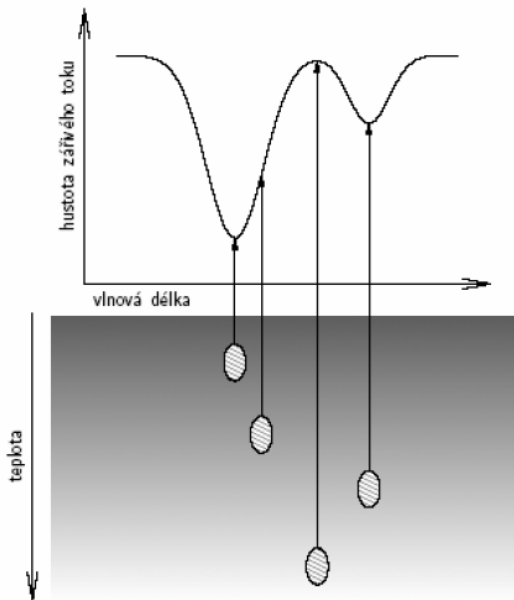
intenzit jednotlivých čar pak závisí na

teplotě. Příkladem emisního čarového spektra velmi řídkého plynu jsou spektra planetárních mlhovin¹.

Nyní se představíme stejný plyn se stále větší hustotou při stejném objemu. Ze začátku bude spektrum stejné jako v předchozím odstavci, pouze se zvýší jeho intenzita přímo úměrně množství atomů. Postupně se ale růst hustoty začne projevovat tím, že fotony budou častěji narážet na atomy (bude se zvyšovat optická hloubka). Začne se tak znatelně projevovat absorpce a rozptyl záření, a to především v čarách (s tím, že absorbovaný foton někdy není znovu vyzářen, protože dochází ke srážkové deexcitaci, tzv. superpružné srážce, kdy se excitační energie přemění v kinetickou energii atomů nebo volných elektronů). Nárůst intenzity záření v čarách se tedy začne zpomalovat, zatímco intenzita kontinua stále roste. Viz obrázek 2.1.

Nakonec začne být hustota plynu tak velká, že střední volná dráha fotonů bude nesrovnatelně menší než rozměry oblaku. Jakýkoliv vyzářený foton bude brzy absorbován a uniknout ven se podaří jen těm fotonům, které vzniknou v povrchových vrstvách. Potom spektrální čáry zcela zmizí, zůstane pouze kontinuum a spektrum plynu bude odpovídat záření absolutně černého tělesa o dané teplotě.

Tento případ je ale možný pouze za předpokladu, že celý oblak plynu je na stejné teplotě. Do určité míry tomu odpovídá situace v nitru hvězd, kde platí (lokální) termodynamická rovnováha. V případě hvězdných atmosfér pozorujeme významnou odlišnost od záření absolutně černého tělesa — absorpční čáry. Příčina je jednoduchá. Z atmosféry hvězdy záření volně uniká do prostoru, a to tím lépe, v čím vyšších vrstvách vznikne, zatímco z nitra hvězdy záření neuniká. Atmosféra se tedy



Obrázek 2.2: Vznik absorpčního profilu. Převzato z [2]

¹Planetární mlhoviny ale nejsou zcela dokonalý příklad, protože nejsou v termodynamické rovnováze.

neustále ochlazuje a aby se ustanovila rovnováha toku záření, musí teplota směrem k povrchu klesat. Protože hvězdná látka absorbuje v čarách více než v kontinuu, v centru čáry má absorpce maximum, v křídlech čáry absorpce klesá se vzdáleností od centra, až dosáhne hodnoty kontinua, přichází k nám záření v čarách v průměru z vyšších vrstev atmosféry (kde je nižší teplota) v závislosti na míře absorpce na dané vlnové délce. Tím vzniká absorpční profil spektrálních čar, viz obrázek 2.2.

2.2 Typy profilů spektrálních čar

Absorpční profil

Absorpční profil je nejčastějším profilem spektrálních čar. Vzniká v běžné hvězdné atmosféře, kde teplota klesá s výškou, protože záření ve středu čáry vzniká ve větších výškách než v křídlech čáry a v kontinuu (detaily jsou v předchozím oddílu).

Emisní profil

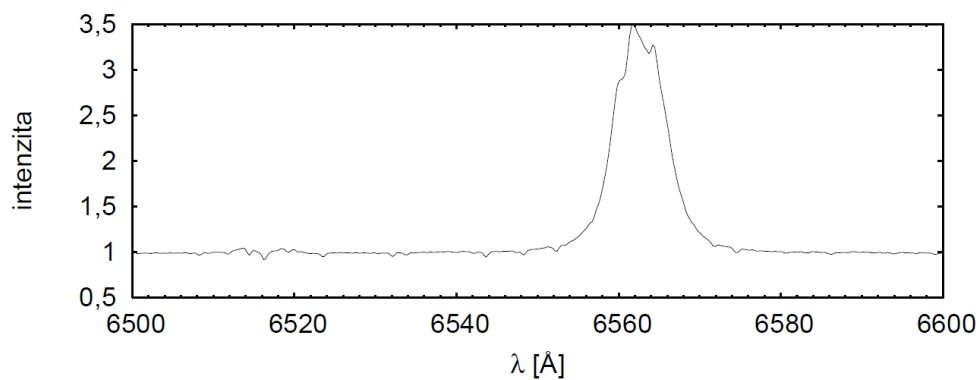
Emisní profil vzniká např. v atmosférách, kde teplota (případně zdrojová funkce) roste s výškou. To může být způsobeno místní teplotní inverzí, ale také přítomností obálky v okolí hvězdy. Tento profil mají např. čáry Ca II vznikající ve sluneční chromosféře.

Profil typu Be

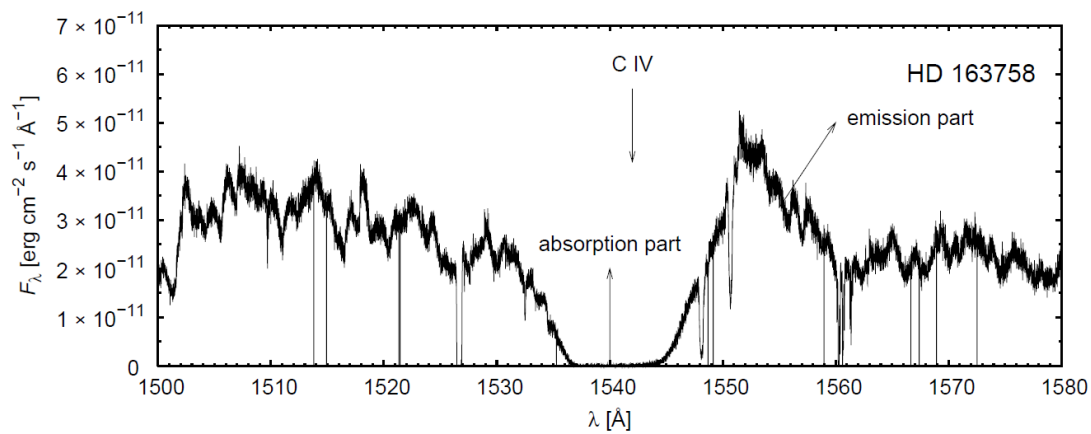
Některé horké hvězdy, nejčastěji spektrálního typu B, obsahují čáry s emisním profilem, který má někdy ve svém centru absorpci, viz obr. 2.3. Těmto hvězdám se říká *hvězdy typu Be* a podle nich byl pojmenován příslušný profil čáry. Příčinou je rotující disk okolo hvězdy.

Profil typu P Cyg

Profil typu P Cyg se skládá z absorpce v modré části a emise v červené části. Jde o typický profil pro čáry vznikající ve hvězdném větru, což je podrobněji popsáno v kapitole 3.



Obrázek 2.3: Spektrální čára $H\alpha$ s profilem typu Be ve spektru hvězdy κ Dra (B6IIIpe). Spektrum bylo pořízeno ondřejovským 2m dalekohledem. Převzato z [1]



Obrázek 2.4: Typický profil typu P Cyg ve spektru hvězdy HD 163758. Převzato z [1]

2.3 Rozšíření spektrálních čar

Přirozená šířka spektrální čáry

I kdyby byl atom zcela izolován a nepůsobily na něj žádné vnější vlivy, jeho spektrální čáry by nebyly dokonale ostré. Platí totiž Heisenbergovy relace neurčitosti pro energii a čas $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$, kdy Δt je střední doba, kterou atom stráví v excitovaném stavu. Průběh čáry ovlivněné pouze heisenbergovským rozmytím počátečního a koncového stavu je dán Lorentzovým profilem

$$\phi(\nu) = \frac{\frac{\gamma}{4\pi^2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{4\pi^2}\right)^2}, \quad (2.1)$$

kde ν_0 je frekvence maxima a γ je šířkový parametr. Vzhledem k obvyklým velikostem Δt je tato šířka čáry extrémně malá a v praxi ji můžeme zanedbat. Mechanismus jejího vzniku je ale velmi důležitý, protože úzce souvisí s následujícím typem rozšíření.

Srážkové rozšíření

Příčinou srážkového rozšíření je elektrická interakce mezi částicemi (atomy, ionty, volné elektrony), která je v plynu/plazmatu zdaleka nejsilnější během srážek. Při nich často dochází k tzv. srážkové deexcitaci, čímž se výrazně zkracuje průměrná doba, kdy je atom v excitovaném stavu, což vede k výraznému zvýšení heisenbergovského rozmytí energie stavů. Srážkové rozšíření je tedy závislé především na hustotě látky. V prvním přiblížení má čára rozšířená pouze tímto způsobem opět Lorentzův profil

$$\phi(\nu) = \frac{\frac{\Gamma}{4\pi^2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\Gamma}{4\pi^2}\right)^2}, \quad (2.2)$$

kde šířkový parametr $\Gamma \gg \gamma$ je úměrný četnosti srážek.

Dopplerovo (tepelné) rozšíření

Částice tvořící jakoukoliv látku jsou v neustálém neuspořádaném pohybu. Střední velikost jeho rychlosti souvisí s termodynamickou teplotou látky (T), proto se mu říká *tepelný pohyb*. V důsledku tepelného pohybu pak atomy vyzařují při různé radiální rychlosti vůči pozorovateli a kvůli Dopplerovu jevu tedy

pozorujeme různou frekvenci fotonů – proto se tomuto rozšíření říká Dopplerovo, případně tepelné rozšíření. Čára rozšířená tímto způsobem má Gaussův profil

$$\phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} \exp\left[-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2}\right], \quad (2.3)$$

kde pološířka profilu

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \frac{v_{\text{tep}}}{c}, \quad (2.4)$$

kde v_{tep} je střední velikost radiální složky tepelné rychlosti. Ta je při Maxwellově rozdělení dána vztahem

$$v_{\text{tep}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (2.5)$$

kde m je hmotnost částic. Z této závislosti na hmotnosti plyne, že tepelné rozšíření je menší pro čáry těžších prvků, větší pro čáry lehčích prvků a zdaleka největší pro čáry vodíku. Tepelné rozšíření je příčinou typického gaussovského průběhu intenzity v jádrech čar, a proto mají čáry vodíku výrazně širší jádro než čáry těžších prvků.

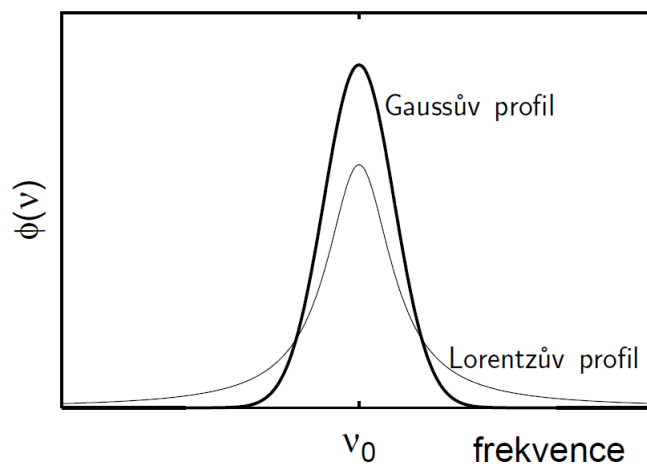
Většina čar je znatelně ovlivněna jak tepelným, tak srážkovým rozšířením. V takovém případě je jejich tvar dán konvolucí Gaussova a Lorentzova profilu. Tato konvoluce se nazývá Voigtova funkce (resp. Voigtův profil)

$$\phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} \frac{\Gamma}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left[-\frac{(\nu' - \nu_0)^2}{\Delta\nu_D^2}\right]}{(\nu - \nu')^2 + \left(\frac{\Gamma}{4\pi}\right)^2} d\nu' \quad (2.6)$$

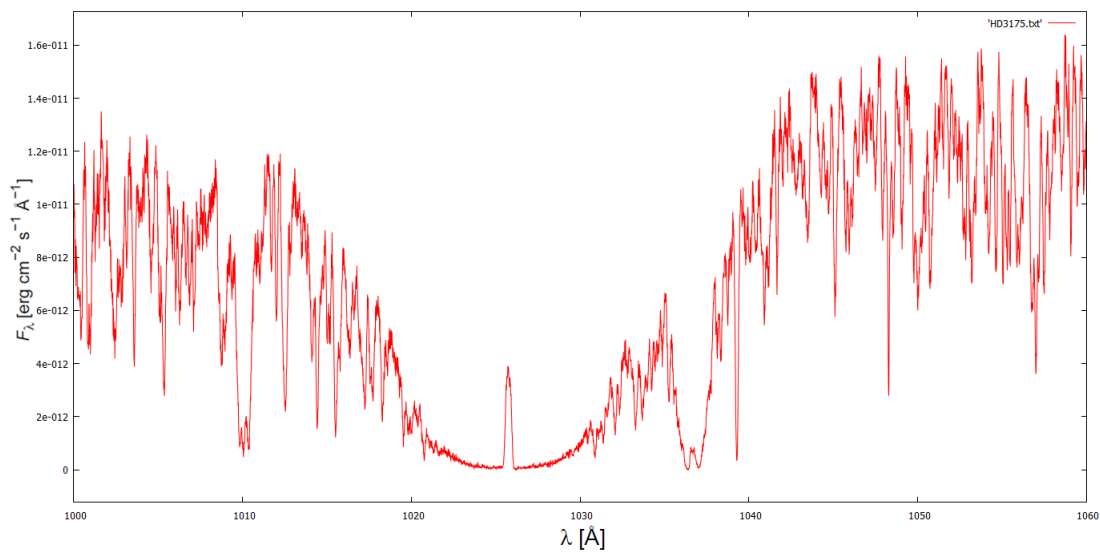
a její příklad můžeme vidět na obr. 2.6. Ve speciálních případech, kdy jeden typ rozšíření je zanedbatelný oproti druhému, tato funkce přechází v Gaussův, nebo Lorentzův profil.

Mikroturbulentní rozšíření

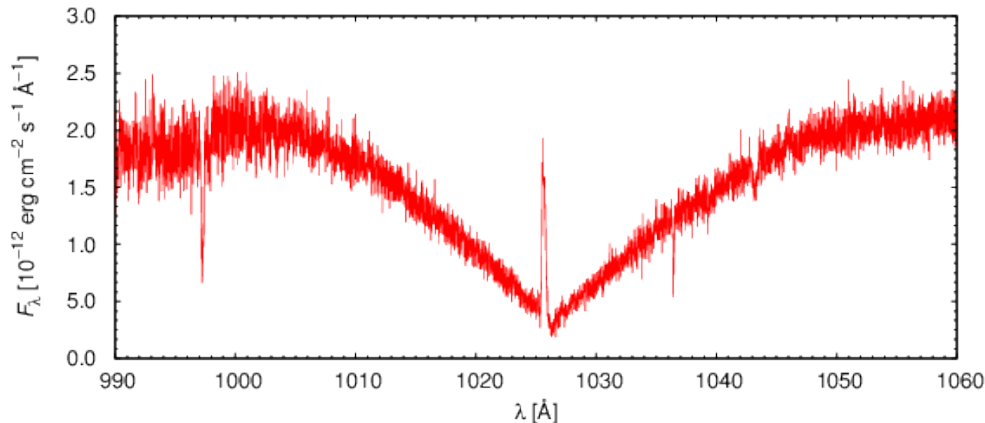
Podobně jako u tepelného rozšíření je příčinou mikroturbulentního rozšíření Dopplerův jev vyvolaný neuspořádaným pohybem látky. V tomto případě nejde o pohyb jednotlivých částic, ale o neuspořádaný pohyb celých shluků plynu v atmosféře hvězdy – tzv. mikroturbulenci. Příčiny mikroturbulence u horkých hvězd nejsou dodnes příliš jasné. Mikroturbulentní rozšíření má Gaussův profil stejně jako tepelné, jeho pološířka ale místo v_{tep} závisí na radiální projekci mikroturbulentní rychlosti v_{turbo} . Střední velikost v_{turbo} bývá několik $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Na rozdíl od rychlosti tepelného pohybu ale turbulentní rychlost nezávisí na hmotnosti částic, toto rozšíření je tedy pro čáry všech prvků stejně velké.



Obrázek 2.5: Srovnání Gaussova a Lorentzova profilu. Převzato z [1]



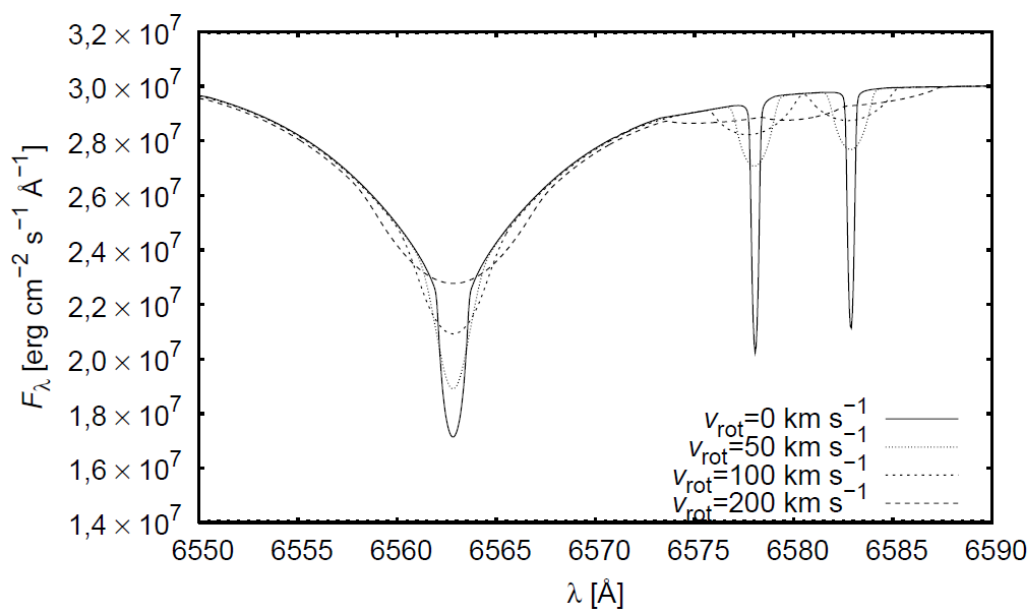
Obrázek 2.6: Příklad Voigtova profilu na čáře $Ly\beta$ ve spektru horké hvězdy hlavní posloupnosti HD 3175 (B4V). Je možné zde jasně rozeznat jádro čáry odpovídající Gaussově funkci a křídla čáry odpovídající Lorentzově funkci.



Obrázek 2.7: Příklad dominantního srážkového rozšíření na čáře $\text{Ly}\beta$ ve spektru bílého trpaslíka GD 50

Rotační rozšíření

Rotace hvězdy způsobuje, že jedna část atmosféry se k nám přibližuje a druhá se od nás vzdaluje. V důsledku Dopplerova jevu to opět vede k rozšíření čáry, které je úměrné součinu $v_{\text{rot}} \sin i$ (v_{rot} – velikost rychlosti rotace na rovníku, i – úhel mezi rotační osou hvězdy a spojnicí hvězda–pozorovatel, neboli *inklinace rotační osy*). Rotační rozšíření bývá u většiny čar u většiny hvězd dominantní, samotný rotační profil ale nestačí k přesnému fitu. Výsledný profil čáry je konvolucí rotačního profilu a profilu daného ostatními druhy rozšíření. Rotační profil je navíc poměrně složitý, protože oblasti povrchu hvězdy s konstantní radiální složkou rotační rychlosti zaujímají na disku hvězdy různou plochu a situaci ještě víc komplikuje okrajové ztemnění. Tento profil se nejlépe modeluje numerickou simulací. Na obr. 2.8 můžeme vidět vypočtený profil spektrální čáry pro různé rychlosti rotace hvězdy.



Obrázek 2.8: Vliv rotace na profil spektrálních čar, znázorněný na simulovaném spektru hvězdy hlavní posloupnosti s $T_{\text{ef}} = 22000 \text{ K}$. Převzato z [1]

Kapitola 3

Hvězdný vítr

V této kapitole jsme čerpali z [1].

3.1 Základní informace

Hvězdným větrem nazýváme rozpínající se obálku tvořenou materiálem vyvrženým z hvězdné atmosféry. Příčiny vzniku hvězdného větru jsou různé u různých typů hvězd. Např. u hvězd slunečního typu vzniká zejména při koronálních výtryscích hmoty a erupcích. U červených obrů a veleobrů vzniká především v důsledku absorpce záření prachovými zrny v atmosféře hvězdy.

U horkých hvězd, kterými se zabýváme, je hvězdná látka na povrchu urychlována absorpcí intenzivního záření hvězdy v některých čarách těžších prvků. V těchto čarách mají dané atomy mnohonásobně větší účinný průřez než na jakékoli jiné vlnové délce, a jsou tak urychlovány na rychlost mnohem vyšší, než je úniková rychlost z povrchu hvězdy v_{esc} . Takto urychlené atomy těžších prvků následně narážejí do okolních částic (zejména atomů vodíku a hélia, volných elektronů a jader) a předávají jim část své hybnosti.

Po vyvržení z hvězdy je hvězdný vítr nadále urychlován zářivou silou F_{rad} , která je větší než gravitační síla F_g . Rychlost hvězdného větru tedy se vzdáleností od hvězdy neustále stoupá a limitně se blíží terminální rychlosti v_{∞} . V Sobolevově aproximaci platí, že v_{∞} je přímo úměrná únikové rychlosti. Poměr terminální a únikové rychlosti $\frac{v_{\infty}}{v_{\text{esc}}}$ závisí na povrchové teplotě a mírně na metalicitě hvězdy. Dá se ukázat, že $\frac{v_{\infty}}{v_{\text{esc}}}$ je konstantní pro hvězdy třídy O.

Protože hvězdný vítr horkých hvězd je poháněn absorpcí záření hvězdy, je mnohem silnější než sluneční vítr a na rozdíl od slunečního je poměrně stálý

a přibližně sféricky symetrický, takže profily typu P Cyg jsou stabilní bez výrazné časové proměnnosti.

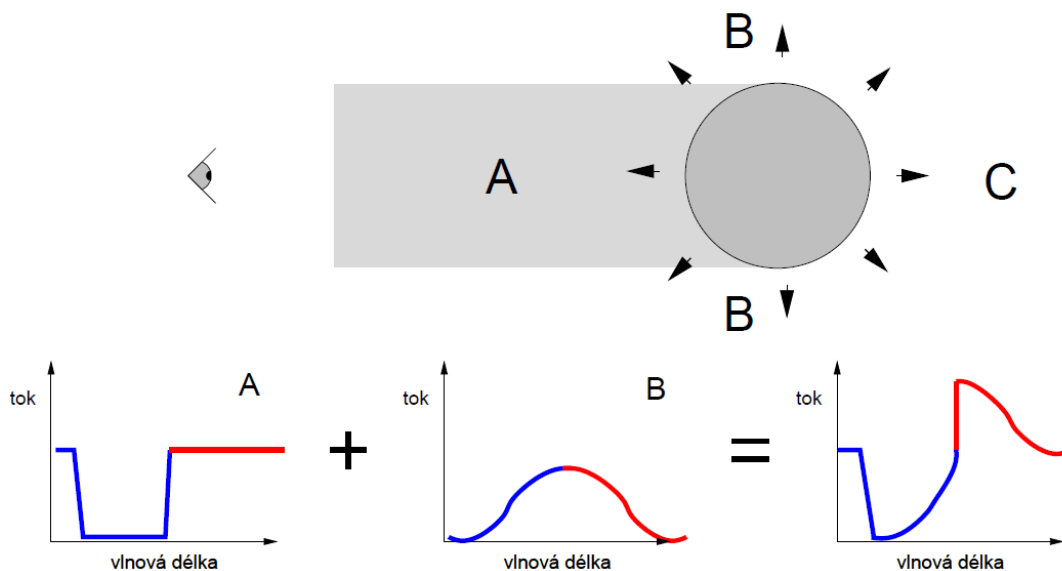
3.2 Vznik profilu typu P Cyg

Přítomnost silného hvězdného větru poznáme podle toho, že se ve spektru hvězdy nacházejí čáry s profilem typu P Cyg. Vznik tohoto profilu je názorně zobrazen na obrázku 3.1. Předpokládáme, že hvězdný vítr je po vyvržení z hvězdy nadále urychlován zářivou silou, jeho rychlost roste se vzdáleností od hvězdy a limitně se blíží terminální rychlosti v_∞ . Z našeho pohledu ho rozdělíme na 3 oblasti, označené A, B, C. Oblast C je zakrytá hvězdou, a nic z ní tedy nepozorujeme. Vítr z oblasti A je mezi námi a kotoučem hvězdy a pohybuje se přímo k nám. Čára, v níž absorbuje, zde tedy bude mít rozšířený absorpční profil o šířce odpovídající rozpětí modrého posuvu pro rychlosti přibližování od 0 do v_∞ . V oblasti B k nám přichází pouze záření, které vítr rozptýlil (absorpce a následným vyzářením). Zde tedy bude mít čára symetrický emisní profil, který má maximum pro $v_r = 0$ a pro $v_r = v_\infty$ klesá k nule v modrém i červeném křídle. Součtem těchto dvou částí vzniká typický profil typu P Cyg, který tvoří široká absorpce v modré části, na níž navazuje emise v červené části. Odečtením šířky absorpční části těchto profilů je možné zjistit hodnotu v_∞ . U horkých hvězd v_∞ běžně bývá stovky až tisíce $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.3 Analýza profilu typu P Cyg

3.3.1 Klasické (saturované) profily

Jak jsme psali v předchozím odstavci, požadovanou hodnotu v_∞ získáme odečtením šířky absorpční části profilu typu P Cyg. Situace na obrázku 3.1 vypadá jednoduše, ale reálné profily typu P Cyg nemají jasné ostré hrany. Ve hvězdném větru totiž dochází k turbulencím, které rozšiřují jednotlivé elementární příspěvky profilu, takže intenzita se mění plynule, viz obrázek 2.4. Terminální rychlosti tedy odpovídá vlnová délka, na níž se intenzita začne zvedat ode dna – tu budeme označovat λ_{term} . Vlnovou délku odpovídající Dopplerovu posuvu hvězdné atmosféry λ_{klid} z reálného profilu bohužel nelze vyčíst, takže za tuto hodnotu dosazujeme klidovou vlnovou délku dané spektrální čáry opravenou o radiální rychlost hvězdy. Šířka absorpční části je pak $\lambda_{\text{klid}} - \lambda_{\text{term}}$.



Obrázek 3.1: Vznik profilu typu P Cyg. Převzato z [1]

Velikost terminální rychlosti vyjádříme pomocí Dopplerova vztahu

$$v_{\infty} = c \cdot \frac{\lambda_{\text{klid}} - \lambda_{\text{term}}}{\lambda_0}, \quad (3.1)$$

kde λ_0 je klidová vlnová délka dané spektrální čáry.

Terminální rychlost zjištěná touto metodou může ale být u některých čar menší než reálná hodnota. Ve hvězdném větru totiž dochází k ionizaci látky, což může způsobit, že daný iont při určité rychlosti přestane být ve větru výrazně zastoupen a míra absorpce poklesne předčasně.

To také vede k možná nečekanému postupu – pokud měření různých spektrálních čar získáme různé hodnoty v_{∞} , jako výsledek bereme vždy tu nejvyšší z nich. A ani tento výsledek nemusí být definitivní.

3.3.2 Nesaturované profily

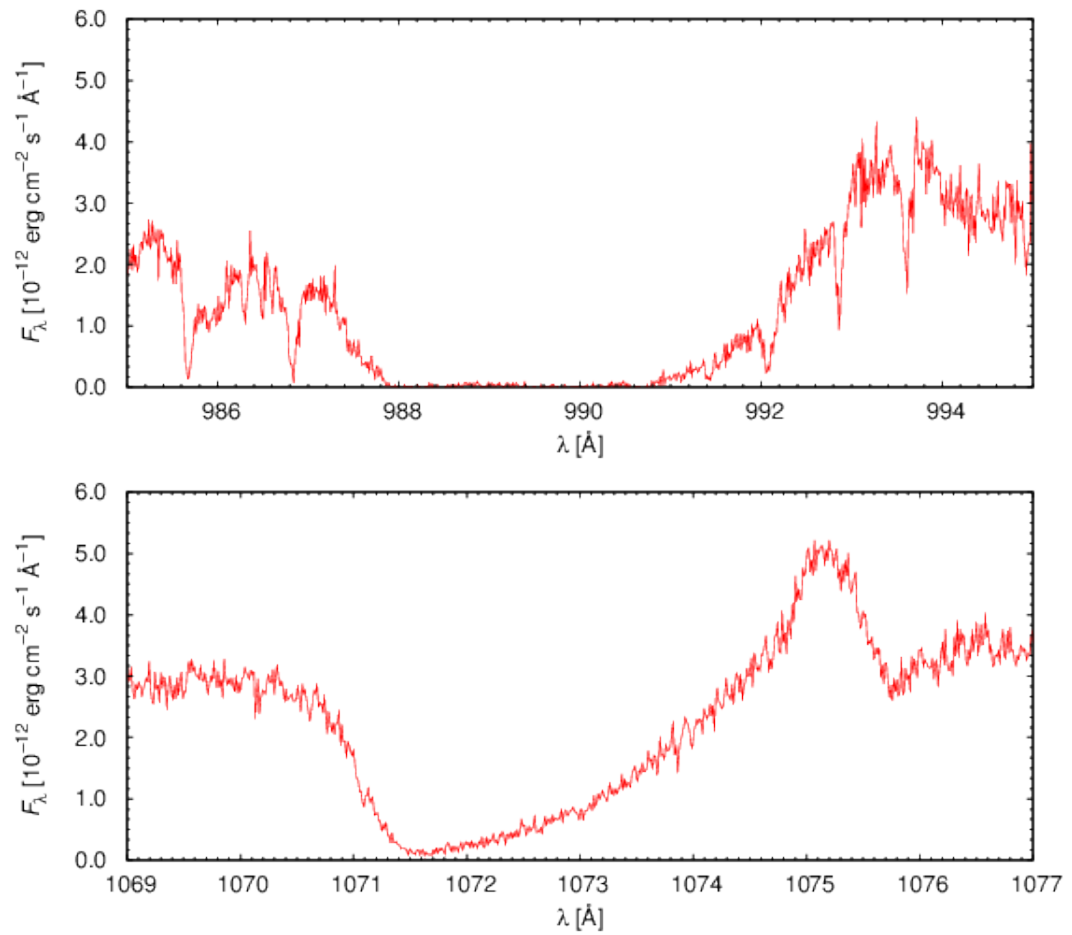
Popis z předchozího odstavce platí pro saturované profily typu P Cyg. Ve spektrech se ale také setkáváme s nesaturovanými profily, viz obrázek 3.2. Jedná se o čáry iontů, které se ve hvězdném větru nacházejí v nízké koncentraci, a z tohoto důvodu má jejich absorpční část odlišný průběh. S rostoucí vzdáleností od hvězdy (a rychlostí) se totiž vítr stává řidším, což vede k tomu, že míra

absorpce v těchto čarách se se vzdáleností plynule snižuje. Ve výsledku pak nesaturovaný profil typu P Cyg má jasné minimum intenzity na vlnové délce λ_{\min} , od kterého intenzita v modrém směru strmě stoupá k hodnotě kontinua, v červeném směru stoupá pozvolněji a následně přechází do emisní části.

Jediné, co můžeme vyčíst z nesaturovaného profilu typu P Cyg, je hodnota λ_{\min} . Ta by měla odpovídat rychlosti menší než v_{∞} , kterou tedy pomocí λ_{\min} přesně nezjistíme. Pomocí vztahu analogického k rovnici 3.1 však alespoň můžeme zjistit dolní limitu terminální rychlosti

$$v_{<\infty} = c \cdot \frac{\lambda_{\text{kld}} - \lambda_{\min}}{\lambda_0} . \quad (3.2)$$

Ve výsledku tedy platí, že pro danou hvězdu bude vždy třeba spočítat hodnoty v_{∞} a $v_{<\infty}$ z co nejvíce profilů typu P Cyg, bez ohledu na saturovanost, a vybrat z nich všech nejvyšší hodnotu. Hodnoty v_{∞} by však měly vycházet větší než hodnoty $v_{<\infty}$.



Obrázek 3.2: Příklad saturovaného a nesaturovaného profilu typu P Cyg ve spektru hvězdy SK -66°169 – čára N III 989,9 \AA (nahore) a S IV 1072,962 \AA (dole)

Kapitola 4

Zpracování dat

4.1 Získání dat

Pro veškeré úkoly naší práce jsme používali program SPLAT-VO, který je ke stažení na [E4].

Nejprve bylo potřeba zjistit, které hvězdy družice FUSE pozorovala. K tomu jsme použili databázi na stránkách Mikulski Archive for Space Telescopes [E2]. Zde jsme v sekci „FUSE Observations“ našli seznamy pozorovacích cílů družice, rozčleněné podle kategorií. Následně jsme pro stovky hvězd z kategorií WC, WN, MAIN SEQUENCE O, SUPERGIANT O, Oe, Of, WD O, B0-B2 V-IV, B3-B5 V-IV, B6-B9.5 V-IV, B0-B2 III-I, B3-B5 III-I, B6-B9.5 III-I, Be, Bp, sd B, WDB, WDA, ETA CARINAE, a PLANETARY NEBULA + CENTRAL STAR zadali jejich názvy uvedené v databázi do SPLATu (funkce „Search SSAP servers“), vybrali z nich spektra FUSE, ty jsme stáhli¹ a poté jsme pomocí Simbadu [E1] zjistili pro každou hvězdu její spektrální typ.

Seznam hvězd pozorovaných družicí FUSE, jejichž spektra jsme stáhli, je uveden v Dodatku.

4.2 Identifikace čar

Abychom mohli provést výpočet v_∞ , potřebujeme nejdřív identifikovat, o jakou čáru se jedná a jakou má (klidovou) vlnovou délku.

¹Stažená spektra jsou stále k dispozici. Pokud by je kdokoliv potřeboval, můžete mě kontaktovat.

Důležitým nástrojem pro tento úkol je databáze spektrálních čar na stránkách amerického NISTu (National Institute of Standards and Technology) [E3], kde najdeme přesně změřené hodnoty λ_0 pro tisíce čar (i když neuvádí úplně všechny čáry). U většiny hvězd ale NIST sám o sobě nestačí – v jejich atmosférách se nachází různé množství atomů různých prvků, každý prvek navíc má různé ionty a každý iont má úplně jiné čarové spektrum. Pro danou viditelnou čáru ve spektru tedy obvykle najdeme několik teoreticky přípustných kandidátů na identifikaci a vzhledem k šířce jednotlivých čar na první pohled nepoznáme, o kterou čáru kterého prvku se jedná. Pro spolehlivou identifikaci proto ještě potřebujeme zjistit, které čáry by ve spektru měly být patrné a které ne.

Ideální je vypočítat model hvězdné atmosféry a porovnat získané syntetické spektrum s naměřeným spektrem. Tento proces je však poměrně náročný a v našem případě jsme neměli čas nechat si vymodelovat atmosféru každé z desítek hvězd. Výhodnější bylo použít informace, které již někdo získal. Jako zdroj informací jsme tedy použili článek [4], v němž je sepsán atlas čar ve spektrech hvězd typu OB v naší galaxii právě podle pozorování družice FUSE. Tento atlas nám spolehlivě pomohl při identifikaci rozeznávaných profilů typu P Cyg i jiných výrazných prvků ve spektrech.

Situaci mírně komplikoval fakt, že mnohé výrazné čáry v atmosféře i ve větru jsou výsledkem blendy dvou či více čar. V takovém případě jsme při vyhodnocování profilu typu P Cyg jako λ_0 brali vždy čáru s nejkratší vlnovou délkou z daného multipletu. Je tedy potřeba mít na paměti, že je zde možnost systematické chyby, způsobené jak volbou čar, tak možností ionizace hvězdného větru, takže výsledky naší práce udávají spíše nejmenší možnou hodnotu v_∞ , a to i v případě saturovaných profilů.

4.3 Radiální rychlost hvězd

Dalším nezbytným úkolem bylo zjistit radiální rychlost každé ze zkoumaných hvězd, respektive posuv spektra $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}$ ($c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla) a také jeho nejistotu Δz , abychom hodnotu λ_0 mohli příslušně opravit a získat tak λ_{kld} .

Nejspolehlivějším zdrojem základních údajů o hvězdách je Simbad [E1], včetně z a Δz . Mnoho hvězd ale hodnotu z nemá přesně a spolehlivě změřenou, takže na Simbadu není uvedena. V takovém případě jsme alespoň mohli stanovit očekávané rozpětí z .

Hvězdy pozorované družicí FUSE se nacházely v Galaxii, ve Velkém i v Malém Magellanově mračnu. Obor možných velikostí z jsme tedy museli stanovit pro

každou z těchto tří galaxií zvlášť. Pro hvězdy v naší galaxii, u nichž hodnota z není známá, jsme zvolili rozpětí $z = 0 \pm 0,0003 = (0 \pm 300) \cdot 10^{-6}$ – předmětem naší práce byly mladé horké hvězdy populace I, které jsou objekty galaktického disku společně se Sluncem, takže jejich radiální rychlost by neměla být příliš vysoká.

V případě Velkého Magellanova mračna (LMC) jsme se řídili článkem [5], ve kterém jsou změřené radiální rychlosti 263 hmotných hvězd v LMC. Na základě tohoto článku jsme pro hvězdy v LMC zvolili rozpětí radiálních rychlostí $v_r = (260 \pm 70) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a příslušné rozpětí červených posuvů $z = 0,00087 \pm 0,00023 = (870 \pm 230) \cdot 10^{-6}$ – střední hodnota odpovídá radiální rychlosti LMC podle Simbadu a nejistota je dost velká, aby se do ní vešly všechny hvězdy z článku [5], které nejsou složkami prokázaných dvojhvězd ani tzv. runaway hvězdami. Zde tedy leží další prostor pro systematickou chybu. U 8 hvězd, kde jsme tento odhad použili, totiž těžko můžeme zjistit, zda se zrovna nejedná o výjimečný případ runaway hvězdy, jejíž radiální rychlost může být zcela mimo očekávaný rozsah.

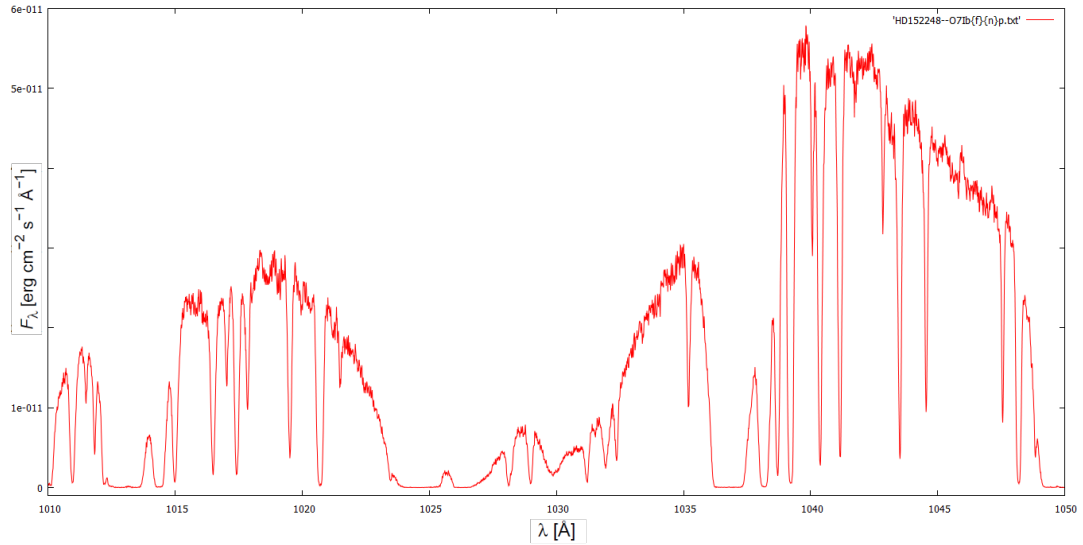
V případě Malého Magellanova mračna (SMC) jsme jako zdroj informací o radiálních rychlostech hvězd použili článek [6]. Rozpětí, do kterého spadají všechny hvězdy v článku kromě runaway hvězd a dvojhvězd a které by mělo s rezervou pokrýt očekávané hodnoty v SMC, jsme zvolili $v_r = (150 \pm 100) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ neboli $z = 0,00050 \pm 0,00033 = (500 \pm 330) \cdot 10^{-6}$. Tento odhad jsme použili pro 2 zkoumané hvězdy. Opět předpokládáme, že žádná z nich není runaway hvězdou.

Objevil se také jeden drobný, ale nečekaný problém. Simbad totiž u třech námi zkoumaných hvězd má sice uvedený odhad radiální rychlosti a z , ale místo nejistoty se zde píše „[~]“. V těchto případech jsme tedy nejistotu Δz museli odhadnout. Zvolili jsme tedy velké nejistoty. V tabulkách výsledků 4.1, 4.2 a 4.3 jsme tyto případy označili *.

4.4 Hledání absorpčních hran

Samotné hledání λ_{term} a λ_{min} se často ukázalo jako poměrně komplikované.

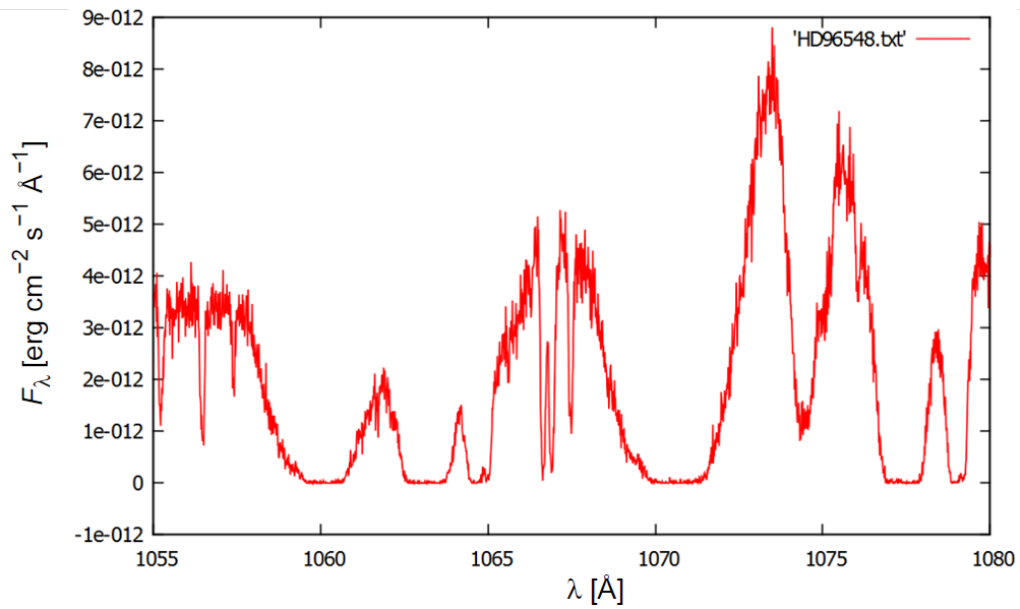
Nalezení λ_{min} u nesaturovaných profilů a její nejistoty $\Delta\lambda_{\text{min}}$ spočívalo ve stanovení intervalu, v němž se měřená spektrální hustota záření liší od nejnižší hodnoty méně, než je úroveň šumu. Protože úroveň šumu byla v nejlepších případech zhruba $5 \cdot 10^{-14} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$, $\Delta\lambda_{\text{min}}$ byla obvykle v řádu desetin Å.



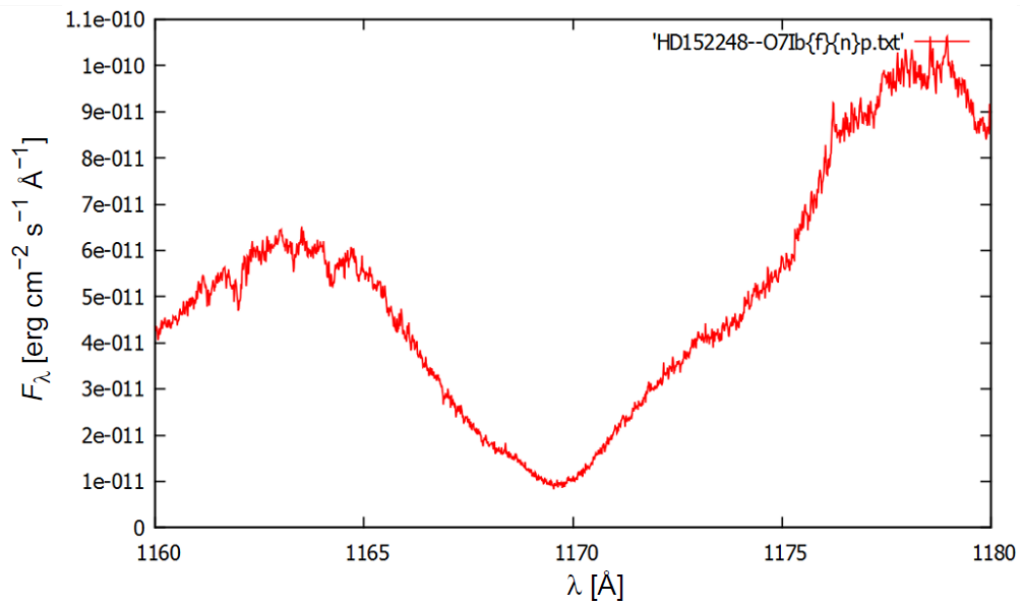
Obrázek 4.1: Dvojice rezonančních kyslíkových čar O VI 1032 Å, 1038 Å ve spektru hvězdy HD 152248.

Nalezení λ_{term} a její nejistoty $\Delta\lambda_{\text{term}}$ u saturovaných profilů bylo mírně složitější kvůli plynulosti absorpční hrany. I v takovém případě ale byla nejistota $\Delta\lambda_{\text{term}}$ pouze desetiny Å.

Nejzávažnějším problémem bylo, že mnoho čar má profil typu P Cyg narušen mezihvězdnou absorpcí, a to především širokými čarami mezihvězdného vodíku. To vedlo k tomu, že u mnoha čar jsme nebyli schopni jasně rozeznat minimum nebo absorpční hranu a nemohli jsme je zahrnout do výsledků.



Obrázek 4.2: Dvojice čar S IV 1063 Å, 1073 Å ve spektru hvězdy HD 96548.



Obrázek 4.3: Multiplet C III 1174 Å, tvořený 6 čarami, ve spektru hvězdy HD 152248.

4.5 Výpočet v_∞ a Δv_∞

Když jsme měli k dispozici hodnoty λ_0 , $\lambda_{\text{term/min}}$, $\Delta\lambda_{\text{term/min}}$, z a Δz pro danou čáru, použili jsme vzorce uvedené v sekci 3.3 k výpočtu v_∞ .

$$\lambda_{\text{klid}} = \lambda_0 \cdot (1 + z) \quad (4.1)$$

$$\Delta\lambda_{\text{klid}} = \lambda_0 \cdot \Delta z \quad (4.2)$$

$$v_\infty = c \cdot \frac{\lambda_{\text{klid}} - \lambda_{\text{term/min}}}{\lambda_0} \quad (4.3)$$

$$\Delta v_\infty = c \cdot \frac{\Delta\lambda_{\text{term/min}} + \Delta\lambda_{\text{klid}}}{\lambda_0} \quad (4.4)$$

V tabulkách 4.1, 4.2 a 4.3 je přehled zjištěných hodnot λ_0 , $\lambda_{\text{term/min}}$, $\Delta\lambda_{\text{term/min}}$, z a Δz a z nich vypočítaných hodnot λ_{klid} , $\Delta\lambda_{\text{klid}}$, v_∞ a Δv_∞ pro každou použitou čáru s profilem typu P Cyg u každé ze 33 zkoumaných hvězd. Hodnoty z a Δz jsme pro přehlednost vynásobili 10^6 . Výsledné hodnoty v_∞ jsme zvýraznili tučným písmem.

Hodnoty terminální rychlosti nám vyšly v rozmezí od $600 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ do více než $3000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledné hodnoty ale slouží spíše jako dolní limity terminální rychlosti hvězdného větru, buď kvůli nesaturovanému profilu, případně v důsledku možnosti ionizace větru vlivem rázových vln a v neposlední řadě kvůli nejistotě při identifikaci blendovaných čar. Očekávané hodnoty terminální rychlosti u horkých hvězd jsou stovky až tisíce $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$, naše výsledky tedy řádově odpovídají předpovědím. Například hvězda HD 152248 má podle našich výsledků terminální rychlost $(2280 \pm 30) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, podle článku (Prinja et al.) [7] $2420 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, u hvězdy HD 96917 je naše hodnota $(1560 \pm 230) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, [7] uvádí $2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ – naše hodnoty jsou tedy mírně nižší, což se ale dá očekávat vzhledem k výše zmíněným možnostem systematických chyb. U hvězdy HD 101298 je naše hodnota $(2660 \pm 90) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, [7] uvádí $2740 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ – naše hodnota tedy v rámci nejistoty odpovídá.

Tabulka 4.1: Výsledky měření terminální rychlosti, 1. část: Hvězdy v Galaxii

hvězda	sp. typ	$z \cdot 10^6$	prvek	sat.	λ_0 [Å]	$\lambda_{\text{term/min}}$ [Å]	λ_{klid} [Å]	$v_{\infty/<\infty}$ [km · s ⁻¹]
HD 152248	O7Ib:(f)(n)p	-145 ± 4	C III	ne	1174,93	1169,60 ± 0,25	1174,76 ± 0,05	1320 ± 60
			O VI	ano	1031,912	1023,9 ± 0,1	1031,762 ± 0,004	2280 ± 30
HD 96917	O8.5Ib(f)	7 ± 30	S IV	ne	1072,962	1067,4 ± 0,8	1072,97 ± 0,03	1560 ± 230
			C III	ne	1174,93	1170,0 ± 0,6	1174,94 ± 0,04	1260 ± 160
HD 74194	O8.5Ib(f)	9 ± 14	C III	ne	1174,93	1169,2 ± 0,2	1174,941 ± 0,016	1460 ± 60
HD 151804	O8Ia	-210 ± 13	S IV	ne	1062,656	1058,2 ± 0,4	1062,433 ± 0,014	1190 ± 120
			S IV	ne	1072,962	1068,8 ± 0,9	1072,737 ± 0,014	1100 ± 260
HD 163758	O5	-160 ± 100*	S VI	ne	933,376	927,7 ± 0,2	933,23 ± 0,09	1780 ± 90
			C III	ano	977,03	969,8 ± 0,15	976,87 ± 0,10	2170 ± 80
			N III	ano	989,79	982,7 ± 0,1	989,63 ± 0,10	2100 ± 60
			S IV	ne	1062,656	1056,1 ± 0,1	1062,49 ± 0,11	1800 ± 60
			S IV	ne	1072,962	1066,6 ± 0,4	1072,79 ± 0,11	1730 ± 140
			C III	ne	1174,93	1168,0 ± 0,3	1174,74 ± 0,12	1720 ± 110
λ Cep	O6.5I(n)fp	-250 ± 3	P V	ne	1117,98	1114,9 ± 0,7	1117,701 ± 0,003	750 ± 190
			P V	ne	1128,01	1125,6 ± 0,8	1127,73 ± 0,03	570 ± 210
9 Sge	O7.5Iabf	45 ± 8	S IV	ne	1072,962	1067,9 ± 0,2	1073,01 ± 0,01	1430 ± 60
			C III	ne	1174,93	1170,8 ± 0,4	1174,98 ± 0,01	1070 ± 100
HD 96548	WN8h	0 ± 300	S IV	ano	1062,656	1059,58 ± 0,05	1062,66 ± 0,32	870 ± 100
			S IV	ano	1072,962	1069,85 ± 0,06	1072,96 ± 0,32	870 ± 110
			P V	ne	1117,98	1116,1 ± 0,3	1117,98 ± 0,34	500 ± 200
			Si IV	ne	1122,49	1120,2 ± 0,2	1122,49 ± 0,34	610 ± 140
			P V	ne	1128,01	1125,9 ± 0,4	1128,01 ± 0,34	560 ± 200
NGC 40	PN [WC8]	-68 ± 11	P V	ne	1117,98	1114,7 ± 0,3	1117,904 ± 0,012	860 ± 80
			C III	ano	1174,93	1171,0 ± 0,2	1174,850 ± 0,013	980 ± 50
			N IV	ne	1188,01	1185,1 ± 0,2	1187,929 ± 0,013	710 ± 50
			N IV	ne	1168,6	1166,2 ± 0,3	1168,521 ± 0,013	600 ± 80
HD 151804	O8Ia	-210 ± 13	S IV	ne	1062,656	1058,16 ± 0,13	1062,433 ± 0,014	1210 ± 40
			S IV	ne	1072,962	1068,75 ± 0,25	1072,737 ± 0,014	1110 ± 70
HD 97253	O5III	3 ± 67	O VI	ano	1031,912	1022,5 ± 0,15	1031,92 ± 0,07	2740 ± 60
V2027 Cyg	PN (pre-WD)	0 ± 300	O VI	ne	1031,912	1020,6 ± 0,3	1031,91 ± 0,31	3290 ± 180
BD +60°2522	O6.5(f)(n)p	-87 ± 33	C III	ne	1174,93	1169,4 ± 0,4	1174,83 ± 0,04	1380 ± 110
			S IV	ne	1072,962	1067,2 ± 0,8	1072,87 ± 0,04	1580 ± 230
PN SwSt 1	PN	-27 ± 10	C III	ano	1174,93	1172,5 ± 0,4	1174,898 ± 0,012	610 ± 110
			S IV	ne	1072,962	1070,95 ± 0,15	1072,933 ± 0,11	550 ± 40
			S IV	ne	1062,656	1060,8 ± 0,2	1062,627 ± 0,011	520 ± 60
HD 101298	O6.5IV	3 ± 18	O VI	ano	1031,912	1022,5 ± 0,3	1031,65 ± 0,02	2660 ± 90
HD 303308	O4.5V((fc))	-3 ± 33	O VI	ano	1031,912	1021,6 ± 0,1	1031,909 ± 0,034	2990 ± 40
HD 64568	O5/6	257 ± 10	O VI	ano	1031,912	1022,08 ± 0,04	1032,117 ± 0,010	2930 ± 15

Tabulka 4.2: Výsledky měření terminální rychlosti, 2. část: Hvězdy v LMC

hvězda	sp. typ	$z \cdot 10^6$	prvek	sat.	λ_0 [Å]	$\lambda_{\text{term/min}}$ [Å]	λ_{klid} [Å]	$v_{\infty/<\infty}$ [km · s ⁻¹]
SK -66°169	O9.7Ia+	893 ± 100*	S IV	ne	1072,962	1071,6 ± 0,2	1073,92 ± 0,11	650 ± 90
			S IV	ne	1062,656	1061,35 ± 0,2	1063,60 ± 0,11	640 ± 90
			N III	ano	989,79	987,95 ± 0,1	990,67 ± 0,10	830 ± 60
SK -65°22	O6Iaf+	751 ± 100*	S IV	ne	1062,656	1059,25 ± 0,15	1063,45 ± 0,11	1190 ± 70
			S IV	ne	1072,962	1069,4 ± 0,2	1073,77 ± 0,11	1200 ± 100
			N III	ano	989,79	985,75 ± 0,25	990,53 ± 0,10	1450 ± 100
HD 37026	WC4	870 ± 230	S VI	ne	944,525	943 ± 0,25	945,35 ± 0,22	750 ± 150
SK -67°111	O6Iaf(n)pv	870 ± 230	N III	ano	989,79	985,2 ± 0,4	990,65 ± 0,23	1650 ± 190
SK -67°166	O4Ia	1000 ± 300	N III	ano	989,79	985,25 ± 0,05	990,78 ± 0,30	1670 ± 100
			P V	ne	1117,98	1113,5 ± 0,2	1119,10 ± 0,34	1500 ± 140
			S IV	ne	1072,962	1067,9 ± 0,3	1074,03 ± 0,32	1710 ± 170
SK -67°167	O4If+n	870 ± 230	S VI	ne	933,376	928,7 ± 0,1	934,19 ± 0,21	1760 ± 100
			N III	ne	989,79	985,4 ± 0,2	990,65 ± 0,23	1590 ± 130
SK -65°47	O4If	870 ± 230	O VI	ne	1037,613	1032,3 ± 0,5	1038,52 ± 0,24	1800 ± 210
			S VI	ne	933,376	928,7 ± 0,2	934,19 ± 0,21	1760 ± 130
SK -67°168	O8I(f)p	870 ± 230	N III	ano	989,79	985,5 ± 0,2	990,65 ± 0,23	1560 ± 130
Brey 24	WN6h	870 ± 230	S VI	ne	944,525	943,5 ± 0,5	945,35 ± 0,22	590 ± 230
			C III	ano	977,03	974,8 ± 0,1	977,88 ± 0,22	950 ± 100
			S IV	ano	1062,656	1060,45 ± 0,10	1063,58 ± 0,24	880 ± 100
			S IV	ano	1072,962	1070,7 ± 0,1	1073,90 ± 0,25	890 ± 100
			P V	ne	1117,98	1116,15 ± 0,15	1118,95 ± 0,26	750 ± 110
Brey 26	WN7	870 ± 230	P V	ne	1117,98	1114 ± 0,5	1118,95 ± 0,26	1330 ± 200
			P V	ne	1128,01	1124 ± 0,6	1128,99 ± 0,26	1330 ± 230
SK -67°32	WN4b	870 ± 230	S VI	ne	944,525	940,0 ± 0,8	944,80 ± 0,22	1520 ± 320

Tabulka 4.3: Výsledky měření terminální rychlosti, 3. část: Hvězdy v SMC

hvězda	sp. typ	$z \cdot 10^6$	prvek	sat.	λ_0 [Å]	$\lambda_{\text{term/min}}$ [Å]	λ_{klid} [Å]	$v_{\infty/<\infty}$ [km · s ⁻¹]
AV 321	O9Ib	287 ± 27	C III	ano	977,03	975,00 ± 0,05	977,310 ± 0,026	710 ± 20
			S IV	ne	1062,656	1061,35 ± 0,15	1062,96 ± 0,03	450 ± 50
			S IV	ne	1072,962	1071,5 ± 0,2	1073,27 ± 0,03	500 ± 60
SK 80	O7Iaf+	500 ± 330	N III	ano	989,79	986,1 ± 0,1	990,29 ± 0,33	1270 ± 130
			S IV	ne	1062,656	1059,1 ± 0,3	1063,19 ± 0,35	1150 ± 190
			S IV	ne	1072,962	1069,7 ± 0,7	1073,50 ± 0,36	1100 ± 300
AV 81	WN6	641 ± 193	S VI	ne	944,525	942,75 ± 0,75	945,13 ± 0,18	760 ± 300
			P V	ne	1117,98	1115,0 ± 0,25	1118,70 ± 0,22	990 ± 120
			P V	ne	1128,01	1125,0 ± 0,2	1128,73 ± 0,22	990 ± 110
SK 82	B1Ia	594 ± 30	C III	ne	977,03	973,7 ± 1,0	977,61 ± 0,03	1200 ± 320
AV 435	O3V((f))	500 ± 330	O VI	ano	1031,912	1025,4 ± 1	1032,43 ± 0,34	2040 ± 390

Kapitola 5

Závěr

Předmětem naší práce bylo nalezení a analýza profilů typu P Cyg ve spektrech pořizovaných družicí FUSE. Cílem bylo určit terminální rychlost hvězdného větru v_∞ u vybraných hvězd horkých spektrálních tříd, nacházejících se v naší galaxii a v Magellanových mračnech.

Spektra jsme stáhli a prohlíželi v programu SPLAT-VO. Vlnovou délku absorpčních hran jsme určovali vizuální analýzou a podle toho zvolili její nejistotu. K identifikaci čar jsme použili článek [4]. Radiální rychlost hvězd (a nejistotu) jsme v některých případech zjistili ze Simbadu, v jiných případech na Simbadu uvedena nebyla, takže jsme ji museli kvalifikovaně odhadnout podle rozložení radiálních rychlostí hvězd v příslušné galaxii a zvolit podle toho nejistotu. Na základě těchto veličin jsme vypočítali terminální rychlost hvězdného větru pro každou ze zkoumaných spektrálních čar.

Celkem jsme zkoumali 33 hvězd různých (horkých) typů, u nichž jsme našli profily typu P Cyg. Jsou mezi nimi veleobří a obří, hvězdy hlavní posloupnosti, Wolfovy-Rayetovy hvězdy, centrální hvězdy planetárních mlhovin, jeden podobr a tři hvězdy bez určené luminozitivní třídy. Výsledky jsme vynesli do tří tabulek, rozdělených podle galaxií. Tyto výsledky poměrně dobře odpovídají literatuře.

Detailnější studium profilů typu P Cyg ve spektrech horkých hvězd by nepochybně vyžadovalo fitování profilů jednotlivých čar a porovnání s modelovými spektry hvězdných atmosfér.

V Dodatku uvádíme seznam hvězd, pro které jsme stáhli jejich FUSE spektra. Stažená spektra máme stále k dispozici, a je zde tedy možnost jejich dodatečného využití pro další studium.

Dodatek: Stažená spektra

Tabulka 5.1: Přehled hvězd, jejichž spektra pořizena družicí FUSE jsme stáhli, 1. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
η Carinae	O5.5III-O7I	HD 199579	O6.5V((f))z	HD 165246	O8V(n)
NGC 346 W 3	O2III(f)	PGMW 3070	O6V	HD 237019	O8V
BI 237	O2V(f)	SK-66°18	O6V((f))	HD 46149	O8.5V((f))
BI 253	O2V(f)	9 Sge	O7.5Iabf	HD 97848	O8V
L72 LH 64-16	O3III	AV 83	O7Iaf+	BI 42	O8V
SK -67°69	O3III	HD 152248	O7Ib(f)(n)p	SK-67°191	O8V
AV 435	O3V(f)	HD 166734	O7.5Iab	19 Cep	O9Ib
HD 64568	O3V	SK 80	O7Iaf+	AV 321	O9.5Ib
SK -70°69	O3V(f)	AV 207	O7Vz((f))	AV 327	O9.7I
HD 14947	O4.5If	AV 440	O7.5III((f))	AV 372	O9Iabw
SK -65°47	O4If	BD +60°586	O7.5V	AV 456	O9.7Ib
SK -67°166	O4Ia	BI 208	O7V	BI 170	O9.5Ib
SK -67°167	O4If+n	HD 152590	O7.5Vz	HD 61347	O9Ib
HD093250	O4IIIc	HD 152623	O7V(n)((f))z	HD 105056	ON9.7Ia
HD15558	O4.5III	HD 165052	O7Vz+O7.5Vz	HD 149038	O9.7Iab
NGC 346 NMC 26	O4III(n)(f)	HD 217086	O7V((f))	HD 152249	O9Ib(f)
AV 177	O4V((f))	HD 53975	O7.5Vz	HD 152424	OC9.2Ia
HD 96715	O4V((f))	HD 54662	O7V	HD 154368	O9.2Iab
HD 15629	O4.5V	HD 91824	O7V((f))z	HD 18409	O9.7Ib
HD 303308	O4.5V((fc))	AV 69	OC7.5III((f))	HD 210809	O9Iab
HD 46223	O4V((f))	AV 95	O7III((f))	HD 218915	O9.2Iab
NGC 346 ELS 7	O4V((f))	BI 12	O7.5III	HD 76968	O9.2Ib
HD 5005A	O4V((fc))	BI 229	O7III	SK-65°21	O9.7Iab
SK -70°60	O4V((f))	BI 272	O7III	SK-66°169	O9.7Ia+
HD 93843	O5III(fc)	HD 34656	O7.5II(f)	SK-68°03	O9I
HD 97253	O5III(f)	HD 186980	O7.5III	SK-68°135	ON9.7Ia+
AV 377	O5V	HV 2241	O6-8V-III((f))	SK 101	O9.5I
AV 388	O5V	PGMW 3168	O7II(f)	SK 155	O9Ib
HD 14434	O5.5Vnn((f))p	HD 74194	O8.5Ib(f)	SK 35	O9.5Ib
HD 93204	O5.5V((f))	HD 96917	O8.5Ib(f)	AV 120	O9.5III
AV 15	O6.5I(f)	HD 151804	O8Iaf	AV 170	O9.7III
AV 26	O6I(f)	SK-67°168	O8I(f)p	AV 238	O9.5III
HD 163758	O6.5Iaf-WR	X LMC X-4	O8III	AV 334	O9.5III
λ Cep	O6.5I(n)fp	AV 135	O8III	AV 378	O9.5III
SK-65°22	O6Iaf+	AV 469	O8.5II((f))	AV 423	O9.5II(n)
SK-67°111	O6Iafnpv	AV 47	O8III	AV 6	O9III
SK-69°104	O6Ibf	BI 173	O8III	HD 13745	O9.7II
SK-70°115	O6.5Iaf	CC Cas	O8.5III(n)((f))	HD 15137	O9.5II-III
PGMW 3053	O6II(f+)	HD 13268	ON8.5III	HD 15642	O9.5II-III
HD 152233	O6II	HD 116852	O8.5II-III	HD 69106	O9.7II
AV 61	O6III((f))	HD 151003	O8.5III	HD 89137	ON9.7II
HD 152723	O6.5III	HD 153426	O8.5III	HD 90087	O9.2III
HD 175876	O6.5III(n)(f)	HD 207198	O8.5II	HD 91651	ON9.5III
CPD -59°2600	O6V((f))	SK-67°101	O8II((f))	HD 112784	O9.5III
HD 93130	O6.5III(f)	SK-69°257	O8.5II((f))	HD 116796	O9II
HD 93160	O7III((f))	AV 267	O7.5-8V	HD 152405	O9.7II
SK -66°100	O6IIc	AV 461	O8V+neb	HD 156292	O9.7III
AV 243	O6V	CPD -59°2627	O9.5V	HD 189957	O9.7III
AV 446	O6.5Vz	EM Car	O8V	HD 191423	ON9III n
HD 42088	O6V((f))z	HD 41161	O8Vn	HD 52266	O9.5III n
HD 63005	O5/6	HD 66788	O8/9(Ib)	HD 73882	O8.5IV
HD 101436	O6.5V((f))	HD 101413	O8V	HD 90087	O9.2III
HD 124314	O6V(n)((f))	HD 14633	ON8V	SK-71°08	O9II

Tabulka 5.2: Přehled hvězd, jejichž spektra pořizena družicí FUSE jsme stáhli, 2. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
X Per	O9.5III	163 Car	B2V	SK -67°266	O8Iafpe
AV 451	O9.5V	HD 13900	B1IV	SK -68°140	B0.7Ib-Iab
BI 196	O9V	HD 153262	B2Vne	SK -69°297-	OBe
CPD -74°1569	O9.5V	HD 154154	B1Vnne	SK -69°279	OB
HD 12323	ON9.2V	HD 15570	O4If+	SK 197	O8-9Ve
HD 93521	O9Vp	HD 157857	O6.5II	tet Cir	B4Vnpe
HD 326329	O9.7V	HD 161807	O9.7III	TY CrA	B9e
HD 34078	O9.5V	HD 163296	A1Vep	VX Cas	A0Vep
HD 46202	O9V((f))	HD 164816	O9.5V+B0V	XY Per	A2II+B6
HD 100340	B0	HD 164906	B0Ve	AV 81	WN6
AV 14	O3-4V	HD 16691	O4If+	Brey 24	WN6h
AV 16	B1Ie	HD 175754	O8II	Brey 26	WN7
AV 208	O7V	HD 190864	O6.5III(f)	Brey 64	WN9ha
AV 220	O6.5fp	HD 19243	B1Ve	HD 104994	WN3p-w
AV 255	B0Ie+O9V	HD 192987	B6III	HD 117688	WN7
AV 261	B2Ibe	HD 193514	O7Ib	HD 151932	WN7h
BD +40°4124	B2Ve	HD 193682	O5e	HD 152408	WN9ha
BD +41°3731	B3n	HD 203374	B0IVpe	HD 187282	WN4(h)-w
BD +56°D484	B1IIIe	HD 206773	B0Vpe	HD 191765	WN6-s
BD +56°493	B1Vpe	HD 212044	B1Vpnne	HD 192163	WN6(h)-s
BD +56°563	B1IIIe	HD 212791	B8	HD 193077	WN5-w+B?
BD +56°566	B1Ve	HD 216044	B0III-IV	HD 211564	WN3(h)-w
BD +56°573	B2III-IVe	HD 21641	B8.5V	CQ Cep	WN6+O9II-Ib
BD +56°582	B1III	HD 250550	B9e	HD 269445	Ofpe/WN9
BD +60°2522	O6.5(f)(n)p	HD 259431	B6ep	HD 32109	WN4b
BD +61°154	B8eH	HD 269006	B2.5Iep	HD 33133	WN7h
BD +65°1637	B3IV-Vne	HD 269128	B2.5Ie	HD 4004	WN4-s
BI 13	O6.5V	HD 269217	B5-6Ia[e]	HD 45166	WRv+...
BI 130	O8.5V	HD 269810	O3III(f)	HD 86161	WN8h
c Oph	A0V	HD 34664	B0-0.5I[e]	HD 93162	O2.5If*/WN6+OB
CPD -59°4559	B2IVne	HD 31293	A0Ve	HD 96548	WN8h
CPD -60°3126	B1.5Vn	HD 36408	B7II	HD 269582	WN10h
CPD -60°3157	Be	HD 36665	B1	SK -66°40	WN10
f Car	B3Vne	HD 37318	B1Vne	SK -67°184	WN4b+O8
HD 39680	O6V	HD 37903	B1.5V	SK -67°161	WN4b
HD 45314	O9pe	HD 37974	B0.5e	SK -67°32	WN4b
HD 65079	B2V(n)(e)	HD 38489	B[e]	SK -68°57	WN4b+O5
HD 100199	B0IIIne	HD 45677	B2IV-V[e]	SK -69°220	Ofpe/WN9
HD 100453	A9Ve	HD 46056	O8V	SK -69°79	WN9/10+M2Ia
HD 100546	B9Vne	HD 46150	O5V((f))	SK -69°95	WN+BI
HD 100943	B1Iab-Ib	HD 53367	B0IV-Ve	SK -69°246	WN5/6h+WN6/7h
HD 101412	B9.5V	HD 67888	B4IIIpe	WR 2	WN2-w
HD 102567	B0.2IIIe	HD 72754	B2Iapshe	Brey 22	WC4+O5-6III-V+O
HD 104237	A4IVeH	HD 73658	B1Ib-II	HD 115473	WC5
HD 110432	B0.5IVpe	HD 76534	B2Vne	HD 119078	WC7/8
HD 114441	B2Vne	HD 85567	B2Ve	HD 152270	WC
HD 114800	B2IVne	HD 91597	B1IIIne	HD 156385	WC
HD 116781	B0IIIne	HD 93403	O5.5III	HD 164270	WC
HD 117111	B2Vne	HD 95881	A1-A2III-IV	HD 16523	WC6
HD 120678	O9.5V	JL 212	B2eV	HD 165763	WC
HD 124367	B4Vne	NGC 330 ROB B12	B2III	HD 192103	WC8+OB
HD 12882	B6Ia	NX Pup	A1e-F2IIIe	HD 192641	WC7+O9

Tabulka 5.3: Přehled hvězd, jejichž spektra pořizena družicí FUSE jsme stáhli,
3. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
HD 193793	WC7p+O5	HD 109399	B0.5III	HD 235783	B1Ib
HD 32402	WC	HD 113708	B0.2III	HD 268809	B1Ia
HD 36521	WC4+O	HD 14476	B0.5III	HD 332407	B1Ibp
HD 37026	WC	HD 149881	B0.5III	HD 47240	B1Ib
HD 37680	WC	HD 168080	B1Ib/II	LS 4825	B1Ib
HD 92809	WC6	HD 172140	B1II	NGC 2004 ROB B30	B1.5Ib
HD 97152	WC7+O7V	HD 177989	B2II	PGMW 3157	B1Ia
PN A66 78	PN [WC5]	HD 186994	B0III	SK -67°14	B1.5Ia
SK -67°104	(WC)	HD 187459	B0.5II	SK -67°169	B1Ia
SK -68°15	WC	HD 195455	B1/2III	SK -67°2	B1.5Ia
SK -71°38	WC4+O9	HD 218323	B5	SK -68°171	B1Ia
SK -71°26	WC	HD 219188	B0.5III	SK -69°237	B1Ia
HD 5980	WN4+O7I	HD 224151	B0.5II-III	SK -69°228	BC1.5Ia
HD 38029	WC+O6-6.5III	HD 25443	B0.5III	SK -70°120	B1.5Ia
SK 188	WO4+O4V	HD 25638	B0III+...	SK 191	B1.5Ia
SMC AB 7	WN4+O6I(f)	AV 104	B0.5Ia	SK 82	B1Ia
AV 215	BN0Ia	AH Cep	B0.5V+...	AV 175	B1IIw
AV 488	B0Ia	AV 304	B0.5V	BD +56°574	B1III
BD +56 501	B0.5I	BD +35°4258	B0.5Vn	CPD -59°4552	B1III
HD 99857	B1Ib	BI 184	B0.5V	HD 12740	B1.5II
HD 100276	B0.5Ib	CPD -57°3506	B0.5V	HD 30677	B1II-III((n))
HD 122879	B0Ia	HD 3827	B0.7V((n))	HD 74711	B2III
HD 152234	B0.5Ia	HD 47360	B1III	HD 75309	B1Ibp
HD 152235	B0.5Ia	HD 185418	B0.5V	HD 88115	B1.5IIIn
HD 152245	B0Ib	HD 195965	B0V	HD 101008	B1II-III
HD 156359	B0Ia-Iab	HD 198781	B0.5V	HD 102475	B1II
HD 158661	B0II	HD 204827	O9.5IV	HD 1383	B1II
HD 167402	O9.5/B0Ib/II	HD 207308	B0.5V	HD 14053	B1II
HD 178487	O9.5/B0Ib/II	HD 239729	B0V	HD 169673	B1Ib
HD 179407	B0(II)	HD 97471	B0V	HD 173502	B1/2Ib
HD 201638	B0.5Ib	HV 1620	B0.5(IV)e?	HD 192303	B1III
HD 103779	B0/1II	LHA 115-S11	B0V	HD 215733	B1II
HD 224868	B0Ib	NGC 346 MPG 637	B0V	HD 216438	B1II
HD 91969	B0Ib	AV 242	B1Ia	HD 225757	B1IIIIn
HD 92850	B0Ia	AV 266	B1I	HD 232522	B1II
J Pup	B0.5Ib	AV 476	B1	HD 47088	B1III
PGMW 3271	B0.7Ib	AV 483	B1.5Ia	SV Cen	B1IIIIn
SK -66°185	B0Iab	AV 96	B1.5Ia	BD +52°3210	B1V
SK -67°106	B0I	BD +48°3437	B1Iab	BD +56°524	B1Vn
SK -67°107	B0I	HD 92702	B1Iab	BD +56°571	B1V
SK -67°23	B0.5Ie	HD 93827	B1Ibn	BD +61°2365	B5
SK -67°28	B0.7Ia	HD 94493	B0.5Iab/b	BR Mic	B2II
SK -67°46	B1.5I	HD 111934	B1.5Ib	CPD -59°2632	B1V
SK -67°76	B0Ia	HD 119608	B1Ib	CPD -69°1743	B1Vn
SK -68°41	B0.5Ia	HD 13841	B1.5Ib	CX Cru	B1V
SK -68°52	B0Ia(e?)	HD 13854	B1Iab	HD 35215	B1V
SK -69°59	B0Ia	HD 14052	B1Ib	HD 118969	B1/2(III)
SK -70°85	B0I	HD 148422	B1Ia	HD 121800	B1.5V
AV 216	B0IIw	HD 151805	B1Ib	HD 121968	B2II
CPD -72°1184	B0III	HD 158243	B1I(ab)	HD 13621	B1V
HD 113012	B0III	HD 160993	B1Iab	HD 14092	B1V
AV 506	B0.5III	HD 163522	B1Ia	HD 161056	B3II/III
HD 60196	B0.5III	HD 167287	B1Iab	HD 165955	B1Vnp
HD 99890	B0IIIn	HD 191877	B1Ib	HD 18352	B1V

Tabulka 5.4: Přehled hvězd, jejichž spektra pořízená družicí FUSE jsme stáhli, 4. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
HD 197512	B1V	62 Tau	B3V	η Cha	B8V
HD 202347	B1V	BD +38°2182	B3V	HD 148594	B8Vnn
HD 208440	B1V	HD 52463	B3V	HD 201908	B8Vn
HD 208905	B1Vp	HD 111641	B3V	HD 205879	B8V
LS 277	B1V	HD 133699	B3V	HD 21279	B8.5V
Tr 16 64	B1.5V:b	HD 156110	B3Vn	HD 21551	B8V
Tr 16 65	B1.5V	HD 30675	B3V	HD 21672	B8V
NGC 2264 LBM 4239	B1V	HD 45057	B3V	HD 22136	B8V
10 Per	B2Ia	HD 47732	B3Vnn...	HD 35899	B8V
62 Ori	B2Ia	HD 47777	B3V	HD 36312	B9IV
9 Cep	B2Ib	HD 51013	B3V	HD 36541	B8/9III
AV 187	B2.5Ia	HD 62542	B3V	HD 37235	B8IV/V
AV 210	B2Ia	HD 72537	B3V	HD 92536	B8V
AV 264	B1.5-2Iab	HD 74662	B3V	κ Pic	B8/9V
AV 374	B2Ib	HD 131491	B4III	HD 167659	O7II-III(f)
AV 393	B2Ia	HD 72179	B3/5II/III	HD 199478	B8Ia
AV 472	B2Ia	HD 94144	B4III	HD 1279	B8III
AV 18	B2.5Ia	HD 3175	B4V	4 Lac	B9Iab
HD 93840	B1/2Iab/b	5 Per	B5Ia	CS Cam	B9Ia
HD 111990	B1/2Ib	AV 22	B5Ia	α Peg	B9III
HD 14443	BC2Ib	GX Vel	B5Ia	ν Pav	B9III
HD 225094	B2.9Iab	HD 268939	B5Ia	34 Psc	B9Vn
HD 92964	B2.5Ia	DI Her	B5III	42 Cas	B9V
SK -66°01	B2Ia	HD 18100	B5II/III	HD 176386	B9V
SK -68°26	BC2Ia	HD 187311	B5II	HD 20863	B9V
SK 13	B2.5Ia	HD 30122	B5III	HD 2884	B8/A0
SK 145	B2.5Ia	HD 71634	B5III	HD 32039	B9Vn
AV 119	B2II	HD72089	B5II/III	HD 32040	B9Vn
HD 133738	B1-B2IVne	23 Cyg	B5V	HD 36628	B9IV/V
HD 91452	B0III	31 Tau	B5V	HD 37373	B8(V)
BD +32°270	B2V	BD +31°643	B5V	HD 4775	B9.5V+...
BD +56°508	B2V	HD 108927	B5V	HD 97300	B9V
HD 42401	B2V	HD 36487	B6IV	χ Tau	B9Vnn
HD 111195	B2V	HD 36981	B7III/IV	λ Aql	B9Vn
HD 134411	B2Vn	HD 37525	B5V	σ Her	B9V
HD 170740	B2/3II	HD 37526	B5V	ζ CrA	B9.5Vann
HD 172028	B3II/III	HD 38087	B3II	HD 201345	ON9.5IV
HD 192273	B2V	HD 80781	B3V	HD 198846	O9.5IV+O9.5IV
HD 233622	B2V	HD 92087	B4/6(V)	HD 166546	O9.5IV
HD 315021	B2V	HD 47382	B6Ib	HD 168941	O9.5IV
HD 47961	B2V	HD 261878	B6V	HD 101190	O6IV
JL 212	B2V	HD 37332	B6V	HD 101298	O6.5IV
3 Gem	B3Ia	HD 92288	B6V	NY Cep	B0IV
9 Gem	B3Iab	I Vel	B6V	HD 93028	O9IV
AV 362	B3Ia	HD 205805	B7III	HD 60369	O9IV
HD 14134	B3Ia	HD 210121	B7II	HD 101205	B7/8Ib
HD 14143	B3I	HD 74604	B7III	HD 102065	B9IV
κ Cru	B2/3Ia	HD 26670	B7V	HD 210121	B7II
SK -67°199	B3Ia	HD 36760	B8V	HD 107667	B1IV
HD 119069	B3II	HD 36935	B8V	HD 116538	B2IVn
HD 235874	B3III	HD 37641	B8V	BD +53°2820	B0IVn
NGC 330 ROB B30	B3II	HD 62714	B7Vp...	HD 14250	B1IV
20 Aql	B2/3II	HD 90177	B7Ve	HD 118571	B0.5IVn

Tabulka 5.5: Přehled hvězd, jejichž spektra pořízená družicí FUSE jsme stáhli, 5. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
BD +28°4211	sdO	NGC 188 2091	sdB	LB 2	DAO.7
BD +39°3226	sdOp	PG 0101+039	sdB	PY Vul	DA4.0
WD 1148-230	sdO	PG 0749+658	sd:B	SIRIUS B	DA1.9
GJ 398.2	sdO	PG 0822+645	sd:B	TK 2	DA.6
HS 0659+5734	sdO	PG 0823+465	sd:B	WD 0004+330	DA1.0
HS 1753+6911	sdO	PG 0839+399	sd:B	WD 0005+511	DA
JL 9	sdO	PG 1032+406	sdB	WD 1202+608	DAO.9
KPD 2055+3111	sdO	PG 1043+760	sdB	WD 1211+332	DA
LSE 125	PN/sdO	PG 1051+501	sdB	WD 1234+481	DA.9
LSE 153	sd:O	PG 1206+165	sdB+G9V	WD 1631+781	DA1.2
LSE 21	sdO	PG 1224+672	sdB	WD 2211-495	DA.7
LSE 234	sdO	PG 1255+547	sdB	Wolf 1346	DA2.4
LSE 263	sdO	PG 1338+481	sdB	GD 190	DBs
LSE 44	sd:O	PG 1340+607	sdB	GD 323	DBp
HD 350426	sdO	PG 1449+653	sdB+G5	PG 0112+104	DB
LS IV -12 1	sdO	PG 1511+624	sdB	PG 0749+658	sd:B
LS IV +10 9	sdO	PG 1519+640	sdB	WD 0002+729	DB4
PN HbDs 1	sdO	PG 1524+611	sdB	WD 0109-264	sdB
NGC 6397 ROB 162	sdO	PG 1538+401	sdB	WD 0308-566	sdB
PG 0242+132	sd:O	PG 1544+488	sdB+sdB	WD 0435+410	DBZ
PG 0823+499	sd:O	PG 1559+533	sdB	WD 1708-871	DBn
PG 0833+699	sd:O	PG 1605+072	sdB	WD 1822+410	DBA3
PG 1230+068	sd:O	PG 1610+519	sdB	WD 2130-047	DB
PG 1613+426	sd:O	PG 1610+529	sdB	HE 0504-2408	DO
PG 2158+082	sd:O	PG 1618+563B	sdB	HS 0713+3958	DO
PG 2219+094	sd:O	PG 1619+522	sdB	HS 0727+6003	DO
TD1 32709	sdOp	PG 1626+471	sdB	HS 2324+3944	DO
TON 102	sdO	PG 1627+017	sdB	PG 0038+199	DO
WD 2317-05	sdO8VIII-He5	PG1648+536	sdB	PG 1144+005	PG1159
WPS 46	sd:O	PG 1710+490	sdB	PG 1424+535	PG1159
AA Dor	sdB+dM	PG 1716+426	sdB	PG 1707+427	PG1159
CD -38°222	sdB8	PG 1738+505	sdB	V 2027 Cyg	PN/pre-WD
CPD -64°481	sdB	PG 1743+477	sdB	WD 0109+111	DO
FEIGE 87	sdB+G4V	PG 2229+099	sdB	WD 0111+002	DO
FEIGE 91	sdB	PG 2317+046	sdB	WD 0501-289	DO
GD 605	sdO4-He2	PHL 457	sdOB	WD 1034+001	DO
GSC 04544-02658	sdB	29Dra	K0+DA1.5	GW Vir	DO
JL 87	sdB	AY Cet	G8/K0IV	WD 1634-573	DOZ1
KL UMa	sdB	BD +08°102	K2V+DA2.1	WD 1501+664	DZ...
KPD 0025+5402	sdB	BD +16°516	K2V+DA	PN A66 30	PN/[WC5]
KPD 1930+2752	sdB	CD -38°10980	DA2	BD +30°3639	PN/[WC9]
KPD 1946+4340	sdB	G 191-B2B	DA.8	PN Cn 3-1	PN/07Ib(f)
KPD 2109+4401	sdB	GD 153	DA1.2	EG B1	PN/DA
KPD 2215+5037	sdB	EG 102	DA2.4	GCRV 12336	PN/DAO.6
KY UMa	sdB	GD 246	DA.9	HD 39659	PN/O7.5
LB 1516	sdB	GD 50	DA1.2	HD 109540	PN
LB 3241	sd:B	HD 26976	DA2.9	HD 138403	PN/O8(f)ep
LB 1766	sdB	HS 0505+0112	DAOZ.8	HD 164963	PN/[WC]
MCT 0013-3645	sdB	HS 0209+0832	DA1.4	HD 186924	PN/O6fp
MCT 2048-4504	sdB	IK Peg	kA6hA9mF0+DA	HD 200516	PN

Tabulka 5.6: Přehled hvězd, jejichž spektra pořízená družicí FUSE jsme stáhli, 6. část

hvězda	sp. typ	hvězda	sp. typ
PN HDW 4	PN?/DA1.0	PG 1520+525	PN/DO
Hen 2-138	PN/BC0Ibe	PK 107-13 1	PN
IC 1747	PN/[WC4]	PK 002-13 1	PN/[WC]pec
IC 2448	PN	PK 255-59 1	PN
IC 418	PN/O7fp	PK 303+40 1	PN/G8III-IV+DAO
IC 4593	PN/O7fp	PK 342-14 1	PN/O
IC 5217	PN/[WC7]	PK 65-27 1	PN/sdO
PN K 1-16	PN/DO	PN PM 1-89	PN/[WO4]pec
PN K 2-2	PN/O	PN G335.5+12.4	PN/sdO
PN K 3-61	PN/[WC4/6]	PN PuWe 1	PN
PN Lo 4	PN/sdO	PN SwSt 1	PN/[WC9/10]
LSS 1362	PN/sdO	PN Vo 1	PN/[WC10]
PN M 4-18	PN/[WC11]	14 Cep	O9IV+B1V
NGC 1360	PN/sdO	α Pic	A8VnkA6
NGC 1501	PN/[WO4]	AV 491	B1-3III
NGC 1535	PN/sdO3:	AV 80	O4-6n(f)p
NGC 2371	PN/Oe	CPD -59°2603	O7V((f))+O9.5V+B0.2IV
NGC 2392	PN/O6f	CPD -59°2628	O9.5V+B0.3V
NGC 246	PN/sdOfe	HD 93146	O6V+O9.5V
NGC 2867	PN/[WO2]	HD 93205	O.5V((f+))+O8V
NGC 3132	PN/A2V	HD 93206	O9.5Ib+O9.5III
NGC 3587	PN	HD 100213	O7.5V+O9.5V
NGC 40	PN/[WC8]	HD 115071	O9.5V+B0.2III
NGC 5189	PN/[WO1]	HD 149404	O7.5I(f)+ON9.7I
NGC 5882	PN	HD 150100	B9.5V+DA
NGC 6058	PN	HD 190918	WN5+O9I
NGC 6210	PN/Of/[WR]	HD 190429	O4If+O9.5II
NGC 6572	PN/[WC]	HD 206267	O6.0V((f))+O9V
M 57	PN/DA(O?)	HD 215835	O5.5V((f))+O6V((f))
NGC 6826	PN/O6fp	HD 217411	DA1.4+K0V+G3V
NGC 6891	PN/O3Ib(f*)	HD 269896	ON9.7Ia+
NGC 6905	PN/[WC3]	HD 38029	WC+O6-6.5III
NGC 7094	PN	HD 47129	O8I+O7.5III
NGC 7293	PN/DAO.5	HD 698	B7Ib-II(e)
NGC 7662	PN	VV Cep	M2epIa-Iab+B8eV
PB 6	?		
PB 8	DB		
WD 0439+466	PN/DAO.6		
PN PC 14	PN/[WC4/6]		
PN Pe 1-7	PN/[WC9]		

Literatura

- [1] KRTIČKA J.: *Horké hvězdy II*, Brno 2015
- [2] MIKULÁŠEK Z., KRTIČKA J.: *Základy fyziky hvězd*, skripta, Brno 2005
- [3] THORNE A., LITZÉN U., JOHANSSON S.: *Spectrophysics: Principles and Applications*. New York: Springer, c1999.
- [4] PELLERIN A., FULLERTON A. W., ROBERT C., et al.: *An Atlas of Galactic OB Spectra Observed with the Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*. The Astrophysical Journal Supplement Series. 2002, 143(1), 159-200.
- [5] EVANS C. J., VAN LOON J. T., HAINICH R. a BAILEY M.: *2dF-AAOmega spectroscopy of massive stars in the Magellanic Clouds*. Astronomy & Astrophysics. 2015, 584, A5-.
- [6] LAMB J. B., OEY M. S., SEGURA-COX D. M., GRAUS A. S., KIMINKI D. C., GOLDEN-MARX J. B. a PARKER J. W.: *The runaways and isolated O-type star spectroscopic survey of the SMC (RIOTS4)* . The Astrophysical Journal. 2016, 817(2), 113- .
- [7] PRINJA R. K., BARLOW M. J. a HOWARTH I. D.: *Terminal velocities for a large sample of O stars, B supergiants, and Wolf-Rayet stars*. The Astrophysical Journal. 1990, 361, 607-.

Internetové zdroje

[E1] *Simbad*

<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

[E2] *Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST)*

<https://archive.stsci.edu/>

[E3] *NIST Atomic Spectra Database*

<http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>

[E4] *Starlink SPLAT-VO*

<http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat-vo/>

[E5]

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosat.html>