MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta

ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2023

ALENA MRKVIČKOVÁ

MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Proměnnost ultrafialových čar magnetické hvězdy HD 37776

Bakalářská práce

Alena Mrkvičková

Vedoucí práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D. Brno 2023

Bibliografický záznam

Autor:	Alena Mrkvičková Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Proměnnost ultrafialových čar magnetické hvězdy HD 37776
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Akademický rok:	2022/2023
Počet stran:	xiii + 52
Klíčová slova:	Ultrafialová spektroskopie; světelná křivka; horké hvězdy; che- micky pekuliární hvězdy; hvězdné atmosféry; hvězdné magne- tické pole; HD 37776; IUE

Bibliographic Entry

Author:	Alena Mrkvičková Faculty of Science, Masaryk University Department of Theoretical Physics and Astrophysics
Title of Thesis:	Variability of ultraviolet lines of magnetic star HD 37776
Degree Programme:	Physics
Field of Study:	Astrophysics
Supervisor:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
Academic Year:	2022/2023
Number of Pages:	xiii+52
Keywords:	Ultraviolet spectroscopy; light curve; hot stars; chemically peculiar stars; stellar atmospheres; stellar magnetic field; HD 37776; IUE

Abstrakt

Hvězda HD 37776 patří mezi horké, chemicky pekuliární hvězdy a je výjimečná svou komplexní okolohvězdnou magnetosférou. V této bakalářské práci studujeme proměnnost pěti spektrálních čar ve 34 ultrafialových spektrech, naměřených družicí IUE. Zaměřili jsme se na dvě dvojice spektrálních čar, které vznikají ve hvězdném větru, dublety Si IV a C IV, a na čáru C III, pocházející ze skvrn na povrchu hvězdy. Charakteristiky spektrálních čar jsme získali prokladem čar Lorentzovým profilem. Zjistili jsme, že fázová proměnnost Si IV a C IV rezonančních dubletů koreluje s fázovým průběhem podélné složky magnetického pole hvězdy. Tato souvislost platila především pro hloubky čar a radiální rychlosti čar; šířka čar velkou proměnnost neprojevovala. Fázová proměnnost hloubky čáry C III vykazovala stejnou závislost jako fázová světelná křivka naměřená družicí TESS.

Abstract

The star HD 37776 belongs to the hot, chemically peculiar stars and is unique in its complex circumstellar magnetosphere. In this thesis we study the variability of five spectral lines in 34 ultraviolet spectra measured by the IUE satellite. We focused on two pairs of spectral lines that originate in the stellar wind, the Si IV and C IV doublets, and the C III line, which comes from spots on the stellar surface. We obtained the characteristics of the spectral lines by fitting the lines with the Lorentz profile. We found that the phase variability of Si IV and C IV resonance doublets is correlated with the phase course of the star's longitudinal magnetic field component. This correlation was mainly valid for the line depths and radial velocities; the line width did not show much variability. The phase variability of the C III line depth showed the same dependence as the phase light curve measured by the TESS satellite.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2022/2023

Ústav:	Přírodovědecká fakulta	
Studentka:	Alena Mrkvičková	
Program:	Fyzika	
Specializace:	Astrofyzika	

Ředitel ústavu PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce:	Proměnnost ultrafialových čar magnetické hvězdy HD 37776
Název práce anglicky:	Variability of ultraviolet lines of magnetic star HD 37776
Jazyk závěrečné práce:	čeština

Oficiální zadání:

Hvězda HD 37776 patří mezi výjimečné hvězdy s okolohvězdnou magnetosférou. Nejnovější fotometrická křivka získaná družicí TESS odhalila přítomnost rychlé rotační proměnnosti, která pravděpodobně vzniká v korotující magnetosféře. Cílem bakalářské práce je studium proměnnosti čar této hvězdy v ultrafialovém oboru. Budou využita spektra hvězdy získaná družicí IUE a bude studována souvislost změn v ultrafialové a optické oblasti. Literatura:

- Kochukhov, O.; Lundin, A.; Romanyuk, I.; Kudryavtsev, D.: The Extraordinary Complex Magnetic Field of the Helium-strong Star HD 37776
- Krtička, J.; Mikulášek, Z.; Zverko, J.; Žižňovský, J.: The light variability of the helium strong star HD 37776 as a result of its inhomogeneous elemental surface distribution, 2007, A&A, 470, 1089
- Mikulášek, Z. a kol., Surprising variations in the rotation of the chemically peculiar stars CU Virginis and V901 Orionis, 2011, A&A, 534, L5
- Mikulášek, Z. a kol.: What is New with Landstreet Star HD 37776 (V901 Ori)? 2019arXiv191204121M

Vedoucí práce:	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.		
Konzultant:	prof. RNDr. Zdeněk Mikulášek, CSc.		
Datum zadání práce:	24. 11. 2021		
V Brně dne:	12. 5. 2023		

Zadání bylo schváleno prostřednictvím IS MU.

Alena Mrkvičková, 15. 12. 2021 prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D., 7. 1. 2022 RNDr. Luboš Poláček, 14. 1. 2022

Poděkování

Mé největší díky patří vedoucímu mé bakalářské práce, panu profesoru Krtičkovi, za jeho čas, ochotu a za všechny rady a myšlenky. Bylo mi ctí nahlédnout pod pokličku spektroskopie pod jeho vedením.

Chtěla bych touto cestou poděkovat i všem svým blízkým za jejich velkou podporu.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 13. května 2023

Alena Mrkvičková

Obsah

Úvod .		1
Kapito	la 1. Horké hvězdy	3
1.1	Definice horkých hvězd	3
1.2	Zastoupení horkých hvězd a jejich výskyt v Galaxii	4
1.3	OB asociace	4
1.4	Mezihvězdná látka a horké hvězdy	5
1.5	Spektrum horkých hvězd	6
1.6	Hvězdný vítr	6
1.7	Atmosféry horkých hvězd	7
Kapito	la 2. Chemicky pekuliární hvězdy	9
2.1	Definice chemicky pekuliárních hvězd	9
2.2	Klasifikace CP hvězd	9
2.3	Proměnnost chemicky pekuliárních hvězd	10
2.4	Původ magnetického pole	11
Kapito	la 3. HD 37776	13
3.1	Hvězda HD 37776	13
3.2	Perioda rotace	13
3.3	Fotometrická a spektroskopická proměnnost	13
3.4	Povrchové magnetické pole	14
3.5	Okolohvězdná magnetosféra	15
Kapito	la 4. International Ultraviolet Explorer (IUE)	19
4.1	Ultrafialová astronomie	19
4.2	Mise	19
4.3	Technické vybavení	20
4.4	Pozorování	21
Kapito	la 5. Analýza dat: Spektroskopie HD 37776	23
5.1	Data INES	23
5.2	Zpracování UV spekter ve SPLAT-VO	23
5.3	Identifikace spektrálních čar	25
	ر –	xiii –

5.4 Studium proměnnosti spektrálních čar	26
Kapitola 6. Diskuze výsledků6.1 Čáry hvězdného větru: Si IV a C IV6.2 Čára z povrchu hvězdy: C III	33 33 33
Závěr	37
Příloha	39
Seznam použité literatury	47

Úvod

Hvězda HD 37776 je proměnná, horká, chemicky pekuliární hvězda ze souhvězdí Orionu. Jedná se o stálici s mnoha nadprůměrnými parametry. Její hmotnost je 5,5krát větší než hmotnost Slunce, poloměr 3,6krát větší než sluneční (Petit et al. 2013 [40]) a její efektivní teplota je asi 22 000 K (Landstreet et al. 2007 [28]).

Její největší výjimečnost spočívá v jejím povrchovém magnetickém poli. Magnetické pole této hvězdy je velmi silné a není dipólového charakteru, jak tomu u podobných hvězd bývá zvykem, je velmi komplexní a multipólové (Kochukhov et al. 2011 [21]).

Další zvláštností HD 37776 je proměnnost její rotační periody. Změny periody dokonce nejsou monotónní, v řádu několika let až maximálně dekád se střídají intervaly zrychlování a zpomalování rotace a příčina tohoto jevu ještě není zcela vysvětlena. Délka cyklu proměnnosti periody by mohla být větší než 120 let (Mikulášek et al. 2011 [32]).

Abychom mohli hvězdu HD 37776 řádně popsat a vysvětlit její chování, zařadili jsme do naší práce dvě teoretické kapitoly, zabývající se skupinami hvězd, mezi které se hvězda zařazuje.

Kapitola první je věnována horkým hvězdám. Nejprve si horké hvězdy definujeme a popíšeme si jejich zastoupení a výskyt v rámci naší Galaxie. Vysvětlíme si souvislost horkých hvězd a oblastí svítící mezihvězdné látky. Zmíníme zde informace o OB asociacích, jelikož do jedné z nich hvězda HD 37776 patří. Objasníme si fenomén hvězdného větru, který je důležitý pro popis nejen záření hvězdy HD 37776. A konečně se dotkneme tématu atmosfér horkých hvězd, místa původu hvězdného záření, ve kterém je pro nás zakódováno obrovské množství informací ve formě hvězdných spekter.

Druhá kapitola je o chemicky pekuliárních (CP) hvězdách neboli hvězdách s anomálním chemickým složením atmosfér. Ukážeme si stručnou klasifikaci CP hvězd, vysvětlíme si souvislost druhů proměnnosti těchto hvězd a představíme si několik hypotéz o původu magnetického pole CP hvězd.

Následuje třetí kapitola o samotné hvězdě a čtvrtá kapitola o družici IUE, jejíž spektra jsme využili ke zpracování.

V praktické části bakalářské práce, v kapitolách 5 a 6, zkoumáme proměnnost spektrálních čar hvězdy v ultrafialovém oboru a naše výsledky interpretujeme a porovnáváme s výsledky jiných měření.

Kapitola 1 Horké hvězdy

1.1 Definice horkých hvězd

Naprostá většina informací, které jsou nám hvězdy ochotné o sobě sdělit, pochází z jejich atmosfér. Hvězdná atmosféra je vnější oblast hvězdy, ze které do okolního prostoru uniká elektromagnetické záření. Proto je nejzákladnější rozdělení hvězd na chladné a horké založeno právě na stavu hvězdných atmosfér (Krtička 2015 [26]).

Chladné hvězdy jsou charakteristické generací a následným rozpadem lokálních magnetických polí, které dávají za vznik hvězdné aktivitě slunečního typu. V povrchových vrstvách se tak vyskytují aktivní oblasti, projevující se relativně dlouho žijícími fotosférickými skvrnami, nebo krátkodobějšími projevy aktivity jako jsou erupce, protuberance a podobně. Chladné hvězdy všeobecně pomaleji rotují a kromě fotosféry vlastní i chromosféru a korónu slunečního typu (Mikulášek 2021 [34], Štefl 2022 [47], Mikulášek a Krtička 2005 [35]).

U horkých hvězd se vyskytují stabilní globální magnetická pole a klidné atmosféry. Projevují se u nich pomalé procesy zářivé difúze, které vedou až k chemické pekuliaritě. Působením zářivé síly může vznikat i hvězdný vítr horkých hvězd (Mikulášek 2021 [34]).

Kvantitativně lze rozdělit hvězdy na chladné a horké podle jejich efektivní teploty. Tato astrofyzikální veličina je hlavním faktorem, který určuje stav nejen hvězdných atmosfér ale i stav podpovrchových vrstev a dominující druh přenosu energie z nitra na povrch. V atmosféře teplejších hvězd převažuje přenos energie zářením a u chladnějších hvězd převládá konvekce.

Za horké hvězdy považujeme hvězdy s efektivní teplotou větší než přibližně 7000 K. Hvězdy odpovídajícího spektrálního typu F2 jsou tedy na rozhraní mezi horkými a chladnými hvězdami. Mezi horké hvězdy patří hvězdy spektrálních typů W, O, B, A a zčásti F (F0-F2). Hvězdy spektrálních typů G, K, M, L, T, Y včetně našeho Slunce spadají pod hvězdy chladné (Krtička 2015 [26], Mikulášek 2021 [34]).

Efektivní teplota hvězdy T_{eff} je zavedena pomocí zářivého výkonu hvězdy L, jakožto celkového množství energie vyzářené hvězdou

$$T_{\rm eff}^4 = \frac{L}{4\pi\sigma_R R_\star^2},$$
$$L = 4\pi r^2 F(r),$$

kde σ_R je Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma_R = 5,67051 \cdot 10^{-8} \,\mathrm{W \, m^{-2} \, s^{-1} \, K^{-4}}$, R_{\star} je poloměr hvězdy, F(r) je integrál radiální složky vektoru toku záření přes všechny frekvence

$$F(r) = \int_0^\infty F(r, \mathbf{v}) d\mathbf{v}.$$

1.2 Zastoupení horkých hvězd a jejich výskyt v Galaxii

Horké hvězdy tvoří asi dvě pětiny ze vzorku nejjasnějších hvězd noční oblohy. Významně se na tom projevuje výběrový efekt, jelikož horké hvězdy, v první řadě hmotné hvězdy hlavní posloupnosti a horcí hvězdní obři a veleobři, oplývají velmi vysokou svítivostí, která je schopna vykompenzovat i jejich velké vzdálenosti.

V nejbližším okolí Slunce je podíl horkých hvězd již mnohem menší, činí asi 7%. Zbylé hvězdy jsou hvězdy chladné. Horké hvězdy jsou minoritní i v zastoupení napříč celou Galaxií, představují jen jednotky procent. Je tomu tak z toho důvodu, že početně i hmotnostně převládají v Galaxii hvězdy patřící do, na horké hvězdy chudé, populace II.

Při pohledu na hvězdnou oblohu nalezneme horké hvězdy nejvíce v místech, kam se promítají spirální ramena naší Galaxie. Rozmístěny jsou tudíž nerovnoměrně, a to především v blízkosti pásu Mléčné dráhy a v okolí centra (souhvězdí Střelce) a anticentra (souhvězdí Orionu) (Mikulášek 2021 [34]).

Horké hvězdy o hmotnosti větší než 1,4 M_S se zářivým výkonem nad 3,5 L_S jsou typické objekty populace I, které se vyznačují vyšším počátečním zastoupením těžších prvků Z ($\approx 2-5$ %), téměř kruhovými oběžnými drahami, ležícími zhruba v rovině Galaxie, a stářím nepřevyšujícím stáří Slunce (asi 4,55·10⁹ let). V populaci II se horké hvězdy vyskytují jen v zanedbatelném množství a to v podobě modrých opozdilců a horké části horizontální větve obrů (Mikulášek 2021 [34]).

Převážná část horkých hvězd, hlavně méně hmotné hvězdy spektrálních typů A0 až F5 patří mezi objekty populace I tzv. starého disku. Silně se koncentrují ke galaktické rovině, ne však ke spirálním ramenům.

Hmotné a mladé hvězdy typů B a O patří k populaci mladého disku, tzv. extrémní populaci I. Jelikož se tyto hvězdy utvořily poměrně nedávno, nestačily se dostatečně vzdálit od místa svého vzniku, molekulových mračen. Proto stejně jako molekulová mračna vykazují spirální strukturu (Mikulášek 2021 [34], Mikulášek a Krtička 2005 [35]).

1.3 OB asociace

Hvězdné asociace jsou nejtypičtější objekty extrémní populace I. Členy asociace sice spojuje společné místo a okamžik vzniku, nejsou ale dostatečně pevně gravitačně vázány tak, aby vytvořily stabilní systém typu hvězdokupy, a průběžně se rozptylují do okolního prostoru. Hvězdné asociace se nachází v místech, kde dochází k hromadnému vzniku hvězd, především tedy ve spirálních ramenech (Wright 2020 [53], Wright et al. 2022 [54], Mikulášek 2021 [34]).

OB asociace jsou gravitačně nesvázané skupiny mladých hvězd, typicky zahrnující mnoho nápadných hvězd spektrálních typů O a B a také několik hvězd s malou hmotností.

I přes malý počet členů (desítky až stovky hvězd) jsou OB asociace velmi jasné objekty, neboť jejich nejjasnější členové jsou velmi hmotné hvězdy se zářivým výkonem až $10^6 L_S$ (Wright 2020 [53], Mikulášek 2021 [34]).

Rozměry OB asociací se pohybují mezi desítkami a stovkami parseků a mívají hmotnosti v řádech 1000 až 10 000 M_S (Wright 2020 [53]).

Hmotné hvězdy, o kterých hovoříme, mají krátkou dobu života, řádově miliony let. Svou polohou tedy indikují místa zrodu hmotných hvězd – všeobecně spirální ramena (Mikulášek 2021 [34]). OB asociace jsou důležité objekty ke studiu, jelikož představují přechodnou fázi mezi oblastmi zrodu hvězd a běžnými hvězdami galaktického pole (Wright 2020 [53]).

> λOri Collinder 69 Betelgeuse Anard's Loop Ori OB1a 25 Ori Ori OB1b NGC 1981 GC 197 Ori OB1c Ori OB1d 980

OB asociace v souhvězdí Orion jsou vyznačeny na obrázku 1.1.

Obrázek 1.1: OB asociace a komplex molekulárních oblaků v souhvězdí Orion. Bíle jsou označeny čtyři podskupiny asociace OB1 Orion, žlutě menší mlhoviny a hvězdokupy. Obrázek je převzatý z Wright 2020 [53], autor astrofotografie je Stanislav Volskiy.

1.4 Mezihvězdná látka a horké hvězdy

Existují dvě příčiny, proč se horké hvězdy často nachází v oblastech s vyšší koncentrací mezihvězdné látky. Hmotné hvězdy se obvykle nestačily vzdálit ze svých rodišť, která jsou bohatá na mezihvězdnou látku, a zároveň samy okolo sebe rozptylují látku z vlastního povrchu působením hvězdného větru (Mikulášek 2021 [34]).



Kolem hvězdy se vytváří okolohvězdná obálka, jejíž záření je buzeno ultrafialovým zářením hvězdy. Žhavé hvězdy spektrálních typů O a B s efektivní teplotou nad 18 000 K jsou schopny svým ultrafialovým zářením fotoionizovat atom vodíku. Následnou rekombinací a kaskádovým přechodem zpět do základního stavu (fluorescencí) atomy samy vyzařují, mimo jiné i ve viditelném oboru. Mezihvězdný plyn v okolí žhavých hvězd se tak mění v rozsáhlé plynné mlhoviny, s dominantními emisními spektrálními čarami Balmerovy série. Nejintenzivnější je spektrální čára H α s vlnovou délkou 656,28 nm, která vzniká při přechodu ze 3. do 2. energiové hladiny (Mikulášek 2021 [34]).

Emisní mlhoviny, svítící oblasti ionizovaného mezihvězdného vodíku s charakteristickou teplotou 8000 K, se označují jako oblasti H II. Mezi nejznámější emisní mlhoviny patří mlhovina v Orionu (M42) nebo dvě mlhoviny ve souhvězdí Střelce, Trifid (M20) a Omega (M17). Na fotografii 1.1 jsou patrné dvě velké oblasti H II v Orionu, červené emisní mlhoviny s anglickými názvy Barnard's Loop a λ Orionis Ring (Angelfish nebula). Mlhovina v Orionu je na obrázku označena zkratkou ONC.

Prostřednictvím mezihvězdného plynu tak dochází k transformaci ultrafialového záření na záření viditelné. Plyn, převážně vodíkový, krátkovlnné ionizující záření pohltí, je v tomto oboru velmi málo průhledný. Následně plynem vyzářené záření s menší energií je už mlhovinu schopno opustit (Mikulášek 2021 [34]).

1.5 Spektrum horkých hvězd

Hvězdné spektrum je zobrazení závislosti záření hvězdy na vlnové délce. Zobrazovanou veličinou je většinou intenzita záření $I(\lambda)$, která je přímo úměrná zářivému toku $F(\lambda)$. Odlišujeme dvě složky spektra, a to spektrum spojité a čarové. Spojité spektrum neboli kontinuum se obvykle mění pomalu s vlnovou délkou a na jeho vzniku se podílí vázaně-volné a volně-volné přechody a rozptyl záření na volných elektronech. Čarové spektrum je důsledek vázaně-vázaných přechodů, proto závisí na vlnové délce podstatně více (Krtička 2015 [26]).

Základní typy profilů spektrálních čar jsou absorpční a emisní. Příčina vzniku absorpčního profilu je s rostoucí výškou klesající teplota v atmosféře hvězdy. V čáře tak klesá intenzita záření, protože má látka odpovídající dané absorpční čáře nižší teplotu než zdroj kontinua. Emisní profil vzniká v atmosférách, ve kterých teplota roste s výškou, což může značit přítomnost okolohvězdné obálky nebo místní nárůst teploty s výškou v atmosféře. Význačný je též profil čar typu Be, který se skládá z emisního profilu s centrální absorpcí. Objevuje se ve spektrech hvězd spektrálního typu B a vzniká v rotujícím disku v blízkosti hvězdy. Ve hvězdném větru vzniká profil typu P Cygni, jehož vznik je vysvětlen v následující sekci (Krtička 2015 [26]).

1.6 Hvězdný vítr

Hvězdný vítr horkých hvězd je rozpínající se obálka, kterou si hvězda nedokáže udržet svou gravitací. Jedná se o tok hmoty od hvězdy do mezihvězdného prostoru. Hvězdný vítr je urychlován zářivou silou, způsobenou absorpcí záření v čarách (Krtička 2015 [26]).

Hvězdný vítr se projevuje u některých spektrálních čar hvězd hlavní posloupnosti typu O a B a u obrů a veleobrů typů O, B a A tzv. profily typu P Cyg. Profil spektrální čáry typu P Cyg je velmi široký a skládá se z absorpční části v krátkovlnné oblasti čáry a z emisní části v dlouhovlnné oblasti čáry. Dopplerovské rychlosti odpovídající hraně absorpční části profilu typu P Cyg několikanásobně převyšují únikové rychlosti z povrchu hvězdy (Krtička 2015 [26]).

Profil typu P Cyg lze vysvětlit za předpokladu sféricky symetrického hvězdného větru, jehož rychlost roste se vzdáleností od hvězdy. Oblast hvězdného větru zakrývající povrch hvězdy vytváří širokou absorpční čáru s šířkou odpovídající Dopplerovu posunu pro rychlosti dosahující až maximální rychlosti hvězdného větru. Absorpci pozorujeme pouze v modré (krátkovlnné) části čáry, protože se k nám vítr v této oblasti přibližuje. V oblasti okolí hvězdy pozorujeme pouze hvězdný vítr, proto sledujeme jen rozptýlené záření s emisním profilem. Tento emisní profil je symetrický, jelikož se k nám část větru přibližuje a část se vzdaluje. P Cyg profil vzniká právě složením symetrického emisního profilu s absorpčním profilem v modré oblasti čáry (Krtička 2015 [26]).

Spektrální čáry vznikající ve hvězdném větru ale nemají vždy profil typu P Cyg, který vzniká absorpcí fotonu a následným bezprostředním vyzářením fotonu ve téže čáře a návratem atomu do původního stavu. Emise v dané čáře může vznikat i důsledkem rekombinace. Rekombinovaný atom se nachází ve vyšší excitované hladině, dojde k vyzáření fotonu v dané čáře a k opětovné ionizaci atomu. Těmto emisním čarám se říká čáry rekombinační. Příkladem může být emisní čára H α , pozorovaná ve spektru hvězd spektrálního typu O (Krtička 2015 [26]).

1.7 Atmosféry horkých hvězd

Hvězdná atmosféra

Pod pojmem hvězdná atmosféra rozumíme oblast hvězdy, ze které fotony unikají do okolního prostoru, tedy tu část hvězdy, ve které pozorujeme její záření. Hvězdná atmosféra obsahuje sice jen velmi malou část hmotnosti celé hvězdy, studium jejího fyzikálního stavu je ale důležité k pochopení předchozího i budoucího vývoje hvězdy a také k pochopení dějů, které ve hvězdě probíhají (Krtička 2015 [26]).

Hvězdné atmosféry jsou nejlépe studovaným příkladem prostředí, ve kterém záření není pouze sondou jeho fyzikálního stavu, ale je i jeho důležitou komponentou, která určuje jeho strukturu (Hubeny a Mihalas 2014 [18]).

Opacita a emisivita

Prochází-li záření hvězdnou atmosférou, dochází k jeho pohlcování a opětovnému vyzařování nebo k jeho rozptylu. Celkově tyto procesy označujeme jako přenos záření.

Zdroje opacity (schopnosti pohlcovat záření) v atmosférách hvězd se rozdělují na vázaně-vázané (přechody mezi energiovými hladinami daného iontu), vázaně-volné (přechody vedoucí k ionizaci), volně-volné (interakce mezi ionty a volnými elektrony, při kterých dochází k absorpci či emisi fotonu) a rozptyl záření. Spektrální čáry vznikají díky

vázaně-vázaným přechodům a spojité spektrum je důsledkem vázaně-volných a volněvolných přechodů a rozptylu.

Nejdůležitější zdroje čarového spektra horkých hvězd ve viditelné oblasti jsou především procesy spojené s vodíkem a heliem. V oblasti ultrafialové jsou to procesy s těžšími prvky. Spojité spektrum horkých hvězd formují hlavně vázaně-volné a volně-volné přechody vodíku a helia. U velmi horkých hvězd je podstatný i rozptyl záření na volných elektronech (Krtička 2015 [26]).

Kapitola 2

Chemicky pekuliární hvězdy

2.1 Definice chemicky pekuliárních hvězd

Chemicky pekuliární (CP) hvězdy jsou hvězdy s neobvyklým (pekuliárním) vzhledem spekter, jehož příčinou je anomální chemické složení atmosfér těchto hvězd. Řadí se mezi hvězdy hlavní posloupnosti s efektivní teplotou 7000 K až 30 000 K, spektrálních typů B0 až F0 a hmotnostech v rozmezí 1,5 až 15 M_S (Mikulášek 2021 [34], Preston 1974 [41]).

Chemické složení hvězd porovnáváme s normálním (tj. slunečním) chemickým složením, kterému odpovídá hmotnostní podíl 73,3 % H, 24,9 % He a 1,7 % jiných prvků: 0,8 % O; 0,3 % C; 0,16 % Fe; 0,12 % Ne; 0,09 % N; 0,07 % Si; 0,05 % S a 0,21 % dalších prvků (Mikulášek 2021 [34]).

Relativní zastoupení jednotlivých prvků u CP hvězd může být vzhledem ke slunečnímu vyšší i nižší (Mikulášek 2021 [34], Mikulášek a Zejda 2013 [36]). Sférické mapy povrchového rozložení relativní abundance helia vzhledem ke Slunci pro různé fáze hvězdy HD 37776 jsou na obrázku 3.4 (c).

U CP hvězd je význačná pomalejší rotace, díky které jsou svrchní vrstvy hvězd klidnější než u hvězd rotujících rychleji.

2.2 Klasifikace CP hvězd

Standartní Prestonova klasifikace (Preston 1974 [41]) řadí CP hvězdy do podskupin podle rostoucí teploty na metalické hvězdy (CP1), magnetické hvězdy (CP2), HgMn hvězdy (CP3) a na hvězdy se slabými čarami He (CP4).

V současnosti je nejpoužívanější tato varianta Prestonovy-Maitzenovy klasifikace (Mikulášek 2021 [34]):

CP1

CP1 nebo Am hvězdy jsou metalické hvězdy bez silného magnetického pole s efektivní teplotou v rozmezí 7000 až 10 000 K. Téměř všechny jsou to složky dvojhvězd, jejichž slapová interakce způsobila vázanou rotaci. Maximální rychlost jejich rotace je 100 km s^{-1} . Jedná se o hvězdy spektrálních typů F a A s hmotnostmi 1,2 až 3 M_S (Abt et al. 2002 [1]).

CP2

CP2 nebo mCP hvězdy vlastní silné globální magnetické pole. Jedná se o hvězdy spektrálních typů B8 až F6 (efektivní teplota 7200 až 15 000 K). Jsou spektrálně a fotometricky proměnné. Vykazují nerovnoměrné rozložení chemických prvků na povrchu, které způsobuje tvorbu skvrn (Michaud et al. 1981 [29]). Rotují pomaleji než běžné hvězdy stejného spektrálního typu ($\leq 120 \text{ km s}^{-1}$) (Murphy 2014 [37], Zorec a Royer 2012 [56]).

CP3

CP3 nebo HgMn hvězdy s efektivní teplotou 10 000 až 14 000 K a hmotností 2,4 až 5 M_S. Vykazují silný nadbytek rtuti nebo manganu (Schöller a Hubrig 2015 [44]). Většinou se nachází ve dvojhvězdném či vícehvězdném systému. Proměnnost spektrálních čar způsobují skvrny na povrchu (Korhonen 2014 [22]).

CP4

CP4 nebo He weak hvězdy vlastní stejně jako CP2 hvězdy globální magnetické pole, jejich efektivní teplota je ale větší, nachází se v rozmezí 13 000 až 20 000 K. Jsou to hvězdy spektrálních typů B2,5 až B7. V jejich spektru pozorujeme abnormálně slabé spektrální čáry helia a nadbytek čar Si nebo Sr a Ti (Xia 2019 [55]).

CP6, 7

CP6, 7 nebo He strong hvězdy se silnými čarami He patří mezi nejhmotnější CP hvězdy, spadají mezi spektrální typy B1 až B2,5. Vlastní silné magnetické pole a vykazují spektrální, světelnou a magnetickou proměnnost. Ukazuje se, že hromadění He v atmosféře podmiňuje hvězdný vítr (Vauclair 1975 [51]).

2.3 Proměnnost chemicky pekuliárních hvězd

Fotometrická proměnnost chemicky pekuliárních hvězd hlavní posloupnosti je způsobena přerozdělením energie ve spektru ve spektroskopických skvrnách.

Spektroskopické skvrny vznikají zářivou difuzí v klidných hvězdných atmosférách. Chemické prvky se nerovnoměrně soustřeď ují v rozsáhlých trvalých oblastech, které jsou částečně formovány magnetickým polem. Nadbytek prvků redistribuuje vzdálené UV záření do blízkého UV a viditelného záření kvůli čarovým, vázaně-vázaným přechodům (např. Fe nebo Cr) a vázaně-volným přechodům (hlavně Si a He).

V důsledku své rotace tak chemicky pekuliární hvězdy vykazují spektroskopickou, fotometrickou a magnetickou proměnnost (Krtička et al. 2012 [25], Prvák et al. 2015 [42]).

Přerozdělení energie ve spektru je důsledkem tzv. pokrývkového jevu ve hvězdné atmosféře, kdy se část záření procházejícího hvězdou absorbuje (v čarách i v kontinuích) a následně zpětně vyzáří do hlubších vrstev atmosféry. V hlubších vrstvách je toto záření opět absorbováno, přičemž vázaně-volná a volně-volná absorpce vede k ohřevu hlubších vrstev atmosféry (Krtička 2015 [26]).

10_

Model skloněného rotátoru

Téměř všechny pozorované spektroskopické, fotometrické a magnetické změny hvězd CP2 a CP4 až CP6 lze vysvětlit pomocí modelu skloněného rotátoru (Stibbs 1950 [46]), modelu hvězdy rovnoměrně rotující jako tuhé těleso s následujícími vlastnostmi (Mikulášek 2021 [34]):

- Vlastní zamrzlé magnetické pole převážně dipólového charakteru, jehož dipól je skloněn pod nenulovým úhlem β k rotační ose.
- Na povrchu hvězdy jsou nehomogenně rozložené chemické prvky tzv. spektroskopické skvrny. Magnetické pole přispívá ke vzniku chemických anomálií a společně s jinými vlivy určuje povahu rozložení chemických prvků po povrchu hvězdy.
- Hvězda má fotometrické skvrny s rozdílným rozložením energie ve spektru. Na rozdíl od skvrn slunečních, se jedná o rozsáhlé a dlouho se vyskytující struktury s efektivní teplotou nelišící se od střední efektivní teploty celé hvězdy.

2.4 Původ magnetického pole

Nejčastěji přijímanou hypotézou je fosilní původ globálního magnetického pole jakožto pozvolna se rozpadajícího pozůstatku po mezihvězdném magnetickém poli zamrzlém do zárodečného materiálu (Alecian et al. 2008 [2]). Existují i další dvě teorie o možném původu globálního magnetického pole chemicky pekuliárních hvězd. Magnetické pole by mohlo být postupně se rozpadající pozůstatek po dynamovém procesu, který byl ve hvězdě aktivní předtím, než dosedla na hlavní posloupnost (Cassinelli a MacGregor 2000 [10]). Nebo by magnetické pole mohlo vznikat a udržovat se podobně jako u Slunce a Slunci podobných chladnějších hvězd, a to dynamovým mechanismem probíhajícím v jádru hvězdy (Alecian 2014 [3]).

Nejnovější studie ukazují, že u hmotných hvězd ($M \ge 1,5 M_S$), u kterých dynamo slunečního typu nemůže fungovat, by magnetické pole mohlo být důsledkem hvězdných splynutí (Schneider et al. 2019 [43]).



Obrázek 2.1: Struktura okolohvězdné magnetosféry mCP a He strong hvězdy HD 37776 v různých fázích rotace. Vykresleny jsou zde pouze siločáry magnetického pole, které jsou uzavřeny do koule o poloměru $R = 2R_{\star}$. Převzato z Kochukhov et al. 2011 [21].

Kapitola 3

HD 37776

3.1 Hvězda HD 37776

HD 37776, známá též jako V901 Ori nebo Landstreetova hvězda, je mladá horká hvězda spektrálního typu B2 V. Spočívá v emisní mlhovině IC 432 v souhvězdí Orionu (na obrázku 6.5), nedaleko známého asterismu Orionův pás (Landstreet et al. 2007 [28]). Jedná se o mimořádnou proměnnou magnetickou chemicky pekuliární (mCP) hvězdu patřící do skupiny heliově silných (He strong) hvězd (Nissen 1976 [38]).

Hvězda je členem asociace OB1 Orion (obrázek 1.1). Asociace má ještě jemnější dělení na čtyři podskupiny a, b, c, d podle stáří hvězd. HD 37776 náleží do podskupiny Ori OB1b v Orionově pásu, ve které nalezneme i známé jasné hvězdy Alnitak (ζ Ori), Alnilam (ε Ori) a Mintaka (δ Ori) (Warren a Hesser 1978 [52]).

Důležité parametry této hvězdy jsou vyneseny v tabulce 3.1.

3.2 Perioda rotace

Hvězda projevuje rotačně modulované změny s periodou 1,5387 d ve spektrech i ve světelné křivce. I když má většina CP hvězd konstantní rotační periodu, u V901 Ori vykazuje rotační perioda nemonotónní proměnnost na časové škále desítek let. Rotace hvězdy se nejprve zpomalovala, během 31 let narostla perioda o 17,7 s. Od roku 2005,8 \pm 0,4 se rotace opět zrychluje, perioda se do roku 2020 zkrátila o 5,5 s na hodnotu 1,538 739 4(24) d. Odhaduje se, že délka cyklu změn periody je delší než 120 let (Mikulášek et al. 2007 [30], Mikulášek et al. 2008 [31], Mikulášek et al. 2011 [32], Mikulášek et al. 2020 [33]).

Příčina pozorované rotační proměnnosti ještě není zcela vysvětlena. Mikulášek et al. 2011 [32] navrhují, že by mohla hrát roli dynamická interakce mezi tenkou vnější magneticky drženou obálkou, brzděnou hvězdným větrem, a rychle rotující hvězdou.

3.3 Fotometrická a spektroskopická proměnnost

Khokhlova et al. (2000) [20] metodou Dopplerova-Zeemanova mapování odvodili rozložení křemíku a helia na povrchu hvězdy (obrázek 3.1). Mapy mimo jiné ukazují, že v místech, kde je nadbytek křemíku je deficit helia a naopak. Krtička et al. (2007) [24] zjistili, že fotometrická proměnnost hvězdy HD 37776 může být vysvětlena jako výsledek nehomogenně rozložených chemických prvků na povrchu rotující hvězdy. Fotometrické skvrny se shodují se skvrnami s větší abundancí křemíku a helia (obrázek 3.3). V těchto křemíkových a heliových skvrnách dochází k přerozdělení energie a to v první řadě vázaně-volnými přechody.



Obrázek 3.1: Fázová proměnnost povrchového rozložení abundance helia (červeně nalevo) a křemíku (modře napravo) hvězdy HD 37776 z článku Khokhlova et al. 2000 [20]. Převzato z Krtička et al. 2007 [24].

3.4 Povrchové magnetické pole

Hvězda V901 Ori má globální, mimořádně silné (v řádech desítek kG) povrchové magnetické pole. Jedná se o jedno z nejsilnějších a především topologicky nejkomplexnějších povrchových magnetických polí mezi všemi nedegenerovanými hvězdami (obrázek 3.4). Na rozdíl od většiny mCP hvězd, jejichž povrchové magnetické pole lze dobře popsat skloněným dipólem, je intenzita a struktura magnetického pole HD 37776 určena složením dipolárních, kvadrupolárních a oktupolárních magnetických složek (Thompson a Landstreet 1985 [48], Kochukhov et al. 2011 [21]).

Kochukhov et al. 2011 [21] využili dva modely pro popis magnetického pole hvězdy HD 37776. První, multipolární model, který byl revizí modelu od Bohlender 1994 [8], dával následující výsledky jednotlivých magnetických složek: Dipolární složka $B_d = -1, 0 \pm$ 0,6kG, kvadrupolární $B_q = -4, 3 \pm 13,6$ kG a oktupolární $B_o = 97, 0 \pm 7,3$ kG. Střední síly magnetického pole se pro tento model pohybují v rozmezí 43 až 49 kG v závislosti na fázi a síla pole v různých místech na povrchu hvězdy v rozmezí 35 a 100 kG. Magnetické Dopplerovské mapování (obrázek 3.4) dávalo výsledky střední síly magnetického pole v závislosti na fázi hvězdy v rozmezí 13 a 16 kG a hodnoty 5 až 30 kG v různých místech na povrchu hvězdy.

3.5 Okolohvězdná magnetosféra

Světelné křivka HD 37776 získaná z družice TESS odhalila okolo deseti menších poklesů (anglicky nazývaných warps) (Mikulášek et al. 2020 [33]), které nelze vysvětlit pomocí skvrn na povrchu hvězdy (obrázek 3.2).

Vše nasvědčuje tomu, že se na fotometrické proměnnosti hvězdy kromě zjevné hlavní příčiny – fotometrických skvrn, podílí i druhá důležitá složka – okolohvězdná korotující magnetosféra (Krtička et al. 2022 [27]). Předpokládá se, že v komplexní hvězdné magnetosféře (znázorněné na obrázku 2.1) může být zachyceno neprůhledné plazma pocházející z hvězdného větru. Tato látka se shromažďuje v okolí minim efektivního potenciálu podél magnetických siločar. Magnetosférická mračna pak mohou způsobovat periodické světelné změny, a to buď zákrytem hvězdy anebo rozptylem na mračnech, které se projektují do okolí hvězdy. Počet poklesů, warpů, na světelné křivce pak udává multipólové složení magnetosféry (Krtička et al. 2022 [27], Bora a Landstreet 1979 [9], Townsend a Owocki 2005 [49], Mikulášek et al. 2020 [33]). Tyto poznatky dokládá obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Simulovaná světelná křivka HD 37776 (plná modrá čára) (Krtička et al. 2022 [27]), vypočtená z povrchového rozložení Si a He od Khokhlova et al. 2000 [20] a multipólového složení magnetosféry. Dále fázová světelná křivka z družice TESS od Mikulášek et al. 2020 [33] (černé tečky) a světelná křivka odpovídající jen povrchovým skvrnám (přerušovaná modrá čára). Převzato z Krtička et al. 2022 [27].

Parametr	Hodnota	Zdroj
Názvy	HD 37776	SIMBAD [67]
-	V901 Ori	SIMBAD [67]
	Landstreet's star	Mikulášek et al. 2020 [33]
	HIP 26742	SIMBAD [67]
Souhvězdí	Ori	SIMBAD [67]
Asociace	OB1 Orion	Landstreet et al. 2007 [28]
RA (J2000)	$5^{h}40^{m}56,37^{s}$	Gaia Collab. 2020 [16]
DEC (J2000)	-1° 30' 25,86"	Gaia Collab. 2020 [16]
Galaktická délka (J2000)	206,073°	SIMBAD [67]
Galaktická šířka (J2000)	-16,342°	SIMBAD [67]
Paralaxa [mas]	$2,546 \pm 0,052$	Gaia Collab. 2020 [16]
Vzdálenost [pc]	330 ± 60	SIMBAD [67]
$v_{\rm rad} [{\rm km s^{-1}}]$	$33,1 \pm 0,9$	Khokhlova et al. 2000 [20]
vlastní pohyb v RA [mas/rok]	$3,21 \pm 0,67$	SIMBAD [67]
vlastní pohyb v DEC [mas/rok]	$1,76 \pm 0,31$	SIMBAD [67]
Spektrální typ	B2 V	Houk a Swift 1999 [17]
Stáří $\log(t/1 \mathrm{yr})$	6,55	Landstreet et al. 2007 [28]
<i>M</i> [M _S]	5,5	Petit et al. 2013 [40]
$R[R_S]$	3,6	Petit et al. 2013 [40]
<i>P</i> [d]	1,5387394(24)	Mikulášek et al. 2020 [33]
$\log(L/1 \mathrm{L_S})$	$3,5 \pm 0,1$	Landstreet et al. 2007 [28]
M_V [mag]	-2,2	Cidale et al. 2007 [12]
M _{bol} [mag]	-5,5	Cidale et al. 2007 [12]
$v\sin i [\mathrm{kms^{-1}}]$	95	Petit et al. 2013 [40]
U [mag]	5,96	Ducati 2002 [15]
<i>B</i> [mag]	6,82	Ducati 2002 [15]
V [mag]	6,96	Ducati 2002 [15]
<i>T</i> _{eff} [K]	22000 ± 1000	Landstreet et al. 2007 [28]
$\log g [cgs]$	$4,0 \pm 0,1$	Petit et al. 2013 [40]
Inklinace <i>i</i>	45°	Khokhlova et al. 2000 [20]
Abundance	$-5,4 \leq [\text{He/H}] \leq 2,3$	Khokhlova et al. 2000 [20]
	$-2,4 \le [Si/H] \le 2,6$	
$v_{\rm turb} [\rm km s^{-1}]$	2	Khokhlova et al. 2000 [20]

Tabulka 3.1: Parametry hvězdy HD 37776.



Obrázek 3.3: Polohy fotometrických skvrn ve filtru u, vypočtené z povrchového rozložení křemíku a helia od Khokhlova et al. 2000 [20]. Převzato z Krtička et al. 2007 [24].



Obrázek 3.4: (*a*) Sférické mapy síly povrchového magnetického pole HD 37776. (*b*) Mapy orientace vektorů magnetického pole. Červené vektory směřují ven z povrchu hvězdy a modré dovnitř. (*c*) Povrchové rozložení relativní abundance helia vzhledem ke Slunci. Vše je vykreslené pro různé rotační fáze. Jedná se o výsledek magnetického Dopplerov-ského mapování od Kochukhov et al. 2011 [21].

Kapitola 4

International Ultraviolet Explorer (IUE)

4.1 Ultrafialová astronomie

Ultrafialové záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou kratší než má viditelné světlo a delší než má záření rentgenové, tedy v rozmezí 10 nm až 380 nm. Zemská atmosféra, jakožto opticky aktivní prostředí, krátkovlnné oblasti spektra (do 300 nm) zcela pohlcuje (obrázek 4.1). Zasluhuje se na tom Rayleighův rozptyl na molekulách vzduchu a absorpce ozónem ve stratosféře, respektive v ozónové vrstvě [61].

Drtivou většinu ultrafialového záření proto ze zemského povrchu nejsme schopni detekovat a pozorování je nutno provádět družicově ve vesmírném vzduchoprázdnu. Ultrafialová astronomie si musela počkat na éru kosmického věku. Prvním úspěšným projektem a vlastně i prvním vesmírným dalekohledem v historii byla druhá Orbiting Astronomical Observatory (OAO-2), americká družice s patnácti ultrafialovými dalekohledy, která mezi roky 1968 a 1972 napozorovala stovky objektů, převážně hvězd ale také komet, planet a galaxií (Cox 2015 [13]). Mezi další nejznámější ultrafialové teleskopy se řadí Orion 1 a 2, EUVE, FUSE, EIT (SOHO), GALEX, Astrosat a HST [69].



Obrázek 4.1: Neprůhlednost zemské atmosféry v závislosti na vlnové délce záření [14].

4.2 Mise

IUE byla jednou z nejdéle fungujících a zároveň nejproduktivnějších družic v historii. Mise byla poprvé navržena již na začátku roku 1964 skupinou vědců z Velké Británie. Družice byla vynesena 26. ledna 1978 z Kennedyho vesmírného střediska na nosné raketě Thor-Delta 2914 společnosti NASA a její předpokládaná životnost byla 3 roky. Nakonec předčila všechna očekávání a poslední kontakt s ní nastal až 18 let od spuštění, v září roku 1996. K jejím odstavení navíc došlo z finančních důvodů, teleskop stále fungoval s téměř původní účinností [57].

Na projektu spolupracovala americká NASA, evropská ESA a britské SERC. Teleskop, spektrografy, jednu pozemní stanici, raketu a samotný start měla na starost NASA, solární panely k napájení družice a druhou pozemní stanici poskytla ESA a SERC přispělo do projektu čtyřmi detektory pro spektrografy a softwarem [59].



(a) Jádro vědeckých přístrojů IUE a provozní ředitelka IUE I. Tillotson.



(b) Plně sestavená družice IUE v čisté místnosti v Goddard Space Flight Center NASA.

Obrázek 4.2: Družice IUE před vysláním do vesmíru. Zdroj: NASA, MAST [64].

4.3 Technické vybavení

IUE byla první družicí primárně zaměřenou na studium ultrafialových spekter. Vybavena byla dvěma echelletovými spektrografy SWS (Short Wavelength Spectrograph) a LWS (Long Wavelength Spectrograph) s celkovým rozsahem 115 až 325 nm a spektrálním rozlišením 0,02 nebo 0,6 nm. Spektrografy měly k dispozici dvě apertury, větší oválnou, více využívanou, s rozměry 10×20 arcsec a menší kruhovou o průměru 3 arcsec [63].

Jelikož byly k detekci využívány kamery citlivé jen na viditelnou část spektra, bylo nejprve potřeba převést ultrafialový signál pomocí cesiovo-tellurové katody, která pracovala na principu fotoelektrického efektu.

Přítomný teleskop byl reflektor typu Ritchey-Chrétien Cassegrain s hyperbolickým primárním a sekundárním zrcadlem. Primární zrcadlo mělo 45 cm v průměru [58].

4.4 Pozorování

IUE byla první družicí, navrženou se záměrem obsluhování a pozorování v reálném čase. Proto musela být vypuštěna na eliptickou geostacionární orbitu nad Atlantickým oceánem s průměrnou vzdáleností od Země 36 000 km. Pro porovnání, Hubbleův kosmický dalekohled Zemi obíhá na nízké oběžné dráze v průměrné výšce 600 km.

IUE pracovala 24 hodin denně. Kontrolována byla vždy 16 hodin z Goddardova kosmického střediska (Goddard Space Flight Centre, GSFC) v Marylandu na východním pobřeží Spojených států a zbylých 8 hodin byla v rukách Observatoře IUE (Villafranca Satellite Tracking Station, VILSPA) agentury ESA poblíž španělského Madridu [60].

Během téměř dvou dekád své činnosti družice nasbírala více než sto tisíc pozorování velkého počtu zdrojů od objektů Sluneční soustavy až po vzdálené kvasary. Mezi klíčová pozorování IUE se řadí pozorování komet, především Halleyovy komety při jejím průletu periheliem v roce 1986, pozorování výbuchu supernovy SN 1987A ve Velkém Magellanově mračnu, studium mezihvězdné látky Galaxie a aktivních galaktických jader. Signifikantní jsou též výsledky pozorování horkých hvězd a hvězdných větrů [57].

Kapitola 5

Analýza dat: Spektroskopie HD 37776

5.1 Data INES

V naší práci jsme ke zpracování využili volně přístupná data z archivu INES (IUE Newly Extracted Spectra) získané z měření družice IUE. Server poskytující přístup k spektrům zpracovaným systémem INES vyvinul projekt ESA IUE ve VILSPA a je distribuován LAEFF (Laboratory for Space Astrophysics and Fundamental Physics), hlavním centrem pro data INES [65].

Konkrétně jsme využili všechna vhodná spektra příslušející hvězdě HD 37776, t.j. vysokodisperzní ultrafialová spektra s velkým rozlišením (0,2 Å) z kamery SWP (Short Wavelength Prime) s rozsahem 1150 až 1980 Å. K naměření většiny spekter byla využita velká apertura spektrografu (oválná 10×20 arcsec) a expoziční čas okolo 660 s. Dvě spektra vznikla za použití malé kruhové apertury s průměrem 3 arcsec a expozice asi 1000 s.

34 spekter, na kterých stojí naše práce, družice IUE naměřila v rozmezí let 1979 a 1983 a základní informace o nich jsou shrnuty v tabulce 5.1.

5.2 Zpracování UV spekter ve SPLAT-VO

Spektra bylo možné stáhnout z archivu INES ve formátu FITS. Naše první pokusy o zpracování dat probíhaly v programu SPLAT-VO (Castro-Neves a Draper 2014 [11] [66]), volně přístupném nástroji k spektrální analýze. Ukázalo se, že měření jednotlivých čar v tomto programu nedávala relevantní výsledky. Předpokládáme, že tomu tak bylo z důvodu specifického vzhledu našich spekter 5.1 a nejspíš i vzhledu ultrafialových spekter obecně. Pro správné proměření charakteristik spektrálních čar bylo totiž potřeba definovat kontinuum, což bylo v našem případě neúspěšné.

V ultrafialové oblasti je totiž dělení spektra na spojité a čarové téměř bezpředmětné. Kontinuum narušuje mnoho spektrálních čar těžších prvků a úzké interstelární čáry (vznikající v mezihvězdném prostředí) a mnohé čáry i navzájem splývají (Krtička 2015 [26]).

Č. spektra	Apertura	Datum pozor.	Čas pozor. UT	Exp. čas [s]	HJD střed
4839	Velká	03.04.1979	4:19:48	659,736	2443966,68254
6110	Malá	08.08.1979	11:11:03	1014,859	2444093,96856
7530	Malá	02.01.1980	18:17:15	1199,588	2444241,27383
7535	Velká	03.01.1980	2:25:28	569,624	2444241,60922
7539	Velká	03.01.1980	7:02:52	629,835	2444241,80220
7554	Velká	04.01.1980	17:36:11	639,665	2444243,24202
7559	Velká	05.01.1980	0:20:09	659,736	2444243,52266
7561	Velká	05.01.1980	2:42:18	659,736	2444243,62138
7584	Velká	06.01.1980	17:24:41	659,736	2444245,23408
7586	Velká	06.01.1980	19:52:42	659,736	2444245,33687
7588	Velká	06.01.1980	22:16:55	659,736	2444245,43702
7590	Velká	07.01.1980	0:34:29	659,736	2444245,53254
7592	Velká	07.01.1980	3:00:44	659,736	2444245,63411
7608	Velká	08.01.1980	20:37:57	644,580	2444247,36814
7610	Velká	08.01.1980	22:55:08	649,496	2444247,46343
7613	Velká	09.01.1980	2:26:11	654,820	2444247,61002
7615	Velká	09.01.1980	4:58:56	654,820	2444247,71609
7675	Velká	17.01.1980	8:31:25	659,736	2444255,86333
7694	Velká	19.01.1980	9:04:38	779,748	2444257,88698
19102	Velká	28.01.1983	1:33:11	659,736	2445362,57227
19105	Velká	28.01.1983	4:03:56	599,524	2445362,67661
19107	Velká	28.01.1983	5:40:01	599,524	2445362,74332
19109	Velká	28.01.1983	7:17:44	659,736	2445362,81153
19117	Velká	29.01.1983	2:45:00	659,736	2445363,62208
19119	Velká	29.01.1983	4:24:39	659,736	2445363,69127
19122	Velká	29.01.1983	6:46:40	659,736	2445363,78990
19131	Velká	30.01.1983	0:55:51	659,736	2445364,54622
19134	Velká	30.01.1983	4:07:50	659,736	2445364,67953
19136	Velká	30.01.1983	5:42:52	659,736	2445364,74552
19145	Velká	31.01.1983	0:25:35	659,736	2445365,52513
19152	Velká	31.01.1983	6:20:07	659,736	2445365,77133
19333	Velká	27.02.1983	1:28:11	539,723	2445392,56580
19338	Velká	27.02.1983	4:45:15	659,736	2445392,70334
19440	Velká	11.03.1983	0:53:37	659,736	2445404,54143

Tabulka 5.1: Informace o jednotlivých spektrech z archivu INES [65].

5.3 Identifikace spektrálních čar

Nejprve jsme provedli identifikaci spektrálních čar. Spektrum jsme porovnávali s výstupem z programu SYNSPEC (Hubeny a Lanz 2017 [19]), který generuje modelové hvězdné atmosféry a syntetická spektra.

Ve spektru HD 37776 je nejvýraznější absorpční čára z Lymanovy série vodíku Ly α , která vzniká absorpcí záření v mezihvězdném prostředí. Dále jsme identifikovali několik čar odpovídajících iontům křemíku, uhlíku, síry a hliníku. Identifikace je vynesena v grafech 5.1, 5.2 a 5.3 a v tabulkách v příloze 6.1 a 6.2.



Obrázek 5.1: Identifikace spektrálních čar (tabulka 6.1).



Obrázek 5.2: Identifikace spektrálních čar (tabulka 6.2).



Obrázek 5.3: Identifikace spektrálních čar (tabulka 6.2).

5.4 Studium proměnnosti spektrálních čar

Zpracování ultrafialových spekter HD 37776 získaných družicí IUE jsme primárně prováděli v programu QtiPlot.

Spektra z archivu INES zobrazují závislost hustoty spektrálního toku F_{λ} v jednotkách cgs [erg cm⁻² s⁻¹ Å⁻¹] na vlnové délce [Å]. Hustotu spektrálního toku jsme pomocí Pogsonovy rovnice (5.1) přepočítali na hvězdnou velikost

$$m = -2,5 \log \left(\frac{F_{\lambda}}{1 \,\mathrm{erg} \,\mathrm{cm}^{-2} \,\mathrm{s}^{-1} \,\mathrm{\mathring{A}}^{-1}} \right).$$
 (5.1)

V získané závislosti hvězdné velikosti *m* na vlnové délce λ jsme v každém spektru lokálně proložili Lorentzovou funkcí (5.2) pět spektrálních čar (Si IV 1393,755 Å; Si IV 1402,770 Å; C III 1247,383 Å; C IV 1548,187 Å; C IV 1550,772 Å)

$$F(\lambda) = F_0 + \frac{\frac{2A}{\pi w}}{4(\lambda - \lambda_C)^2 + w^2}.$$
(5.2)

Parametry v Lorentzově funkci (5.2) vyjadřují následující: w udává šířku čáry, přesněji FWHM (full width at half maximum neboli plnou šířku v polovině maxima), λ_C je vlnová délka středu čáry, A vyjadřuje plochu a F_0 je posun funkce tedy lokální proložení kontinua.

K prokládání spektrálních čar jsme si zvolili Lorentzovu funkci namísto funkce Gaussovy, protože Lorentzův profil lépe vystihoval průběh čar, především jejich širší křídla. Proložení čar Si IV 1393,755 Å a Si IV 1402,770 Å je ukázáno v grafu 5.4.

Lorentzův profil udává profil čáry rozšířené v důsledku srážek. Srážkové rozšíření vzniká kvůli Coulombově interakci vyzařujícího atomu s okolními částicemi. Narůstá s koncentrací částic, je proto větší pro látku s vyšší hustotou (tlakem). Gaussův profil spektrální čáry má užší křídla a odpovídá Dopplerovu rozšíření v důsledku neuspořádaného tepelného pohybu částic. Dopplerovo rozšíření je důležité pro látku s nízkou hustotou a vysokou teplotou. Výsledkem konvoluce Lorentzova a Gaussova profilu je Voigtův profil (Krtička 2015 [26]).



Obrázek 5.4: Proložení spektrálních čar Si IV Lorentzovým profilem.

V hlavičce každého spektra je možné zjistit HJD, Juliánské datum pro střed pozorování opravené o heliocentrickou korekci. Pro sestrojení fázových křivek charakteristik spektrálních čar bylo potřeba pro každé spektrum převést čas pozorování ve tvaru HJD na fázi.

U hvězd s konstantní rotační periodou se fáze vypočítá ze vztahu (5.3), kde funkce frac vypočte desetinnou část reálného čísla, t je čas ve tvaru HJD, M_0 je základní okamžik nulové fáze a P je perioda

$$\varphi = \operatorname{frac} \frac{t - M_0}{P}.$$
(5.3)

Perioda rotace hvězdy HD 37776 je ale s časem proměnná (Mikulášek et al. 2007 [30]). Pro výpočet fáze musíme využít složitější vztah pro fázovou funkci (5.4) (Mikulášek et al. in prep., Krtička et al. 2022 [27])

$$\vartheta(t) = \vartheta_0 - \frac{1}{2} \dot{P}_0 \,\vartheta_0^2 - \frac{1}{6} P_0 \ddot{P}_0 \,\vartheta_0^3, \qquad (5.4)$$
$$\vartheta_0 = \frac{t - M_0}{P_0}, \\P_0 = 1,538\,736(2)\,\mathrm{d}, \\\dot{P}_0 = -1,51(4) \cdot 10^{-8}, \\\ddot{P}_0 = -3,07(12) \cdot 10^{11}\,\mathrm{d}^{-1}, \\M_0 = 2459\,580,715(5).$$

Fázová funkce ϑ je v tomto případě popsána čtyřmi parametry: M_0 , P_0 , \dot{P}_0 , \ddot{P}_0 . Čas t je ve tvaru HJD. Hledanou fázi φ poté vypočteme jako $\varphi = \text{frac } \vartheta$.

Naměřené charakteristiky spektrálních čar (*a* [mag], *w* [Å], λ_C [Å]), které jsme získali prokladem Lorentzovým profilem, jsou včetně průměrných hodnot vypsány pro každé spektrum v příloze v tabulkách 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 a 6.7. Všechny v grafech vyobrazené nejistoty jsme vypočetli z nejistoty prokladu čar.

Pro grafické zobrazení fázových závislostí našich výsledků jsme provedli ještě několik přepočtů: Změnu hloubky spektrální čáry Δa jsme vypočetli jako rozdíl hloubky čáry aa průměrné hloubky čáry \overline{a} . Změna šířky čáry Δw byla získána jako rozdíl šířky čáry wa průměrné šířky čáry \overline{w} . Přepočty na Δa a Δw byly provedeny zejména kvůli společnému vynesení dubletů čar Si IV a C IV. Radiální rychlosti čar v_{rad} jsme vypočetli jako

$$v_{\rm rad} = \frac{\lambda_C - \lambda_{\rm lab}}{\lambda_{\rm lab}} c,$$
 (5.5)

kde λ_C je naměřená vlnová délka středu čáry, λ_{lab} je laboratorní vlnová délka čáry a c je rychlost světla.

Charakteristiky spektrálních čar Si IV 1393,755 Å a Si IV 1402,770 Å jsme do grafů vynášeli společně. Změny hloubek spektrálních čar Δa v závislosti na fázi jsou vyneseny v grafu 5.5. Fázové závislosti změn šířek čar Δw a radiálních rychlostí čar v_{rad} jsou v grafech 5.6 a 5.7.

Na obrázcích 5.8, 5.9 a 5.10 jsou fázové křivky přepočtených charakteristik Δa , Δw a v_{rad} spektrální čáry C III 1247,383 Å.

Přepočtené charakteristiky spektrálních čar C IV 1548,187 Å a C IV 1550,772 Å v závislosti na fázi, jsou do grafů 5.11, 5.12 a 5.13 vyneseny společně.



Obrázek 5.5: Naměřená fázová křivka změny hloubky čar Si IV.



Obrázek 5.6: Naměřená fázová křivka změny šířky čar Si IV.



Obrázek 5.7: Naměřená fázová křivka radiální rychlosti čar Si IV.



Obrázek 5.8: Naměřená fázová křivka změny hloubky čáry C III.



Obrázek 5.9: Naměřená fázová křivka změny šířky čáry C III.



Obrázek 5.10: Naměřená fázová křivka radiální rychlosti čáry C III.



Obrázek 5.11: Naměřená fázová křivka změny hloubky čar C IV.



Obrázek 5.12: Naměřená fázová křivka změny šířky čar C IV.



Obrázek 5.13: Naměřená fázová křivka radiální rychlosti čar C IV.

Kapitola 6

Diskuze výsledků

6.1 Čáry hvězdného větru: Si IV a C IV

Ze všech naměřených charakteristik dávají nejzajímavější výsledky fázové křivky hloubek spektrálních čar pro dublet Si IV (1393,755 Å a 1402,770 Å) a pro dublet C IV (1548,187 Å a 1550,772 Å), které jsou na obrázcích 5.5 a 5.11. Jejich průběh velmi dobře koreluje s průběhem podélné složky magnetické indukce magnetického pole hvězdy (obrázek 6.2) z článku Mikulášek et al. 2020 [33]. Grafy změn hloubek čar Si IV a podélné složky magnetického pole jsou pro porovnání vyneseny pod sebe na straně 34.

Možným vysvětlením vzájemného vztahu těchto dvou veličin je původ iontů, kterým odpovídají tyto spektrální čáry. Třikrát ionizovaný křemík (Si IV) a třikrát ionizovaný uhlík (C IV) pochází z hvězdného větru hvězdy (Barker et al. 1982 [4]). Tento fakt by mohl dokazovat i profil spektrálních čar typu P Cygni. U čáry Si IV 1393,755 Å je ale v obrázku 5.4 vidět, že v jejím profilu emisní část téměř úplně chybí.

Nabité částice hvězdného větru se pohybují podél magnetických siločar. V místech, kde je magnetické pole kolmé k povrchu hvězdy, působí na částice větší síla. A jelikož hloubka čáry pocházející z hvězdného větru vyjadřuje míru ztráty hmoty hvězdy hvězdným větrem (Owocki a ud-Doula 2004 [39], ud-Doula a Owocki 2002 [50]), tak fázové křivky hloubek spektrálních čar souvisí s fázovou závislostí magnetického pole. Kromě sklonu magnetického pole ovlivňuje ztrátu hmoty hvězdným větrem (potažmo hloubku čáry) i chemické složení atmosféry hvězdy.

Fázové křivky změn šířek čar jsou složité a není v nich zřetelná žádná závislost (obrázky 5.6 a 5.12). Křivky radiálních rychlostí čar (obrázky 5.7 a 5.13) ale obsahují maxima a minima a mohly by též souviset s průběhem podélného magnetického pole hvězdy, podobně jako fázové křivky změn hloubek čar.

6.2 Čára z povrchu hvězdy: C III

Výsledky pro čáru dvakrát ionizovaného uhlíku C III 1247,383 Å ukazují, že se jedná o uhlík ve skvrnách na povrchu hvězdy. Fázová křivka změny hloubky čáry 6.3 vykazuje velmi podobnou závislost jako fázová světelná křivka 6.4 z článku Mikulášek et al. 2020 [33]. Porovnání obou závislostí je na straně 35. Šířky i radiální rychlosti čáry se s fází mění velmi málo a jejich průběh žádné zajímavé vlastnosti nevykazuje.



Obrázek 6.1: Naměřená fázová křivka změny hloubky čar Si IV.



Obrázek 6.2: Fázová křivka středního podélného magnetického pole hvězdy HD 37776. V legendě je popsán původ spektropolarimetrických měření, která byla provedena v letech 1979 až 2018. Převzato z Mikulášek et al. 2020 [33].



Obrázek 6.3: Naměřená fázová křivka změny hloubky čáry C III.



Obrázek 6.4: Detailní fázová světelná křivka hvězdy HD 37776, naměřená družicí TESS, z článku Mikulášek et al. 2020 [33].

Závěr

V této bakalářské práci jsme se zaměřili na ultrafialovou spektroskopii horké a chemicky pekuliární hvězdy HD 37776.

Z publikací, skript a vědeckých článků jsme nejprve vypracovali teoretické kapitoly, ve kterých jsou shrnuty informace o horkých hvězdách, chemicky pekuliárních hvězdách, hvězdě HD 37776 a ultrafialové družici IUE.

Ultrafialová spektra hvězdy HD 37776 naměřená družicí IUE v letech 1979 až 1983 jsme získali z archivu INES. Ve spektrech jsme identifikovali 45 spektrálních čar (grafy 5.1, 5.2 a 5.3) a u pěti vybraných čar jsme zkoumali jejich proměnnost v závislosti na rotační fázi hvězdy. Konkrétně jsme prokladem spektrálních čar Si IV 1393,755 Å, Si IV 1402,770 Å, C III 1247,383 Å, C IV 1548,187 Å a C IV 1550,772 Å Lorentzovým profilem získali fázové závislosti změn hloubek, změn šířek a radiálních rychlostí těchto čar.

Dva dublety rezonančních spektrálních čar, patřící třikrát ionizovanému křemíku Si IV a třikrát ionizovanému uhlíku C IV, pochází z hvězdného větru. Zjistili jsme, že fázová proměnnost hloubek těchto čar dobře koreluje se složitým fázovým průběhem magnetického pole hvězdy (strana 34 a obrázek 5.11). Tuto souvislost objevili i Shore a Brown 1990 [45], využili ale méně spekter, starší měření magnetického pole hvězdy a nebrali v potaz proměnnou rotační periodu hvězdy. Naše práce se s prací Shore a Brown 1990 [45] shoduje i v poznatku, že se šířky rezonančních čar příliš nemění.

Fázová křivka změny hloubky spektrální čáry C III 1247,383 Å opisovala průběh světelné křivky (strana 35) a dokazovala tím, že se tento dvakrát ionizovaný uhlík nachází ve spektroskopických skvrnách na povrchu hvězdy.

Do budoucna by bylo určitě podnětné provést obdobné zpracování zbylých identifikovaných spektrálních čar a najít model, který by popisoval korelaci proměnnosti spektrálních čar a magnetického pole hvězdy.

Příloha



Obrázek 6.5: Černobílá astrofotografie ve filtru H α okolí hvězdy HD 37776 (růžově vyznačená hvězda nalevo). Okolo ní je patrná emisní mlhovina IC 432, oblast H II, která rozptyluje záření hvězdy a zároveň je ultrafialovým zářením hvězdy ionizována (Kovačíková 2012 [23]). Napravo od ní, oranžově vyznačená, jasná hvězda z Orionova pásu Alnitak (ζ Ori). Šipkami jsou označené mlhoviny, zleva; emisní mlhovina Plamínek (NGC 2024) a temná mlhovina Koňská hlava (Barnard 33) v popředí H II regionu IC 434. Fotografie je propůjčena z [68].

λ [Å]	Prvek	Iont	Odhad EW [mÅ]
1174,933	С	III	203,6
1175,263	С	III	180,3
1175,590	С	III	160,2
1175,711	С	III	332,1
1175,987	С	III	180,4
1176,370	С	III	203,6
1190,416	Si	II	66,7
1193,290	Si	II	72,3
1194,500	Si	II	113,3
1206,500	Si	III	1299,1
1206,555	Si	III	212,7
1247,383	С	III	54,1
1250,584	S	II	35,9
1259,519	S	II	37,6
1260,422	Si	II	47,5
1264,738	Si	II	49,2
1265,002	Si	II	38,7
1294,545	Si	III	191,1
1296,726	Si	III	173,9
1298,892	Si	III	149,4
1298,946	Si	III	274,8

Tabulka 6.1: Identifikace spektrálních čar pro obrázek 5.1. V posledním sloupci odhad EW jsou odhady ekvivalentních šířek čar z programu SYNSPEC.

λ [Å]	Prvek	Iont	Odhad EW [mÅ]
1301,149	Si	III	174,1
1303,323	Si	III	191,4
1305,592	Si	II	263,2
1309,453	Si	II	219,9
1323,862	C	II	46,3
1323,906	C	II	56,2
1323,951	C	II	57,4
1323,995	C	II	46,3
1334,532	C	II	70,3
1335,663	C	II	67
1335,708	C	II	71,2
1393,755	Si	IV	1836,9
1402,770	Si	IV	1295,4
1417,237	Si	III	116,3
1526,707	Si	II	46,7
1548,187	C	IV	40,1
1550,772	C	IV	32,5
1670,787	Al	II	52,5
1760,395	C	II	63,2
1760,473	С	II	41,2
1760,819	C	II	58,7
1854,716	Al	III	182,4
1862,790	Al	III	145,8

Tabulka 6.2: Identifikace spektrálních čar pro obrázek 5.2 a 5.3. V posledním sloupci odhad EW jsou odhady ekvivalentních šířek čar z programu SYNSPEC.

HJD	a [mag]	w [Å]	λ_C [Å]
2443966,68254	1,3428	0,8398	1393,9344
2444093,96856	1,0119	1,2104	1394,0403
2444241,27383	1,0024	1,0533	1393,9579
2444241,60922	1,3103	1,0684	1393,9153
2444241,80220	0,9691	1,1074	1393,8855
2444243,24202	0,9683	1,1926	1393,9207
2444243,52266	0,9392	0,8796	1393,8582
2444243,62138	1,2057	0,9001	1393,8818
2444245,23408	0,9758	1,1085	1393,8756
2444245,33687	0,9611	1,1872	1393,8778
2444245,43702	1,1278	1,1760	1393,8579
2444245,53254	1,1034	1,2206	1393,8721
2444245,63411	1,0004	1,3453	1393,9335
2444247,36814	1,0435	0,9860	1393,8204
2444247,46343	0,9003	0,9893	1393,8747
2444247,61002	0,8826	1,0064	1393,8722
2444247,71609	1,2974	0,9983	1393,8811
2444255,86333	0,9003	0,9937	1393,8254
2444257,88698	1,1370	1,2349	1393,8724
2445362,57227	1,1598	1,2026	1393,8388
2445362,67661	1,0092	1,4489	1393,9104
2445362,74332	0,9321	1,2397	1393,9157
2445362,81153	0,9258	1,3173	1393,9585
2445363,62208	0,7307	1,0297	1393,8424
2445363,69127	0,9839	0,9352	1393,8155
2445363,78990	1,0668	1,0231	1393,8911
2445364,54622	0,7541	1,1500	1393,8678
2445364,67953	0,8726	1,1278	1393,8351
2445364,74552	1,0405	1,2317	1393,8685
2445365,52513	1,0193	1,2103	1393,8476
2445365,77133	0,9778	1,2404	1393,9185
2445392,56580	1,2014	0,8901	1393,9185
2445392,70334	0,9940	0,9965	1393,8258
2445404,54143	0,7674	1,1446	1393,9104

Tabulka 6.3: Získané charakteristiky spektrální čáry Si IV 1393,755 Å, *a* je hloubka čáry, *w* je šířka čáry a λ_C je vlnová délka středu čáry. Průměrné hodnoty jsou: $\overline{a} = 1,01514$ mag; $\overline{w} = 1,1084$ Å. $\lambda_{lab} = 1393,755$ Å.

HJD	a [mag]	w [Å]	$\lambda_C [Å]$
2443966,68254	1,0217	0,6523	1402,9184
2444093,96856	0,8656	0,6965	1402,9745
2444241,27383	0,8208	0,6264	1402,9681
2444241,60922	1,0944	0,7840	1402,9405
2444241,80220	0,8026	0,8634	1402,8920
2444243,24202	0,8342	0,9224	1402,9148
2444243,52266	0,7591	0,6786	1402,8749
2444243,62138	0,8923	0,7242	1402,9087
2444245,23408	0,7904	0,8244	1402,8618
2444245,33687	0,7819	0,9356	1402,8574
2444245,43702	0,8704	0,8351	1402,8934
2444245,53254	0,8769	0,9722	1402,8761
2444245,63411	0,8342	0,8918	1402,9173
2444247,36814	0,8226	0,7837	1402,8584
2444247,46343	0,7207	0,7807	1402,9220
2444247,61002	0,7756	0,7588	1402,8869
2444247,71609	1,0470	0,9057	1402,8975
2444255,86333	0,8420	0,6371	1402,9133
2444257,88698	0,9456	0,8503	1402,8898
2445362,57227	0,9022	1,1076	1402,8368
2445362,67661	1,0267	0,7400	1402,9197
2445362,74332	0,7325	1,0667	1402,9311
2445362,81153	0,7467	1,0650	1402,9169
2445363,62208	0,6488	0,8431	1402,8389
2445363,69127	0,8054	0,7337	1402,8578
2445363,78990	0,9350	0,7571	1402,9552
2445364,54622	0,6143	0,9909	1402,9129
2445364,67953	0,7815	0,9502	1402,8571
2445364,74552	1,0273	0,8512	1402,8994
2445365,52513	0,8784	0,9629	1402,8585
2445365,77133	0,9437	0,8117	1402,9400
2445392,56580	1,0060	0,8833	1402,9092
2445392,70334	0,7871	1,0130	1402,8551
2445404,54143	0,6898	0,8981	1402,9029

Tabulka 6.4: Získané charakteristiky spektrální čáry Si IV 1402,770 Å, *a* je hloubka čáry, *w* je šířka čáry a λ_C je vlnová délka středu čáry. Průměrné hodnoty jsou: $\overline{a} = 0,8507$ mag; $\overline{w} = 0,8470$ Å. $\lambda_{lab} = 1402,770$ Å.

HJD	a [mag]	w [Å]	λ_C [Å]
2443966,68254	0,4107	0,8221	1247,4534
2444093,96856	0,4169	0,8871	1247,4254
2444241,27383	0,4740	0,9390	1247,3521
2444241,60922	0,5107	0,4982	1247,5515
2444241,80220	0,4703	0,6596	1247,5578
2444243,24202	0,4030	0,7811	1247,5326
2444243,52266	0,3806	0,8574	1247,5555
2444243,62138	0,4998	0,8231	1247,4525
2444245,23408	0,4468	0,7040	1247,4845
2444245,33687	0,4866	0,5992	1247,5594
2444245,43702	0,6290	0,5780	1247,5316
2444245,53254	0,5038	0,9679	1247,4807
2444245,63411	0,5386	1,1749	1247,6079
2444247,36814	0,4712	0,8254	1247,5359
2444247,46343	0,4574	0,6153	1247,5673
2444247,61002	0,3919	1,1162	1247,5461
2444247,71609	0,4151	0,8843	1247,5640
2444255,86333	0,4396	0,7561	1247,5701
2444257,88698	0,5356	0,8688	1247,4992
2445362,57227	0,5352	0,6724	1247,5368
2445362,67661	0,5851	0,8333	1247,5493
2445362,74332	0,5407	0,6178	1247,5072
2445362,81153	0,5261	0,6688	1247,5644
2445363,62208	0,4549	0,5968	1247,5572
2445363,69127	0,4129	0,7485	1247,5826
2445363,78990	0,4962	0,6265	1247,4842
2445364,54622	0,4247	0,5947	1247,5810
2445364,67953	0,3835	0,7286	1247,4889
2445364,74552	0,4409	0,7246	1247,4999
2445365,52513	0,5128	0,6128	1247,5400
2445365,77133	0,5071	0,7934	1247,5197
2445392,56580	0,5113	0,6864	1247,4727
2445392,70334	0,5826	0,6009	1247,5805
2445404,54143	0,4732	0,6094	1247,5158

Tabulka 6.5: Získané charakteristiky spektrální čáry C III 1247,383 Å, *a* je hloubka čáry, *w* je šířka čáry a λ_C je vlnová délka středu čáry. Průměrné hodnoty jsou: $\overline{a} = 0,7492$ mag; $\overline{w} = 0,4785$ Å. $\lambda_{lab} = 1247,383$ Å.

HJD	a [mag]	w [Å]	λ_C [Å]
2443966,68254	1,3581	0,5590	1548,2885
2444093,96856	0,8834	0,5917	1548,2622
2444241,27383	1,1333	0,5059	1548,3330
2444241,60922	1,4789	0,6329	1548,2778
2444241,80220	1,2816	0,5383	1548,2304
2444243,24202	1,0516	0,4925	1548,2304
2444243,52266	1,0868	0,4462	1548,1942
2444243,62138	1,4447	0,6042	1548,2545
2444245,23408	0,8589	0,6202	1548,1977
2444245,33687	0,9000	0,5107	1548,1281
2444245,43702	1,0367	0,5494	1548,1631
2444245,53254	1,2928	0,4655	1548,2030
2444245,63411	1,0034	0,3759	1548,2335
2444247,36814	0,9827	0,5255	1548,1252
2444247,46343	0,9465	0,4498	1548,2656
2444247,61002	1,0772	0,4924	1548,1767
2444247,71609	1,8559	0,5570	1548,2354
2444255,86333	1,2258	0,5599	1548,2003
2444257,88698	1,0884	0,4994	1548,2129
2445362,57227	1,3095	0,5131	1548,2006
2445362,67661	0,8961	0,4665	1548,1900
2445362,74332	0,7365	0,3392	1548,1779
2445362,81153	0,7401	0,3305	1548,1650
2445363,62208	0,9502	0,4228	1548,1668
2445363,69127	1,2890	0,5133	1548,2213
2445363,78990	1,1539	0,5998	1548,2624
2445364,54622	0,7369	0,5419	1548,2080
2445364,67953	0,9291	0,6326	1548,1473
2445364,74552	1,4026	0,6296	1548,1941
2445365,52513	1,0573	0,5086	1548,1651
2445365,77133	0,6640	0,4162	1548,2504
2445392,56580	1,5458	0,3937	1548,1555
2445392,70334	1,1359	0,5786	1548,1896
2445404,54143	0,7771	0,5415	1548,1661

Tabulka 6.6: Získané charakteristiky spektrální čáry C IV 1548,187 Å, *a* je hloubka čáry, *w* je šířka čáry a λ_C je vlnová délka středu čáry. Průměrné hodnoty jsou: $\overline{a} = 1,0974$ mag; $\overline{w} = 0,5119$ Å. $\lambda_{lab} = 1548,187$ Å.

HJD	a [mag]	w [Å]	λ_C [Å]
2443966,68254	0,8875	0,5729	1550,9587
2444093,96856	0,6650	0,8280	1550,9804
2444241,27383	0,8067	0,6482	1550,8947
2444241,60922	1,0627	0,6601	1550,9541
2444241,80220	0,8165	0,5912	1550,8189
2444243,24202	0,5390	0,7342	1550,9537
2444243,52266	0,6976	0,4998	1550,8522
2444243,62138	1,0394	0,5998	1550,9206
2444245,23408	0,6139	0,7031	1550,9662
2444245,33687	0,5234	0,5478	1550,8690
2444245,43702	0,7087	0,5418	1550,8208
2444245,53254	0,7563	0,6384	1550,8959
2444245,63411	0,5626	0,6100	1551,0181
2444247,36814	0,7035	0,5055	1550,7596
2444247,46343	0,4944	0,6562	1550,8715
2444247,61002	0,8037	0,4080	1550,7995
2444247,71609	1,0775	0,6378	1550,8647
2444255,86333	0,7236	0,5764	1550,8058
2444257,88698	0,6906	0,6135	1550,8907
2445362,57227	0,8006	0,6365	1550,9329
2445362,67661	0,6354	0,6297	1550,9011
2445362,74332	0,4069	0,4558	1551,0164
2445362,81153	0,4187	0,5389	1550,8110
2445363,62208	0,7093	0,4846	1550,7832
2445363,69127	0,9182	0,5766	1550,8384
2445363,78990	0,8814	0,5597	1550,9544
2445364,54622	0,5924	0,5468	1550,8857
2445364,67953	0,8557	0,5527	1550,7956
2445364,74552	1,1418	0,6171	1550,8905
2445365,52513	0,6023	0,6303	1550,8301
2445365,77133	0,4770	0,5813	1550,9500
2445392,56580	0,7603	0,6952	1550,9114
2445392,70334	0,7911	0,5761	1550,8096
2445404,54143	0,4894	0,6647	1550,9315

Tabulka 6.7: Získané charakteristiky spektrální čáry C IV 1550,772 Å, *a* je hloubka čáry, *w* je šířka čáry a λ_C je vlnová délka středu čáry. Průměrné hodnoty jsou: $\overline{a} = 0,7251$ mag; $\overline{w} = 0,5976$ Å. $\lambda_{lab} = 1550,772$ Å.

Seznam použité literatury

- Abt, H. A., Levato, H., and Grosso, M., "Rotational Velocities of B Stars", The Astrophysical Journal, vol. 573, no. 1, pp. 359–365, 2002. doi:10.1086/340590.
- [2] Alecian, E., Wade, G. A., Catala, C., et al., "Magnetism in pre-MS intermediate-mass stars and the fossil field hypothesis", Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, vol. 38, no. 2, pp. 235–244, 2008. doi:10.48550/arXiv.0712.0199.
- [3] Alecian, E., "Magnetic fields along the pre-main-sequence phase", in Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars, 2014, pp. 84–92. doi:10.48550/arXiv.1310.1725.
- [4] Barker, P. K., Brown, D. N., Bolton, C. T., and Landstreet, J. D. 1982, Magnetospheres and winds of the helium strong stars: Dependence on rotation, in Advances in Ultraviolet Astronomy: Four Years of IUE Research, ed. Y. Kondo, J. M. Mead, and R. D. Chapman (NASA CP-2238), p. 589.
- [5] Boggess, A., Carr, F. A., Evans, D. C., et al., "The IUE spacecraft and instrumentation", Nature, vol. 275, no. 5679, pp. 372–377, 1978. doi:10.1038/275372a0.
- [6] Boggess, A., Bohlin, R. C., Evans, D. C., et al., "In-flight performance of the IUE", Nature, vol. 275, pp. 377–385, 1978. doi:10.1038/275377a0.
- [7] Bogomazov, A. I. and Tutukov, A. V., "Merging of components in close binaries: Type Ia supernovae, massive white dwarfs, and Ap stars", Astronomy Reports, vol. 53, no. 3, pp. 214–222, 2009. doi:10.1134/S1063772909030032.
- [8] Bohlender, D. A., "Observations of magnetic fields in B stars.", in Pulsation; Rotation; and Mass Loss in Early-Type Stars, 1994, vol. 162, pp. 155–166.
- [9] Borra, E. F. and Landstreet, J. D., "The magnetic field of the helium-strong stars.", The Astrophysical Journal, vol. 228, pp. 809–816, 1979. doi:10.1086/156907.
- [10] Cassinelli, J. P. and MacGregor, K. B., "The Rise of a Magnetic Flux Tube through the Radiative Envelope of a 9 M_{solar} Star", in IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars, 2000, vol. 214, p. 337.
- [11] Castro-Neves, M. and Draper, P. W., "SPLAT-VO: Spectral Analysis Tool for the Virtual Observatory", Astrophysics Source Code Library, 2014. ascl:1402.008.

- [12] Cidale, L. S., Arias, M. L., Torres, A. F., Zorec, J., Frémat, Y., and Cruzado, A., "Fundamental parameters of He-weak and He-strong stars", Astronomy and Astrophysics, vol. 468, no. 1, pp. 263–272, 2007. doi:10.1051/0004-6361:20066454.
- [13] Cox, Arthur N. Allen's Astrophysical Quantities. 4. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4612-1186-0
- [14] Duband, L., "Space Cryocooler Developments", Physics Procedia, vol. 67, pp. 1–10, 2015. doi:10.1016/j.phpro.2015.06.003.
- [15] Ducati, J. R., "VizieR Online Data Catalog: Catalogue of Stellar Photometry in Johnson's 11-color system.", VizieR Online Data Catalog, 2002.
- [16] Gaia Collaboration, "VizieR Online Data Catalog: Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, 2020)", VizieR Online Data Catalog, 2020.
- [17] Houk, N. and Swift, C., Michigan catalogue of two-dimensional spectral types for the HD Stars ; vol. 5, vol. 5. 1999.
- [18] Hubeny, Ivan a Dimitri Mihalas. Theory of Stellar Atmospheres: An Introduction to Astrophysical Non-equilibrium Quantitative Spectroscopic Analysis. UK, Princeton University Press, 6 Oxford Street, Woodstock, Oxfordshire: Princeton University Press, 2014. ISBN 978-0-691-16328-4.
- [19] Hubeny, I. and Lanz, T., "A brief introductory guide to TLUSTY and SYNSPEC", arXiv e-prints, 2017. doi:10.48550/arXiv.1706.01859.
- [20] Khokhlova, V. L., Vasilchenko, D. V., Stepanov, V. V., and Romanyuk, I. I., "Doppler-Zeeman Mapping of the Rapidly Rotating Magnetic CP Star HD37776", Astronomy Letters, vol. 26, pp. 177–191, 2000. doi:10.1134/1.20380.
- [21] Kochukhov, O., Lundin, A., Romanyuk, I., and Kudryavtsev, D., "The Extraordinary Complex Magnetic Field of the Helium-strong Star HD 37776", The Astrophysical Journal, vol. 726, no. 1, 2011. doi:10.1088/0004-637X/726/1/24.
- [22] Korhonen, H., "Element spots in HgMn stars", in Putting A Stars into Context: Evolution, Environment, and Related Stars, 2014, pp. 173–181. doi:10.48550/arXiv.1310.3686.
- [23] Kovačíková, Kamila. Studium emisního spektra mlhoviny v okolí hvězdy HD 37776 [online]. Brno, 2012 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/ uef1s/. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
- [24] Krtička, J., Mikulášek, Z., Zverko, J., and Žižňovský, J., "The light variability of the helium strong star HD 37776 as a result of its inhomogeneous elemental surface distribution", Astronomy and Astrophysics, vol. 470, no. 3, pp. 1089–1098, 2007. doi:10.1051/0004-6361:20066627.

- [25] Krtička, J., Mikulášek, Z., Lüftinger, T., "Modelling of the ultraviolet and visual SED variability in the hot magnetic Ap star CU Virginis", Astronomy and Astrophysics, vol. 537, 2012. doi:10.1051/0004-6361/201117490.
- [26] Krtička, Jiří. Horké hvězdy II. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2015.
- [27] Krtička, J., Mikulášek, Z., Kurfürst, P., and Oksala, M. E., "Photometric signatures of corotating magnetospheres of hot stars governed by higher-order magnetic multipoles", Astronomy and Astrophysics, vol. 659, 2022. doi:10.1051/0004-6361/202141997.
- [28] Landstreet, J. D., Bagnulo, S., Andretta, V., et al., "Searching for links between magnetic fields and stellar evolution: II. The evolution of magnetic fields as revealed by observations of Ap stars in open clusters and associations", Astronomy and Astrophysics, vol. 470, no. 2, pp. 685–698, 2007. doi:10.1051/0004-6361:20077343.
- [29] Michaud, G., Megessier, C., and Charland, Y., "Diffusion models for magnetic Ap-Bp stars.", Astronomy and Astrophysics, vol. 103, pp. 244–262, 1981.
- [30] Mikulášek, Z., Krtička, J., Zverko, J., Žižňovský, J., and Janík, J., "Light Variations and Angular Momentum Loss from the He-Strong Magnetic Chemically Peculiar Star HD 37776", in Active OB-Stars: Laboratories for Stellare and Circumstellar Physics, 2007, vol. 361, p. 466. doi:10.48550/arXiv.astro-ph/0509751.
- [31] Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., et al., "The extremely rapid rotational braking of the magnetic helium-strong star HD 37776", Astronomy and Astrophysics, vol. 485, no. 2, pp. 585–597, 2008. doi:10.1051/0004-6361:20077794.
- [32] Mikulášek, Z., Krtička, J., Henry, G. W., et al., "Surprising variations in the rotation of the chemically peculiar stars CU Virginis and V901 Orionis", Astronomy and Astrophysics, vol. 534, 2011. doi:10.1051/0004-6361/201117784.
- [33] Mikulášek, Z., Krtička, J., Shultz, M. E., et al., "What's New with Landstreet's Star HD 37776 (V901 Ori)?", in Stellar Magnetism: A Workshop in Honour of the Career and Contributions of John D. Landstreet, 2020, vol. 11, pp. 46–53. doi:10.48550/arXiv.1912.04121.
- [34] Mikulášek, Zdeněk. Fyzika horkých hvězd I. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2021.
- [35] Mikulášek, Zdeněk a Jiří Krtička. Základy fyziky hvězd. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2005
- [36] Mikulášek, Zdeněk a Miloslav Zejda. Úvod do studia proměnných hvězd. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2013. ISBN 978-80-210-6241-2.
- [37] Murphy, S. J., "Investigating the A-Type Stars Using Kepler Data", PhDT, 2014. doi:10.1007/978-3-319-09417-5.

- [38] Nissen, P. E., "Evidence of helium abundance differences between young groups of stars.", Astronomy and Astrophysics, vol. 50, pp. 343–352, 1976.
- [39] Owocki, S. P. and ud-Doula, A., "The Effect of Magnetic Field Tilt and Divergence on the Mass Flux and Flow Speed in a Line-driven Stellar Wind", The Astrophysical Journal, vol. 600, no. 2, pp. 1004–1015, 2004. doi:10.1086/380123.
- [40] Petit, V., "A magnetic confinement versus rotation classification of massive-star magnetospheres", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 429, no. 1, pp. 398–422, 2013. doi:10.1093/mnras/sts344.
- [41] Preston, G. W., "The chemically peculiar stars of the upper main sequence.", Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 12, pp. 257–277, 1974. doi:10.1146/annurev.aa.12.090174.001353.
- [42] Prvák, M., Liška, J., Krtička, J., Mikulášek, Z., and Lüftinger, T., "Modelling of variability of the chemically peculiar star Φ Draconis", Astronomy and Astrophysics, vol. 584, 2015. doi:10.1051/0004-6361/201526647.
- [43] Schneider, F. R. N., Ohlmann, S. T., Podsiadlowski, P., et al., "Stellar mergers as the origin of magnetic massive stars", Nature, vol. 574, no. 7777, pp. 211–214, 2019. doi:10.1038/s41586-019-1621-5.
- [44] Schöller, M. and Hubrig, S., "Magnetic chemically peculiar stars", arXiv e-prints, 2015. doi:10.48550/arXiv.1501.04225.
- [45] Shore, S. N. and Brown, D. N., "Magnetically Controlled Circumstellar Matter in the Helium-strong Stars", The Astrophysical Journal, vol. 365, p. 665, 1990. doi:10.1086/169520.
- [46] Stibbs, D. W. N., "A study of the spectrum and magnetic variable star HD 125248", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 110, p. 395, 1950. doi:10.1093/mnras/110.4.395.
- [47] Štefl, Vladimír. Fyzika chladných hvězd. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně, Ústav teoretické fyziky a astrofyziky, 2022.
- [48] Thompson, I. B. and Landstreet, J. D., "The extraordinary magnetic variation of the helium-strong star HD 37776 : a quadrupole field configuration.", The Astrophysical Journal, vol. 289, pp. L9–L13, 1985. doi:10.1086/184424.
- [49] Townsend, R. H. D. and Owocki, S. P., "A rigidly rotating magnetosphere model for circumstellar emission from magnetic OB stars", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 357, no. 1, pp. 251–264, 2005. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.08642.x.
- [50] ud-Doula, A. and Owocki, S. P., "Dynamical Simulations of Magnetically Channeled Line-driven Stellar Winds. I. Isothermal, Nonrotating, Radially Driven Flow", The Astrophysical Journal, vol. 576, no. 1, pp. 413–428, 2002. doi:10.1086/341543.

- [51] Vauclair, S., "Mi Explanation for Helium-rich and Helium-variable Stars", Astronomy and Astrophysics, vol. 45, p. 233, 1975.
- [52] Warren, W. H. and Hesser, J. E., "A photometric study of the Orion OB 1 association. III. Subgroup analyses.", The Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 36, pp. 497–572, 1978. doi:10.1086/190510.
- [53] Wright, N. J., "OB Associations and their origins", New Astronomy Reviews, vol. 90, 2020. doi:10.1016/j.newar.2020.101549.
- [54] Wright, N. J., Goodwin, S., Jeffries, R. D., Kounkel, M., and Zari, E., "OB Associations", arXiv e-prints, 2022. doi:10.48550/arXiv.2203.10007.
- [55] Xia, Caiyun. Vývojové změny periody rotace horkých chemicky pekuliárních hvězd. Brno, 2019. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky. Vedoucí práce Prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
- [56] Zorec, J. and Royer, F., "Rotational velocities of A-type stars. IV. Evolution of rotational velocities", Astronomy and Astrophysics, vol. 537, 2012. doi:10.1051/0004-6361/201117691.
- [57] IUE [online]. ESA: European Space Agency, 2019 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://sci.esa.int/web/iue/
- [58] IUE Description [online]. NASA: Space Science Data Coordinated Archive [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/ spacecraft/display.action?id=1978-012A
- [59] The Early History of IUE [online]. The Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST), 2007 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://archive.stsci. edu/iue/history.html
- [60] IUE overview [online]. ESA: European Space Agency [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/IUE_ overview
- [61] Ultraviolet telescope [online]. Encyclopedia Britannica, 2017 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/ultraviolet-telescope
- [62] International Ultraviolet Explorer [online]. DeVorkin, David H., Encyclopedia Britannica, 2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.britannica.com/ topic/International-Ultraviolet-Explorer
- [63] IUE: Scientific Instrument [online]. The Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST), 2007 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://archive.stsci. edu/iue/instrument.html
- [64] Pre-Launch Images of IUE: Obtained from IUE project at Goddard Space Flight Center [online]. The Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST), 1998 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://archive.stsci.edu/ iue/gallery/prelaunch.html

- [65] The INES Archive Data Server [online]. ESA, June 2000 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: http://sdc.cab.inta-csic.es/index2.html
- [66] SPLAT Spectral Analysis Tool [online]. Peter W. Draper, 2016 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat.html
- [67] HD 37776 [online]. CDS: Strasbourg astronomical Data Center, Simbad [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic? Ident=HD+37776&submit=SIMBAD+search
- [68] Amatérská astronomie, H alfa [online]. Libor Šmíd, ZČU, 2008 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~smid/vladana/h-alfa/kun1.jpg
- [69] MAST: Missions and data [online]. The Barbara A. Mikulski Archive for Space Telescopes [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://archive.stsci.edu/ missions-and-data