

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně

Pavel Petrán

**Studium spektra hvězdy
HD 74 146**

Bakalářská práce



Brno 2008

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a použil jen prameny uvedené v seznamu literatury. Souhlasím s uložením bakalářské práce na Masarykově univerzitě v Brně a jejím zveřejňováním ke vzdělávacím účelům.

V Brně dne:

Podpis:

Děkuji vedoucímu práce doc. Mgr. Jiřímu Krtičkovi PhD. za velmi vstřícné vedení. Díky patří i ostatním kantorům, kteří mě kdy co naučili, spolužákům za spolužití během studia, Martinovi Lošťákovi za cenné připomínky i rodině a mým spolubydlícím za podporu.

Abstrakt

Práce Studium spektra hvězdy HD 74146 pojednává o samotné hvězdě ale především o jejím spektru. Obsahuje identifikaci hlavních spektrálních čar vodíku, helia a těžších prvků; zabývá se určením radiální rychlosti hvězdy.

Abstract

The work Study of the spectrum of the star HD 74146 deals with the star itself and principally with its spectrum. It contains the identification of the main spectral lines of hydrogen, helium and the heavy elements, it covers with work out the radial velocity of the star.

Obsah:

1	Úvod - Spektrografie	6
2	Teorie	7
2.1	Záření absolutně černého tělesa.....	7
2.2	Efektivní teplota hvězdy	8
2.3	Spektrální typy	8
2.4	Spektrum	9
2.4.1	Spektrální čáry	9
2.4.2	Principy rozšíření spektrálních čar.....	10
2.4.3	Balmerův skok	11
2.5	Radiální rychlost	12
2.5.1	Vliv oběhu Země kolem Slunce.....	12
3	Praktická část.....	14
3.1	HD 74 146	14
3.2	Spektrum hvězdy HD 74 146	14
3.3	Model spektra.....	16
3.4	Určení radiální rychlosti hvězdy.....	17
3.5	Fitované čáry helia	18
3.5.1	Vyřazené čáry	21
3.6	Diskuse výsledků	22
4	Závěr	23

1 Úvod - Spektrografie

Světlo je to jediné, co od hvězd (kromě Slunce, od kterého můžeme zachytit i atomární částice) máme. Ze směru, odkud k nám přichází, intenzity a jejich závislosti na čase můžeme zjistit, kde se nachází (a kam se pohybuje) hvězda, která ho vysílá. Mimo to lze udělat ještě jednu informačně vydatnou věc: rozložit světlo do barev, tzn. získat její spektrum. Toto vypoví např. o teplotě hvězdné atmosféry, jejím (prvkovém) složení, tlaku v ní, gravitačním zrychlení nebo magnetickém poli. Spektrum ukazuje i jak rychle se k nám hvězda přibližuje nebo od nás vzdaluje. Pro toto všechno se velká část astrofyzikálních měření týká spekter.

V historii s rozkladem světla začal v polovině 17. stol. český učenec Jan Marek Marci. Potom se jím zabývali např. Isaac Newton, William Wollaston a Joseph Von Fraunhofer. [2]

Zcela zásadní přínos ovšem znamenají práce dvou fyziků: Roberta Bunsena a Gustava Roberta Kirchhoffa. Tito vědci při rozboru spektra Slunce a jasných hvězd našli nezvratné důkazy, že atmosféry těchto objektů jsou tvořeny týmiž chemickými prvky, s nimiž se setkáváme v pozemských materiálech. Tím byl položen základ pro dnes všeobecně přijímaný koncept materiální jednoty světa, jenž nám ve svých důsledcích umožňuje zkoumat a vykládat vlastnosti kosmických objektů pomocí fyzikálních metod a zákonů. Zrodila se nová vědní disciplína – astrofyzika. [2]

2 Teorie

2.1 Záření absolutně černého tělesa

Absolutně černé těleso (AČT) je model tělesa o konstantní teplotě, které neodráží ani nepropouští žádné záření ale pouze vyzařuje. Experimenty ukázaly, že spektrum černého tělesa nezávisí na hmotnosti částic – materiálu – a že záření se uvolňuje po kvantech. Jediným parametrem, který determinuje tvar spektra je teplota.

Pro celkový zářivý výkon absolutně černého tělesa platí Stefanův zákon:

$$L = \sigma S T_{\text{ef}}^4, \quad \sigma = (5,670400 \pm 0,000040) \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

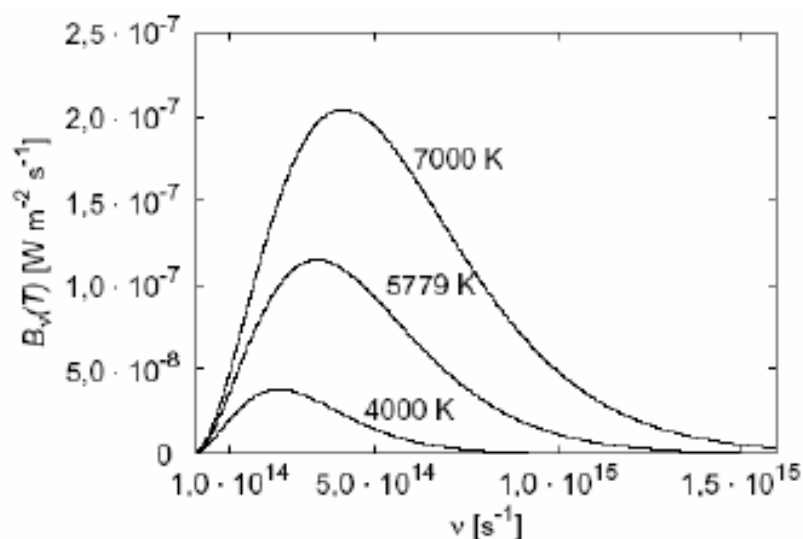
kde S je obsah povrchu tělesa, T_{ef} efektivní teplota hvězdy a σ Stefanova-Boltzmannova konstanta.

Spektrum záření – závislost zářivého toku na frekvenci (vlnové délce) - AČT popisuje tzv. Planckova funkce:

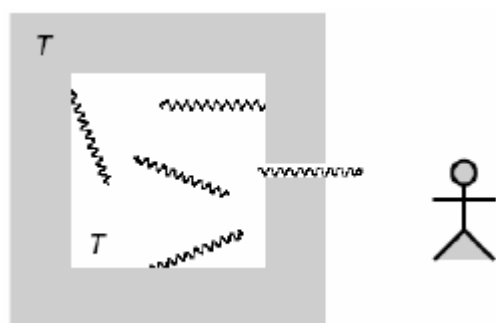
$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

h značí Planckovu konstantu, c rychlost světla, ν frekvenci záření a T termodynamickou teplotu. Zářivý tok B_{ν} má rozměr W/m^2 .

S rostoucí teplotou se maximum funkce posouvá ke kratším vlnovým délkám a na všech vlnových délkách roste zářivý tok.

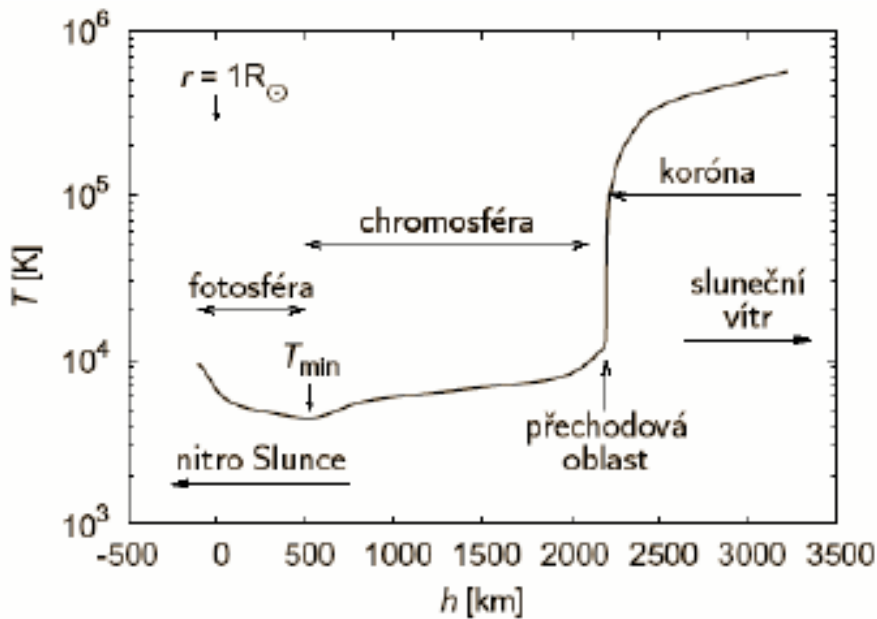


Obr. 1. Rozdělení energie ve spektru AČT dané Planckovou funkcí pro tři teploty.



Obr. 2. Schematický obrázek s pozorovatelkou u AČT. V dutině se ustaví termodynamická rovnováha. Uvnitř dutiny je fotonový plyn o termodynamické teplotě T . Záření pak lze pozorovat úzkou štěrbinou vedoucí do dutiny.

Hvězda je modelu AČT blízka v tom, že všechna ostatní tělesa jsou od ní velmi vzdálená, pročež jejich záření neodráží, a to, co pozorujeme, je skutečně z ní. Od modelu se hvězda liší tím, že její atmosféra není v termodynamické rovnováze. Vrstvy, ze kterých k nám přichází záření, mají rozličnou hustotu, optickou hloubku a teplotou. Obr. 3 pro ilustraci ukazuje závislost teploty na výšce v atmosféře Slunce.



Obr. 3. Průběh teploty s výškou ve vnějších vrstvách Slunce. Výška h je měřena relativně k místu, kde je optická hloubka pro záření s vlnovou délkou 500 nm rovna jedné. To v podstatě odpovídá místu vzdálenému jeden sluneční poloměr od středu Slunce. Přesný mechanismus ohřevu

vnějších vrstev sluneční atmosféry, který je pravděpodobně spojen s podpovrchovou konvektivní vrstvou, není doposud znám.

2.2 Efektivní teplota hvězdy

Teplota je v různých vrstvách i oblastech hvězdy samozřejmě různá. Můžeme ale nadálku určit tzv. efektivní teplotu hvězdy vztahující se k vrstvě atmosféry, ze které k nám přichází záření. Je to možné jednak srovnáním průběhu kontinua se zářením černého tělesa – s rostoucí teplotou se maximum funkce posouvá ke kratším vlnovým délkám a na všech vlnových délkách roste zářivý tok. Pro celkový zářivý výkon absolutně černého tělesa platí výše zmiňovaný Stefanův zákon, na základě něhož hvězdě přiřazujeme efektivní teplotu.

V praxi se však efektivní teplota (spektrální typ) určuje rychlejším způsobem podle několika vybraných čar ve spektru.

2.3 Spektrální typy

Hvězdy se podle vzhledu spektra dělí do spektrálních tříd; hlavním parametrem pro tuto klasifikaci je efektivní teplota hvězdy (rozhodující je ionizace prvků v atmosféře). Zavedená je tzv. harvardská klasifikace do tříd

O B A F G K M,

kde teplota zleva doprava klesá. Kategorie O, B, A, F se nazývají horké hvězdy, typy G, K, M chladné hvězdy. Pro jemnější dělení se každá třída člení na 10 podtříd, značených číslicemi 0 – 9 (0 je nejteplejší, 9 nejchladnější).

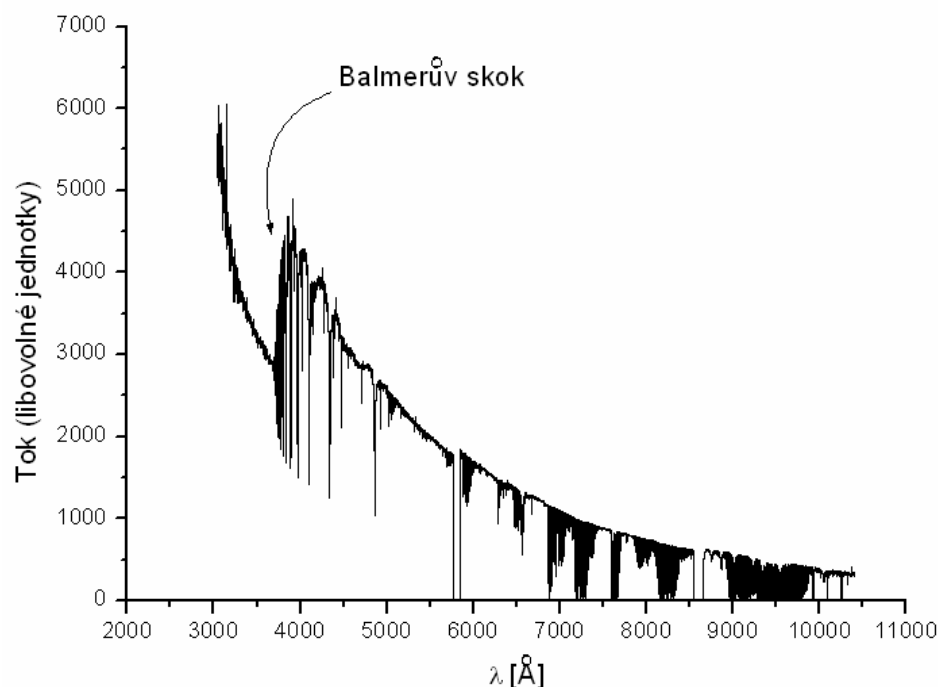
Do spektrálního typu hvězdy se ještě udává tzv. luminozitní třída – ta vypovídá o poloze hvězdy v H-R diagramu (už přímo s efektivní teplotou nesouvisí). Označuje se římskými číslicemi I-VII:

Ia jasní veleobři	III obři	VI podtrpaslíci
Ib veleobři	IV podobři	VII bílí trpaslíci
II nadobři	V hvězdy hl. posloupnosti	

Klasifikaci obohacené o luminozitní třídu říkáme Morganova-Keenova.

2.4 Spektrum

Spektrum hvězdy ukazuje rozložení barev ve světle hvězdy, jinak řečeno rozdělení fotonů podle energie. V praxi se zobrazuje závislost světelného toku na vlnové délce (primárnější veličinou elektromagnetického záření je ale frekvence, ta nezávisí na prostředí, kterým vlnění prochází).



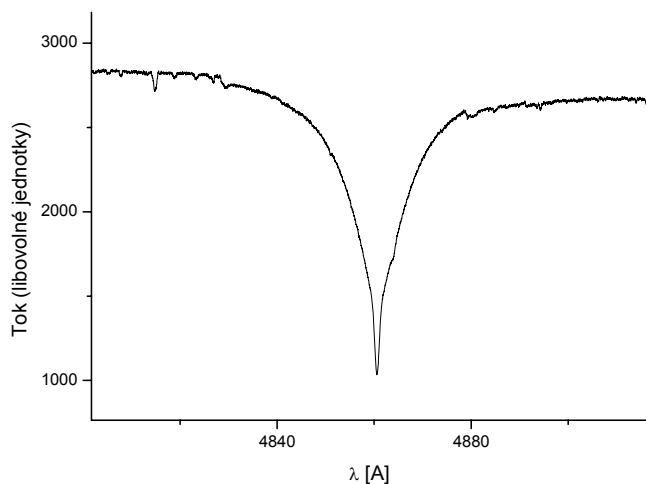
Obr. 4. Spektrum hvězdy HD 74 146. Základní linii spektra se říká kontinuum; do něj se zařazují absorpční čáry. Čáry, které nad kontinuum vystupují, jsou emisní. Zřetelný skok v kontinuu je tzv. Balmerův skok.

2.4.1 Spektrální čáry

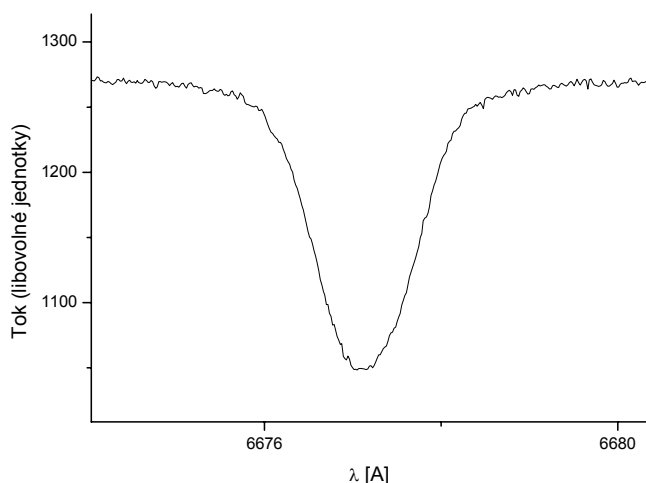
Plyny přednostně vyzařují i pohlcují záření na diskretních vlnových délkách. Pohlcují fotony, které mají takovou energii, aby elektron v atomu přešel na jednu z vyšších hladin. Zároveň

stejně fotony vyzařují – když elektron sestoupí na energiovou hladinu nižší. To je důvod, proč ve spektru pozorujeme absorpční a emisní čáry.

Obrázky a ukazují typické profily čáry vodíku a čáry těžšího prvku.



Obr. 5. Profil vodíkové čáry. Konkrétně H β ze spektra hvězdy HD 74 146



Obr. 6. Profil čáry helia. He I na vlnové délce 6678,154 Å ze spektra HD 74 146.

Je vidět, že spektrální čáry nejsou nekonečně tenké. Díky tomu je můžeme i detekovat.

2.4.2 Principy rozšíření spektrálních čar

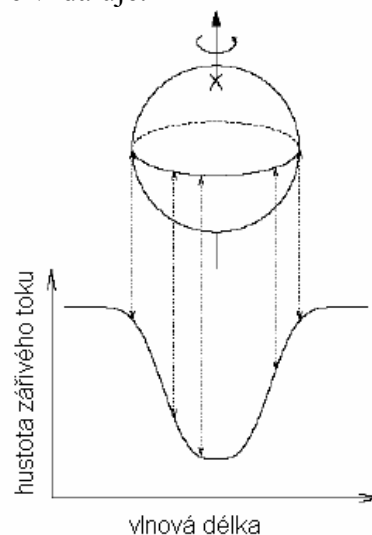
„K rozšíření spektrálních čar dochází mj. proto, že samy hladiny, mezi nimiž elektrony přecházejí nejsou zcela ostré, diskrétní. Toto rozmazání hladin souvisí s faktem, že doba, po níž přechod probíhá, je poměrně krátká. Platí zde *Heisenbergův princip neurčitosti*, mezi „rozmytostí“, neurčitostí energetické hladiny ΔE a průměrnou dobou τ , po níž atom v nabuzeném stavu setrvá: $\Delta E \cdot \tau = h$. Dobu, během níž atom v excitovaném stavu setrvá, ve hvězdných atmosférách velmi silně zkracují nepružné srážky s jinými částicemi, které jsou tím častější a účinnější, čím vyšší je tlak. Toto kvantově mechanické rozšíření čar se proto nazývá *rozšíření tlakem*.“ [2]

Další příčina rozšíření čar je Dopplerův jev. Je-li λ_0 vlnová délka na níž vysílá své záření nějaký zdroj záření, a ten zdroj se vůči pozorovateli pohybuje nenulovou (radiální) rychlostí

V_r , pak záření, které přijmeme bude mít vlnovou délku oproti původní posunutou o $\Delta\lambda$, přičemž platí jednoduchá relace:

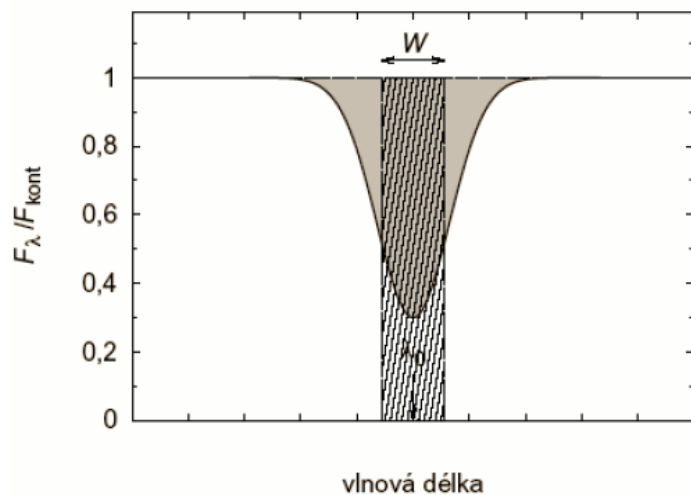
$$\Delta\lambda = \lambda_0 \frac{v_r}{c}$$

kde c je rychlost světla. Pohyby to mohou být makroskopické i mikroskopické, chaotické. Spektrální čáry většiny hvězd však bývají rozšířené hlavně v důsledku hvězdné rotace, kdy se k nám jeden z okrajů hvězdy relativně přibližuje, druhý relativně vzdaluje.



Obr. 7. Rozšíření spektrální čáry vlivem rotace hvězdy. Vektor úhlové rychlosti má směr šipky v ose rotace.

Nápadnost čáry, tedy to, jak je výrazná, popisuje parametr ekvivalentní šířka.



Obr. 8. Pozorovaný tok záření F_λ , ovlivněný přítomností dané čáry, se vyjadřuje relativně vzhledem k toku záření v kontinuu F_{kont} , které by se pozorovalo v případě, že by na daném místě čára nebyla. Ekvivalentní šířka čáry W odpovídá ploše mezi pozorovaným spektrem F_λ / F_{kont} a přímkou $F_\lambda / F_{kont} = 1$ (šedá plocha). Také je to taková šířka čáry (vyjádřená v jednotce vlnových délek), kterou by měla čára obdélníkového profilu

(vyznačeného šrafovanou plochou), jenž by zcela pohlcovala záření hvězdy a jenž vymezuje stejnou plochu pod přímkou $F_\lambda / F_{kont} = 1$ jako daná čára.

2.4.3 Balmerův skok

Průběh kontinua ovlivňují především dva skoky, které vznikají v důsledku zvýšené neprůhlednosti atmosféry zapříčiněné ionizací vodíku. Fotony s vlnovou délkou kratší než 364 nm jsou schopny ionizovat vodík nacházející se v druhé energetické hladině (s hlavním kvantovým číslem $n = 2$). Proto atmosféra hvězdy tyto fotony velmi účinně pohlcuje. Ve vlnových délkách kratších než 364 nm tedy dohlédneme pouze do svrchních vrstev atmosféry, které mají nižší teplotu a proto vyzařují méně. Ve spektru pozorujeme skok, v tomto případě nazývaný

Balmerův. Kontinuum ovlivněné tímto Balmerovým skokem se nazývá Balmerovo. Podobným způsobem, v důsledku ionizace vodíku nacházejícího se v základní hladině ($n=1$), vzniká také Lymanův skok a příslušné Lymanovo kontinuum fotonů s vlnovou délkou kratší než 91 nm. [2]

2.5 Radiální rychlost

Radiální rychlost hvězdy je složka vektoru rychlosti získaná jeho promítnutím do osy pozorovatel – hvězda. Říká, jak rychle se od nás hvězda vzdaluje nebo se přibližuje.

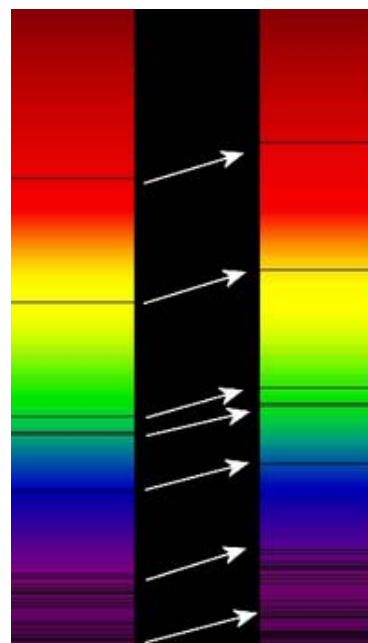
Dopplerův jev skýtá možnosti nepřímo měřit radiální rychlost zářícího objektu (hvězdy) z jeho spektra. Každá vlnová délka λ ve spektru se vlivem pohybu zdroje změní na $\lambda_0 + \Delta\lambda$; $\Delta\lambda$ je rozdíl mezi naměřenou a vyzářenou vlnovou délkou:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0.$$

Vzdaluje-li se od nás hvězda, je posun $\Delta\lambda$ kladný, a vlnové délky se prodlužují. Pokud se hvězda přibližuje, vlnové délky se zkracují a $\Delta\lambda$ je záporné.

S posunem všech frekvencí ve spektru se posouvají i spektrální čáry, ze kterých se $\Delta\lambda$ určuje. Bereme rozdíl středu naměřené čáry a její laboratorní vlnové délky. Pak už je snadné spočítat radiální rychlost hvězdy:

$$v_r = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}.$$

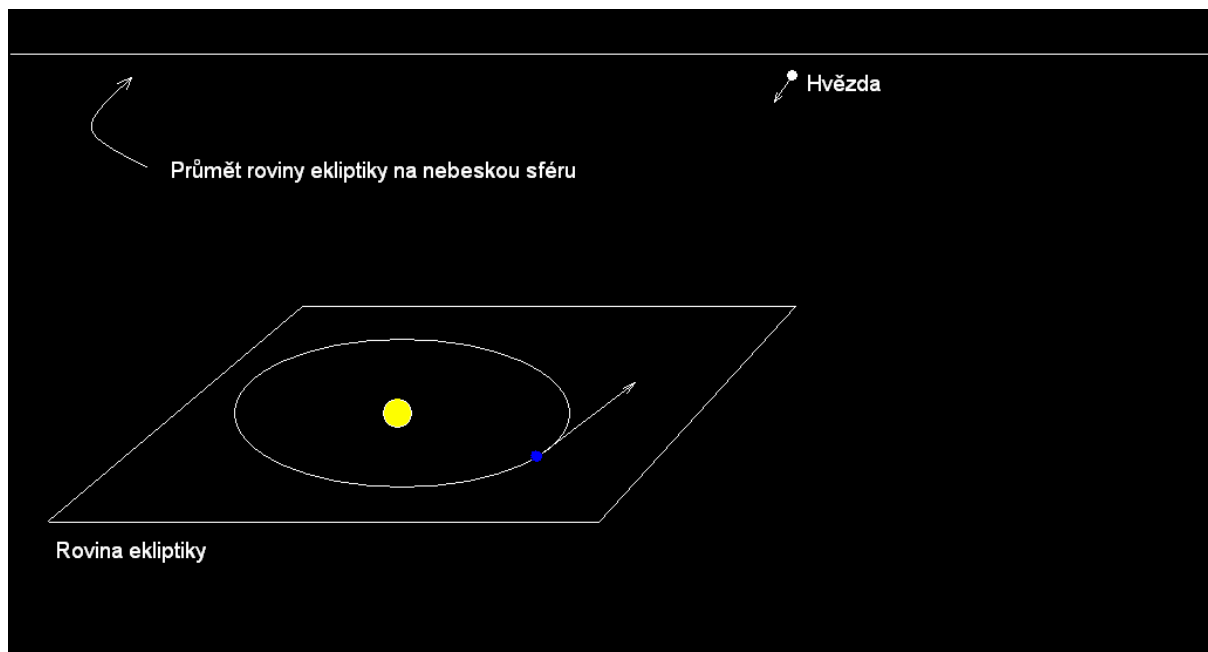


Obr. 9. Posun čar ve viditelné oblasti spektra. Všechny fotony jsou detekovány s jinou frekvencí, než s jakou vznikly.

2.5.1 Vliv oběhu Země kolem Slunce

Oběžná rychlost Země kolem Slunce se pohybuje okolo 30 km/s, což je rychlost stejného řádu jako naměřujeme u radiálních pohybů hvězd. Údaj o hvězdě ležící blízko roviny ekliptiky by tím mohl být silně zkreslen. Proto je zvykem činit u spekter hvězd tzv. heliocentrickou korekci – opravu „vůči Slunci“. Spektrum pak vypadá, jako by pozorovatel stál na Slunci (nebo se Země nepohybovala).

Rychlost oběhu Země kolem své osy je na rovníku 0,46 km/s. Tento pohyb můžeme zanedbat; je menší než chyba, se kterou zjišťujeme radiální rychlosti.



Obr. 10. K heliocentrické korekci. Schematicky je znázorněna Země na dráze kolem Slunce. Nachází-li se měřená hvězda blízko roviny ekliptiky a Země se k ní zrovna přibližuje nebo od ní vzdaluje (hvězda je nejvýš nad obzorem brzy po setmění nebo před svítáním), radiální rychlost hvězdy bude hodně ovlivněna pohybem Země kolem Slunce.

3 Praktická část

3.1 HD 74 146

Hvězda HD 74 146 je dvojhvězda v souhvězdí Plachet (Vela) na jižní obloze. Je zdrojem rentgenového záření.

Jiná označení hvězdy:	HIP 42504	
	V* NZ Vel	
	USNO-B1.0 0369-00125279	
	CI* IC 2391 SMY 14	
Spektrální typ:	B4IV	
Souřadnice (údaje ICRS z r. 2000):	RA 8h 39m 57,5975s	Dec -53° 3' 17,026"
Hvězdná velikost:	B 5,05	V 5,19
Barevný index B - V:	-0,15	
Paralaxa:	(0,00761± 0,00046)"	
Radiální rychlost:	14,4 km/s	
Vlastní pohyb:	RA -0,02581"/rok	Dec 0,02149"/rok

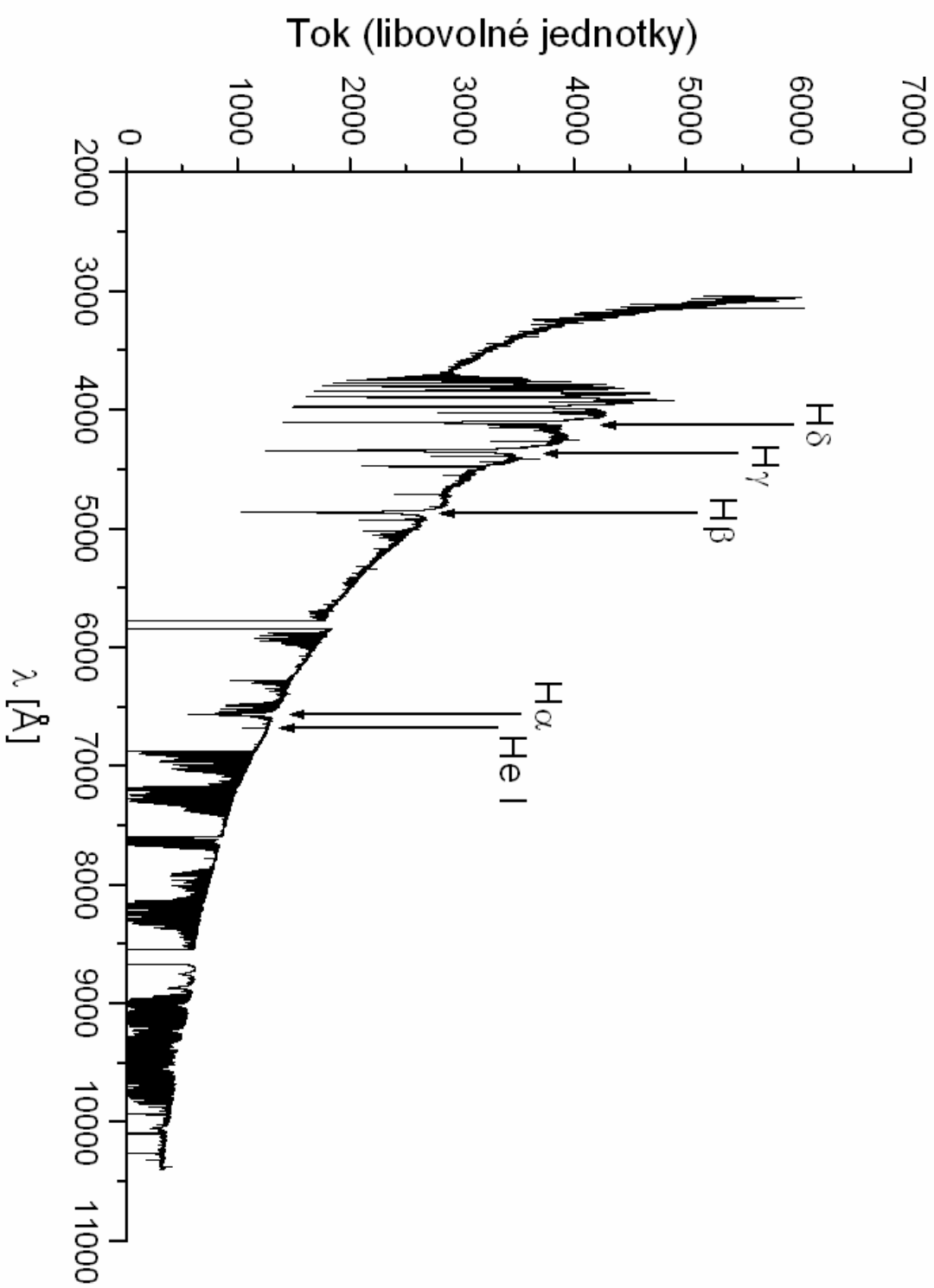
[E1] – [E7]

3.2 Spektrum hvězdy HD 74 146

Spektrum, jež je předmětem této práce, bylo pořízeno dalekohledem VLT (Very Large Telescope), o průměru 8,2 m, na Evropské jižní observatoři v Chile. Do mých rukou se spektrum dostalo z internetu – webových stránek ESO (European Southern Observatory) [1].

Měření proběhlo v noci z 1. na 2. března 2001. Rozlišení spektra na ose vlnové délky je 0,015 Å/pix. Jeho rozsah je (3040 – 10400) Å. Zachycuje tedy viditelné záření, blízkou ultrafialovou i blízkou infračervenou oblast záření. Dva úseky nebyly měřeny: (5770 – 5840) Å a (8540 – 8661) Å. Výsledné spektrum na obr. je absolutní, tzn. že je odpočítán vliv atmosféry (zeslabení světla) a měřicího přístroje (různá citlivost v různých vlnových délkách).

V úseku (3690 – 3860) Å je vidět Balmerův skok. Nejvýraznější absorpční čáry ve spektru jsou čáry vodíku, na obr. jsou určeny čáry Balmerovy série H α – H δ . Nejvýraznější čára těžšího prvku je čára neutrálního helia na vlnové délce 6678,154 Å. Je vidět, že oproti vodíkovým je téměř nepatrná. Husté čáry v delších vlnových délkách jsou většinou absorpční čáry ze zemské atmosféry – tzv. *telurické čáry*.



Obr. 11. Spektrum hvězdy HD 74 146

3.3 Model spektra

Doc. Krtička spočetl pomocí programu SYNSPEC pro model atmosféry Atlas spektrum hvězdy typu B4 – přesněji řečeno čáry prvků těžších než vodík. Výstupem bylo téměř 18000 čar. V tabulce 1 jsou ty nejvýraznější z nich seřazené podle polohy (vlnové délky).

Parametry hvězdné atmosféry zadané jako vstup programu:

$T = 17000 \text{ K}$

$\log g = 4.0 \text{ (CGS)}$

Vlnová délka [Å]	Atom	Ekvivalentní šířka [mÅ]	Vlnová délka [Å]	Atom	Ekvivalentní šířka [mÅ]
3705,001	He I	131,5	4713,139	He I	180
3705,012	He I	108,3	4713,156	He I	158
3819,603	He I	163,2	4713,376	He I	139,5
3819,603	He I	101,1	4921,931	He I	228,8
3819,613	He I	101,1	5015,678	He I	220,1
3819,614	He I	143,9	5041,024	Si II	112,7
3819,758	He I	129,7	5047,738	He I	157,5
3867,470	He I	127,4	5055,984	Si II	122,6
3871,791	He I	139,1	5453,855	S II	100
3888,605	He I	134,8	5875,599	He I	114,2
3888,646	He I	166,2	5875,614	He I	258,4
3888,649	He I	179,6	5875,615	He I	319,2
3926,535	He I	146,2	5875,625	He I	258,4
3933,663	Ca II	100,1	5875,640	He I	298,7
3964,729	He I	165,4	5875,966	He I	282,3
4009,258	He I	184,5	5957,559	Si II	100,3
4026,187	He I	184,7	5978,930	Si II	116,2
4026,187	He I	127,9	6347,109	Si II	167
4026,198	He I	127,9	6371,371	Si II	156,9
4026,199	He I	166,5	6402,246	Ne I	102,7
4026,358	He I	155,5	6578,053	C II	176
4120,811	He I	138,5	6582,882	C II	155
4120,824	He I	115,2	6678,154	He I	348,3
4130,894	Si II	102,1	7065,176	He I	297,1
4143,761	He I	178,1	7065,214	He I	269,2
4266,999	C II	101,6	7065,707	He I	223,1
4267,259	C II	105,2	7231,337	C II	132,9
4387,929	He I	192,5	7236,416	C II	155,7
4437,551	He I	142,2	7237,166	C II	107,6
4471,473	He I	219,6	7281,349	He I	253,2
4471,473	He I	164,5	7771,941	O I	188,7
4471,485	He I	164,5	7774,161	O I	178,1
4471,488	He I	201,5	7775,390	O I	160,2
4471,682	He I	189,6	7849,722	Si II	102,2
4481,126	Mg II	119,1	7877,054	Mg II	144,4
4481,325	Mg II	115,5	7896,366	Mg II	162,1

Tab. 1. Čáry těžších prvků vymodelovaného spektra.

3.4 Určení radiální rychlosti hvězdy

Nejprve byl proveden výpočet radiální rychlosti podle vodíkových čar. Tyto mají ale složitější profil, jejich střed byl určen podle nejnižšího bodu – hrotu čáry. Tzn. jako střed čáry byla vzata vlnová délka na níž tok v čáře dosahuje nejnižší hodnoty.

čára	λ [Å]	λ_0 [Å]	v_r [km/s]
H α	6561,75	6562,82	-49
H γ	4339,79	4340,47	-49
He I	6677,05	6678,154	-50

Tab.2. Radiální rychlost určená podle vodíkových a nejnvýraznější heliové čáry. λ je naměřená vlnová délka středu čáry, λ_0 její laboratorní vlnová délka, v_r je vypočtená radiální rychlost hvězdy. Laboratorní vlnové délky vodíkových čar byly převzaty z knihy V. Vanýska [], λ_0 heliové čáry z modelu spektra.

Poté ze spektra hvězdy bylo vybráno několik absorpčních čar těžších prvků: helia, křemíku, uhlíku, síry a hořčíku. Při výběru jsem se řídil umělým spektrem. Čáry těchto prvků mají jednodušší profil; často dobře odpovídá Gaussově křivce (pro rozdíl mezi profily čar vodíku a těžších prvků viz s). Profily vybraných čar byly proloženy v programu Origin definovanou funkcí:

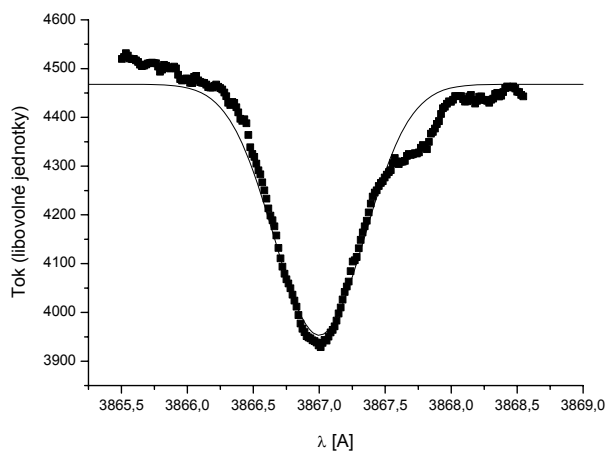
$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} \exp\left(-2 \frac{(x - x_c)^2}{w^2}\right).$$

y je v daném případě světelný tok a x odpovídá vlnové délce v Å; y_0 má význam toku v kontinuu, w vypovídá o šířce čáry (angl. width) a A o její hloubce (area). Pro zjištění radiální rychlosti nás zajímá hodnota x_c – centrum čáry vzhledem k ose vlnových délek.

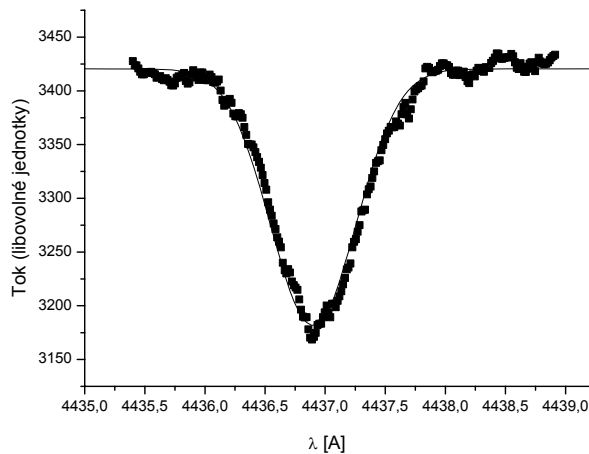
čára prvku	λ [Å]	λ_0 [Å]	v_r [km/s]
He I	3867,023	3867,470	-34,7
He I	4436,935	4437,551	-41,6
He I	6677,136	6678,154	-45,7
Si II	4130,246	4130,894	-47,1
Si II	5040,222	5041,024	-47,7
Si II	6346,107	6347,109	-47,4
Si II	6370,384	6371,371	-46,5
S II	5453,018	5453,855	-46,0
C II	6576,938	6578,053	-50,9
Mg II	7876,604	7877,054	-17,3

Tab. 3. Radiální rychlost hvězdy spočtená z nafitovaných spektrálních čar. Laboratorní vlnové délky jsou převzaty z umělého spektra. Škrtnuté čáry byly vyřazeny z důvodů popsaných v odstavci 3.5.1.

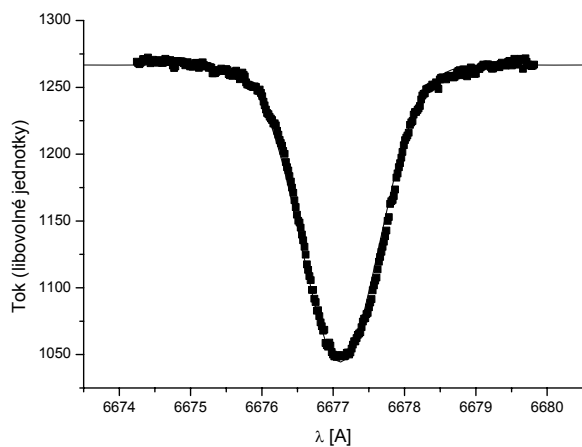
3.5 Fitované čáry helia



He I, $\lambda_0 = 3867,470 \text{ \AA}$
 $v_r = -34,6 \text{ km/s}$

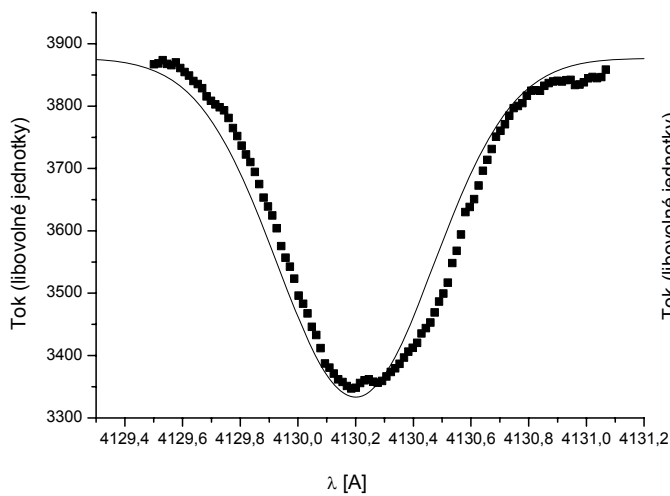


He I, $\lambda_0 = 4437,551 \text{ \AA}$
 $v_r = -41,6 \text{ km/s}$

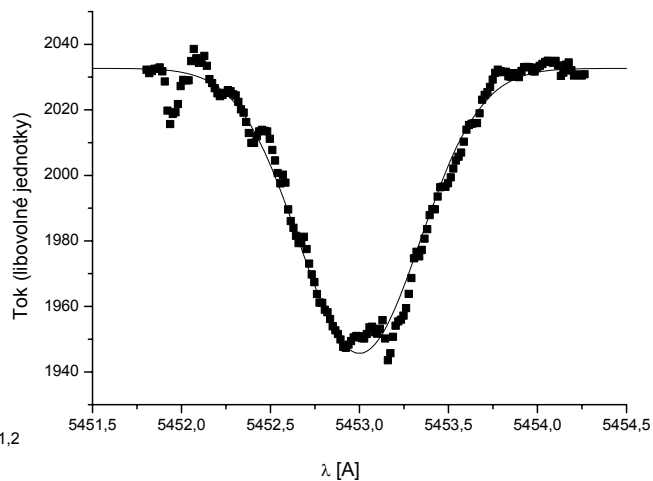


He I, $\lambda_0 = 6678,154 \text{ \AA}$
 $v_r = -45,7 \text{ km/s}$

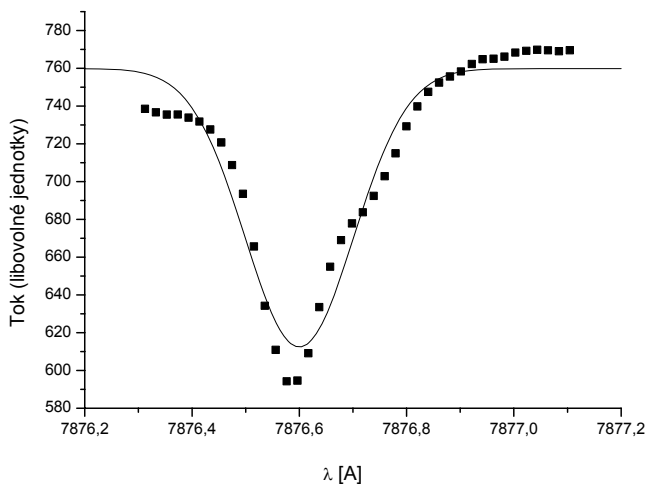
Fitované čáry těžších ionizovaných prvků



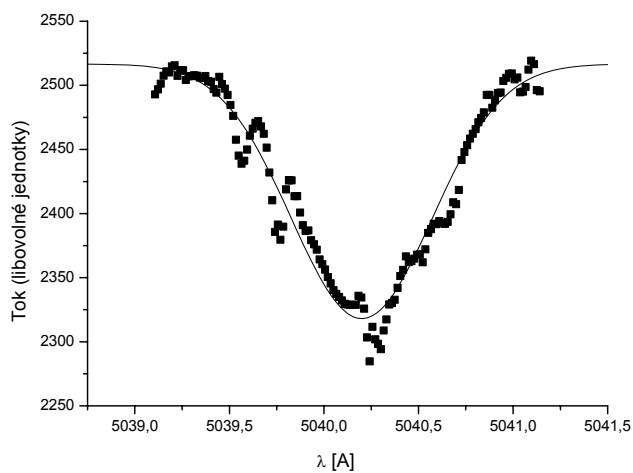
Si II, $\lambda_0 = 4130,894 \text{ \AA}$
 $v_r = -47,0 \text{ km/s}$



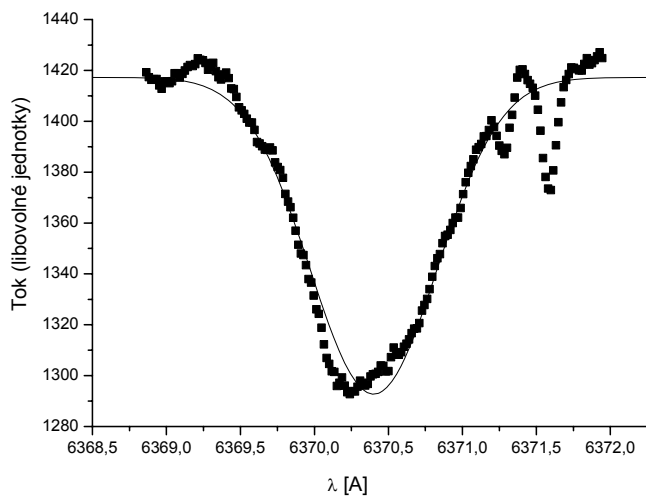
S II, $\lambda_0 = 5453,855 \text{ \AA}$
 $v_r = -46,0 \text{ km/s}$



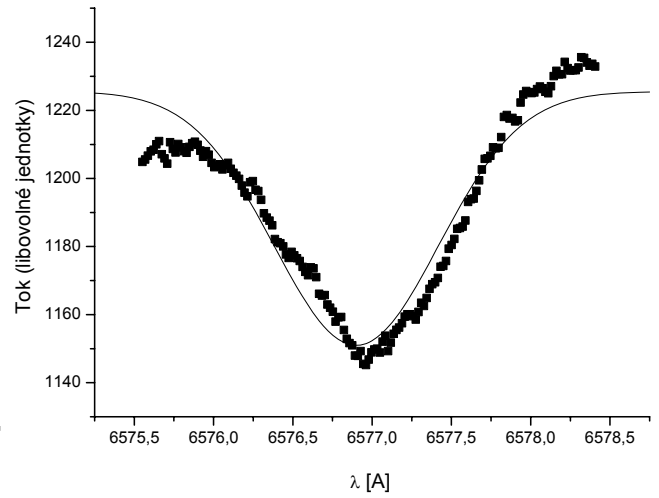
Mg II, $\lambda_0 = 7877,054 \text{ \AA}$
 $v_r = -17,2 \text{ km/s}$



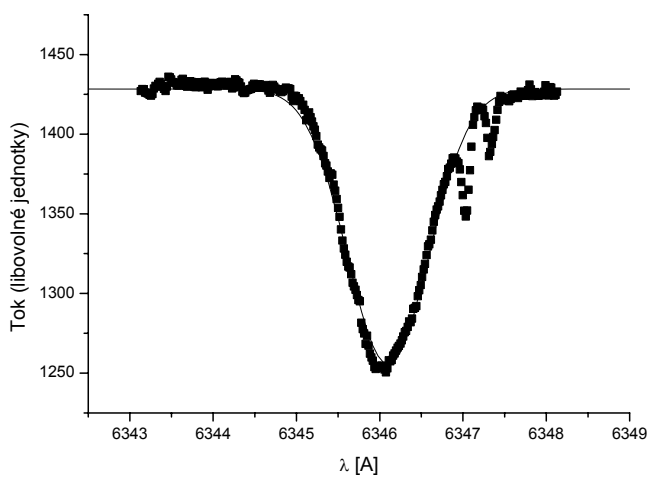
Si II, $\lambda_0 = 5041,024 \text{ \AA}$
 $v_r = -49,0 \text{ km/s}$



Si II, $\lambda_0 = 6371,371$ Å
 $v_r = -45,7$ km/s



C II, $\lambda_0 = 6578,053$ Å
 $v_r = -52,6$ km/s



Si II, $\lambda_0 = 6347,109$ Å
 $v_r = -47,7$ km/s

Radiální rychlost byla určena jako aritmetický průměr hodnot od jednotlivých čar. Chyba výsledku potom jako střední kvadratická chyba souboru hodnot.

$$v_r = (-46,6 \pm 0,9) \text{ km/s}$$

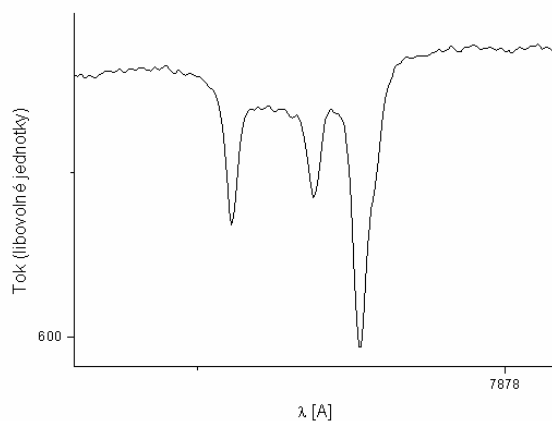
3.5.1 Vyřazené čáry

Dvě čáry nebyly pro výslednou hodnotu radiální rychlosti brány v úvahu: helium na 3867,470 Å a hořčík na vlnové délce 7877,054 Å. Obě dávají výsledek dosti odlišný od ostatních hodnot. Čára helia má zvláštní profil, v umělém spektru ale není blízká čára, která by ji mohla takto zkreslovat. Kvůli složitějšímu průřezu čáry se proložená křivka mírně liší od naměřených hodnot i v hrotu čáry. Ale ani souřadnice hrotu nevydává hodnotu radiální rychlosti podobnou těm od ostatních čar.

Čára hořčíku vykazuje údaj o radiální rychlosti ještě vychýlenější. Její profil je podobný vyřazené čáře helia. Ani zde nejnižší bod čáry neurčí radiální rychlost přesvědčivě. V modelu spektra je tato čára též osamocená, tedy nemá blízké, se kterými by mohla v reálném spektru splývat. Naměřené spektrum má ovšem dvě blízké čáry v kratších vlnových délkách. Tyto ale taky neurčí radiální rychlost hvězdy uspokojivě. Podle srovnání se slunečním spektrem z [9] se nejedná o absorpční čáry ze zemské atmosféry.

čára prvku	λ		λ_0 [Å]	v_r [km/s]
He	λ_G	3867,023	3867,47	-34,6
	λ_N	3866,993		-37,0
Mg	λ_G	7876,601	7877,054	-17,2
	λ_N	7876,587		-17,8
	λ_{S1}	7876,135		-35,0
	λ_{S2}	7875,345		-65,1

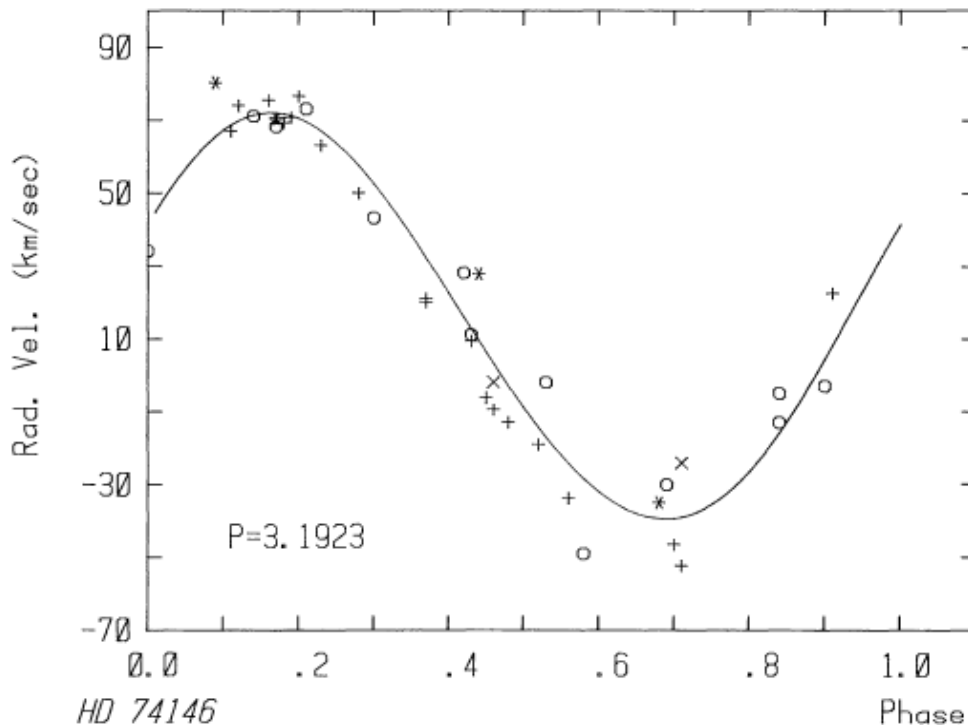
Tab. 4. Problematické čáry helia a hořčíku. λ_G je vlnová délka středu čáry zjištěná proložením Gaussovy křivky, λ_N označuje odhad středu čáry podle jejího nejnižšího bodu. λ_{S1} a λ_{S2} značí sousední čáry u hořčíku – viz obrázek níže. Vlnové délky λ_{S1} a λ_{S2} byly zjištěny podle nejnižšího bodu čáry.



Obr. 12. Čára hořčíku. Fitovaná byla nejvýraznější čára vpravo. Mezi čarami je patrná snížená úroveň kontinua, což je možná vlastní, mělká čára hořčíku.

3.6 Diskuse výsledků

Už po odhadu radiální rychlosti z posunu vodíkových čar se objevil rozpor s údajem v katalogu Simbad. Výpočet dává kolem -47 km/s, zatímco katalog uvádí kladných 14 km/s. Odpověď přináší ta skutečnost, že se jedná o dvojhvězdu. Podle článku [7] radiální rychlost kolísá mezi 70 km/s a -40 km/s. Měření tedy pravděpodobně proběhlo blízko amplitudy radiální rychlosti.



Obr. 13. Křivka radiální rychlosti převzatá z článku [7]. Oběžná doba složek jsou 3,1923 dne. Kroužky označují autora naměřená data, ostatní symboly reprezentují data převzatá od jiných astronomů.

4 Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo spektrum hvězdy HD 74146, získané na dalekohledu Evropské jižní observatoře v Chile. Průběh spektra byl srovnán se zářením absolutně černého tělesa. Zdárně byly určeny spektrální čáry vodíku, helia i těžších prvků, ze spektra byla taky zjištěna radiální rychlost hvězdy s relativní chybou 2 %, což lze považovat za dobrý výsledek. Spis obsahuje i základní teorii k problematice hvězdných spekter.

Literatura

- [1] Bagnulo, S.; Jehin, E.; Ledoux, C.; Cabanac, R.; Melo, C.; Gilmozzi, R.: A Library of High-Resolution Spectra of Stars across the Hertzsprung-Russell Diagram, *Messenger* 114 (2003)
- [2] Mikulášek, Z.; Krtička, J.: *Základy fyziky hvězd*, MU, Brno 2005
- [3] Vanýsek, V.: *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia, Praha 1980
- [4] Macháček, M.: *Fyzika pro gymnázia. Astrofyzika*, Prometheus, Praha 1998
- [5] Tichý, A.: *Studium mezihvězdného prostředí ve směru hvězdy HD 210809*, MU, Brno 2007
- [6] Harmanec, P.: Stellar masses and radii of stars based on modern binary data, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* 39, 329 (1988)
- [7] Levato, H.; Garcia, B.; Lousto, C.; Morrell, N.: Radial velocities in the open cluster IC 2391, *Astrophysics and Space Science* 146, 361 (1988)
- [8] Simon, T.; Patten B. M.: A Deep X-Ray Image of IC 2391, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 110, 283 (1998)
- [9] Moore, Ch. E.: *The Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å*, U.S. Government Printing Office, Washington 1966

Elektronické zdroje

- [E1] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad>
- [E2] <http://vizier.u-strasbg.fr>
- [E3] <http://cdsweb.u-strasbg.fr/Cats.html>
- [E4] <http://www.adsabs.harvard.edu>
- [E5] <http://www.blackwell-synergy.com>
- [E6] <http://www.journals.uchicago.edu/toc/pasp/current>
- [E7] <http://xxx.lanl.gov/archive/astro-ph>
- [E8] <http://www.wikipedia.org>