

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



DIPLOMOVÁ PRÁCE
**Podrobné studium mezihvězdného prostředí ve
směru hvězdy HD 36841**

Bc. Lenka Zychová

Vedoucí diplomové práce: doc. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

2010

Velké poděkování patří především vedoucímu mé diplomové práce doc. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D. Děkuji za spoustu věnovaného času, za užitečné rady a veškerou trpělivost. Děkuji rodičům, celé své rodině, Pájovi, Terezce, Haničce, Márovi a svým studentkám za toleranci mých pozdních příchodů a nedostatku času, který jsem jim mohla věnovat. Děkuji za podporu při studiu a neustálý přísun energie.

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

V Brně dne 14.5.2010

Lenka Zychová

Abstrakt:

V předložené práci podrobně studujeme mezihvězdnou látku ve směru hvězd HD 36512, HD 36841, HD 36959, HD 36960, HD 37021, HD 37043, HD 37061 a HD 37903. V první kapitole se zabýváme obecnými vlastnostmi a podobami mezihvězdné látky, v druhé kapitole teoreticky popisujeme studium spekter a třetí kapitola se zabývá studovanými hvězdami a jejich okolím. Poslední kapitola se věnuje výsledkům zpracování spekter jednotlivých hvězd.

Tato práce se zaměřuje na identifikaci mezihvězdných čar, výpočet a nalezení radiálních rychlostí jednotlivých komponent mezihvězdných oblaků ležících ve směru studovaných hvězd, výpočet jejich teplot a turbulentních rychlostí.

Klíčová slova: mezihvězdná látka, spektrum, spektrální čáry, radiální rychlost, teplota, turbulence

Abstract:

In the present work we properly study interstellar medium in the direction of the stars HD 36512, HD 36841, HD 36959, HD 36960, HD 37021, HD 37043, HD 37061, and HD 37903. In the first chapter we deal with general properties and forms of the interstellar medium, in the second chapter we theoretically describe the study of spectrum and in the third chapter we deal with studied stars and their surroundings. The last chapter is devoted to results of spectrum processing of each star.

This thesis is especially focused on identification of interstellar spectral lines, determination of radial velocities of each component of interstellar clouds found in the direction of studied stars and its temperature and turbulent velocities.

Keywords: interstellar medium, spectrum, spectral lines, radial velocity, temperature, turbulence

Obsah

1	Mezihvězdná látka	7
1.1	Historie a výzkum mezihvězdné látky	8
1.2	Vlastnosti mezihvězdné látky	10
1.2.1	Rozložení mezihvězdné látky	10
1.2.2	Zdroje energie, spektra mlhovin	12
1.3	Podoby mezihvězdné látky	14
1.3.1	Oblasti neutrálního vodíku H I	14
1.3.2	Oblasti ionizovaného vodíku H II	14
1.3.3	Molekulová oblaka	17
1.3.4	Prachová oblaka	18
1.3.5	Planetární mlhoviny	20
1.3.6	Zbytky po novách a supernovách	22
1.3.7	Koronální plyn	23
1.3.8	Mezegalaktická látka	24
2	Fyzika mezihvězdné látky	25
2.1	Spektrální čáry	25
2.1.1	Základní parametry	25
2.1.2	Procesy při vzniku čar a kontinua	26
2.1.3	Mezihvězdná extinkce	29
2.2	Rozšíření spektrálních čar	29
2.2.1	Přirozená šířka čáry	29
2.2.2	Rozšíření čar srážkami	31

2.2.3	Tepelné rozšíření	33
2.2.4	Rozšíření rotací	35
2.2.5	Rozšíření turbulencí	36
3	Studované hvězdy a jejich okolí	37
3.1	Orion OB1 asociace	37
3.2	HD 36512	40
3.3	HD 36841	41
3.4	HD 36959 a HD 36960	42
3.5	HD 37021	44
3.6	HD 37043	45
3.7	HD 37061	47
3.8	HD 37903	49
4	Zpracování spekter	51
4.1	Identifikace spektrálních čar	51
4.2	Fitování spektrálních čar	53
4.3	Radiální rychlosti	54
4.4	Teploty, turbulentní rychlosti	54
4.5	HD 36512	55
4.6	HD 36841	57
4.7	HD 36959	64
4.8	HD 36960	70
4.9	HD 37021	75
4.10	HD 37043	80
4.11	HD 37061	81
4.12	HD 37903	86
4.13	Srovnání výsledků jednotlivých hvězd	91
4.13.1	Srovnání identifikace čar	91
4.13.2	Srovnání radiálních rychlostí	92
4.14	Diskuze výsledků	94



Obrázek 1: Oblast kolem mlhoviny M42 v IR, Spitzer, NASA

Kapitola 1

Mezihvězdná látka

V následující kapitole bylo čerpáno z těchto zdrojů: Mikulášek, Krtička, 2005; Dyson, Williams, 1997; Osterbrock, 1989; Spitzer, 1978 a Kleczek, 2002.

Přestože se většina astrofyziků zabývá atraktivními tématy, jako je fyzika galaxií, hledáním exoplanet, původ gama záblesků apod., nezůstává výzkum mezihvězdné látky pozadu. Z jednoduchého důvodu: výzkumem mezihvězdné látky se dozvídáme informace nejen o mezihvězdném prostředí, ale také o dynamice galaxií, vzniku, vývoji a zániku hvězd nebo o složení látky ve vesmíru.

Široké spektrum aplikací znalostí z pozorování mezihvězdné látky vyplývá také z faktu, že pod termín „mezihvězdná látka“ řadíme nejrůznější formy a typy jako jsou oblasti ionizovaného vodíku H II, planetární mlhoviny, koronální plyn nebo obří molekulová mračna. Výzkum každé z těchto podob pomáhá odhalovat tajemství i dalších odvětví astrofyziky. Výzkumem planetárních mlhovin a zbytků po supernovách si doplňujeme představy o závěrečných vývojových stádiích hvězd, studiem zárodečného materiálu hvězd získáváme informace i o vzniku Slunce a studiem rozložení mezihvězdné látky se nám daří sestavovat dynamické modely Galaxie.

Mezihvězdná látka sice ovlivňuje prostředí kolem sebe, respektive objekty, okolo kterých se nachází (ať už je samotné, nebo jejich pozorování), ale také ona je ovlivňována těmito objekty. Příkladem je obohacování hvěz-

dami o těžší prvky, interakce s hvězdným větrem, vznik nových hvězd a jejich planetárních soustav. Mezihvězdná látka je ovlivněna interakcí jak na mikroskopické úrovni (např. ionizace UV zářením hvězd typu O), tak rovněž na makroskopické úrovni (např. interakce jednotlivých galaxií). Studium mezihvězdného prostředí obohacuje jiné obory astrofyziky o cenné údaje, na druhou stranu studium mezihvězdné látky by se neobešlo bez oborů jako je kvantová fyzika nebo kosmologie.

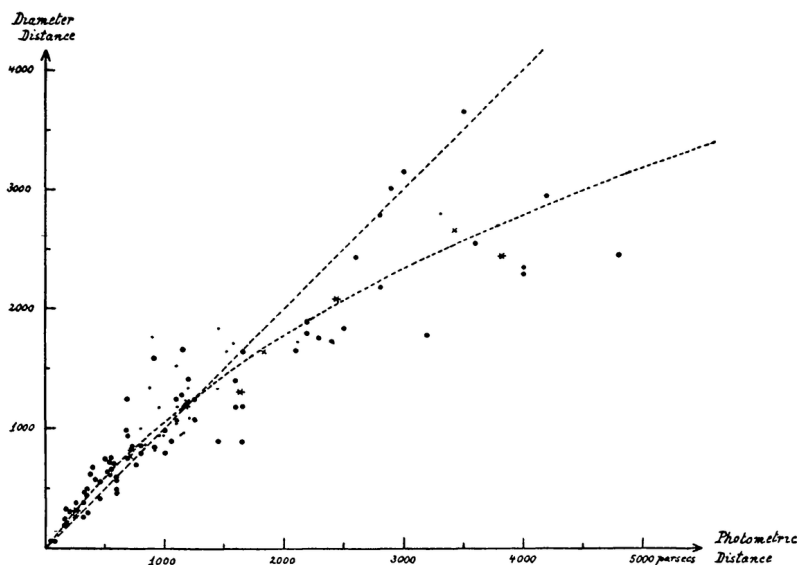
1.1 Historie a výzkum mezihvězdné látky

První myšlenky o mezihvězdné látce sahají do 19. století, ale zmínky o její existenci, respektive myšlenky o existenci jakéhosi mezihvězdného prostředí, můžeme hledat už v 17. století. Tyto myšlenky zřejmě poprvé vyjádřil Francis Bacon ve své *Sylva Sylvarum* (1623). Podobně Robert Boyle diskutoval myšlenku mezihvězdných oblastí na noční obloze ve svých traktátech z roku 1674. Avšak fyzikálně podložené domněnky o existenci mezihvězdné látky patří statistickým výpočtům Heinricha Wilhema Olberse a George Wilhema Struvea, kteří za podpory statistiky počtu hvězd přišli s myšlenkou, že v prostředí mezi hvězdami dochází k pohlcování světla. Věrohodnější důkaz přišel s objevem spektroskopické dvojhvězdy Mizaru, v jejímž spektru byla později nalezena čára, která nejevila změnu své polohy, ale také svým profilem neodpovídala hvězdným čarám. Objevitelem byl v roce 1889 Edward Charles Pickering. Podobně našel nehybnou „K“ čáru ionizovaného vápníku Ca II Johan Franz Hartmann (Hartmann, 1904) ve spektru hvězdy δ Orionis roku 1904. Ten se pozastavoval nejen nad vlastnostmi čáry (jednalo se o velmi slabou a zároveň ostrou čáru), ale především nad tím, že nevykazovala změnu své polohy, jako ostatní čáry ve spektru této spektroskopické dvojhvězdy. Správně usoudil, že se jedná o čáru, která nevznikla ve hvězdě, ale v prostředí mezi pozorovatelem a pozorovanou hvězdou. Práci Hartmanna rozšířila o několik let později Mary Lea Hegerová, která zkoumala „D“ čáry taktéž u δ Orionis a β Scorpii (Heger, 1919).

Za okamžik potvrzení existence mezihvězdné látky se považuje rok 1930,

kdy Robert Julius Trümpler dokázal přítomnost mezihvězdné látky porovnáním vzdáleností otevřených hvězdokup (viz obrázek 1.1). Zjistil vzdálenosti na základě jasnosti hvězdokup a vzdálenosti zjištěné z jejich úhlového průměru. Hodnota jejich podílu rostla se vzdáleností, což může být vysvětleno extinkcí v důsledku přítomnosti mezihvězdné látky (Trümpler, 1930).

Analýzou spektrálních čar mezihvězdného prostředí se zabýval mimo jiné i Carlyle S. Beals (1936), který vysvětlil asymetrické profily absorpčních čar vznikajících v mezihvězdném prostředí. Některé z mezihvězdných čar zkoumaných ve spektrech ϵ a ζ Orionis byly dvojité nebo jejich profil vykazoval asymetrický tvar. To je dáno superpozicí několika čar příslušejícím stejnému přechodu, ale vznikajících v jiné části mezihvězdného oblaku. Komponenty mezihvězdných oblaků se pohybují jinými radiálními rychlostmi, proto jsou některé čáry díky Dopplerova efektu posunuty k modrému nebo červenému konci spektra. Tímto mohou vznikat složitější profily, které dokazují dynamické vlastnosti mezihvězdného materiálu (Beals, 1936).



Obrázek 1.1: Vzdálenosti otevřených hvězdokup zjištěné Robertem Trümplerem vynesené do grafu; obrázek převzat z práce Absorption of Light in the Galactic Systems; Trümpler, 1930

1.2 Vlastnosti mezihvězdné látky

Mezihvězdná látka se skládá z elementárních částic, atomů, molekul, prachových částic, fotonů a částic kosmického záření. Nachází se v prostředí mezi hvězdami a v porovnání se samotnými hvězdami má mnohonásobně nižší hustotu typicky $5 \cdot 10^{-21} \text{ kg/m}^3$.

Složení mezihvězdného materiálu odpovídá po chemické stránce povrchu hvězdy: koncentrace vodíku, helia a těžších prvků jsou v poměru: 100:8:0,1. Atomy můžeme nalézt v jejich neutrální i ionizované formě, záleží na stupni ionizace. Kromě atomů nacházíme i molekuly, mezi nejvíce zastoupení patří molekula H_2 , avšak nalezneme i složitější molekuly, dokonce i složité molekuly jako je HC_{11}N .

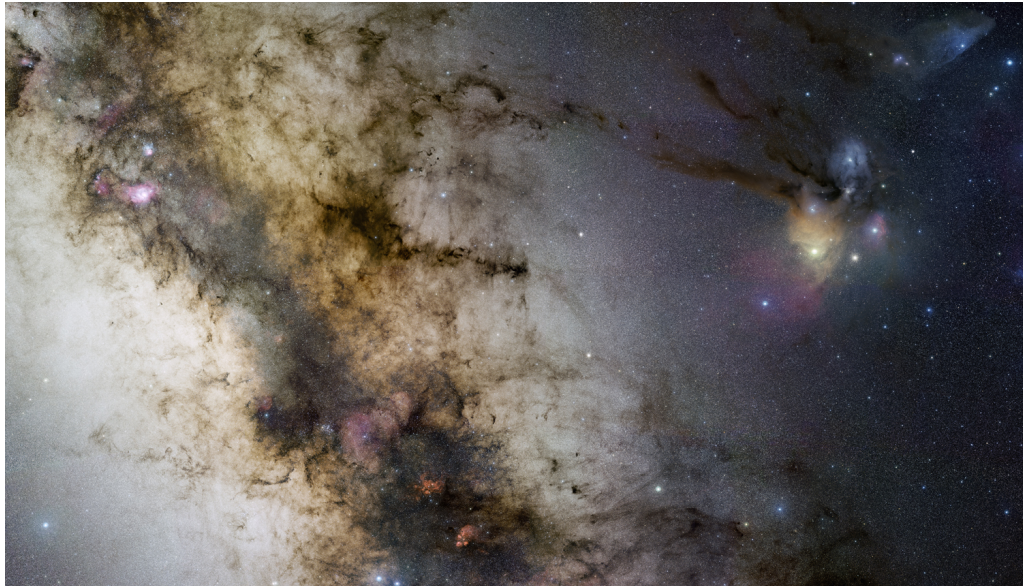
1.2.1 Rozložení mezihvězdné látky

Mezihvězdná látka není rozložena rovnoměrně. Podíváme-li se na Galaxii (respektive na Mléčnou dráhu), zcela zřetelně si všimneme, že se mezihvězdná látka soustřeďuje ve spirálních ramenech galaktického disku o poloměru 25 kpc a tloušťce 250 pc. Tento závěr však nezískáme pohledem na rozložení mezihvězdné látky přímo v Galaxii (kromě částí které nejsou zastíněny paradoxně mezihvězdnou látkou), ale usuzujeme tak z rozložení mezihvězdné látky v cizích spirálních galaxiích. Při pohledu na snímky (ať už v krátkovlnném či dlouhovlnném záření) vzdálených galaxií odpovídajícím typu naší Galaxie – tudíž spirálnímu – si všimneme, že většina mezihvězdné látky se hromadí ve spirálních ramenech (ať už jako mlhoviny kolem nově vznikajících hvězd nebo planetární mlhoviny).

Při bližším pohledu na mezihvězdnou látku hraje roli především interakce s hvězdami samotnými. Mezihvězdnou látku nalezneme např. v podobě obřích molekulových oblaků, ze kterých se hvězdy postupně vyvíjejí. Nalezneme ji jako planetární mlhoviny nebo zbytky po výbuchu supernov, H II oblasti okolo hvězd typu O nebo jako, pro pozorovatele noční oblohy nejoblíbenější, tzv. reflexní mlhoviny. Mezihvězdná látka je sice zárodečný materiál, ze kterého hvězdy vznikají, ale i samotné hvězdy ovlivňují mezihvězdnou

nou látku tím, že ji v průběhu svého života vracejí zpět do prostoru, ať už formou hvězdného větru nebo v rámci své závěrečné etapy života. Mezihvězdnou látku však neovlivňují pouze hvězdy, ale i větší celky, jako jsou galaxie. Ty se mohou navzájem ovlivňovat, dochází ke srážkám galaxií nebo k jejímu pohlcení. Tyto všechny interakce ovlivňují mezihvězdný materiál.

Jak z předchozího odstavce vyplývá, mezihvězdná látka se nachází ve vesmíru v mnoha podobách. Rozdělujeme ji na několik základních typů: H I oblasti, H II oblasti, molekulové oblaky, planetární mlhoviny, zbytky po supernových nebo koronální plyn (konkrétně v podkapitole 1.3). Tyto podoby mezihvězdné látky se odlišují jak ve svém původu, tak v hmotnosti, vývoji a věku hvězd, které se v jejich bezprostřední blízkosti nacházejí. Co je však spojuje je podobný původ zdroje energie, díky níž vyzařují, a také podobná spektra.



Obrázek 1.2: Snímek centra Galaxie, fotografie: Stéphane Guisard, ESO

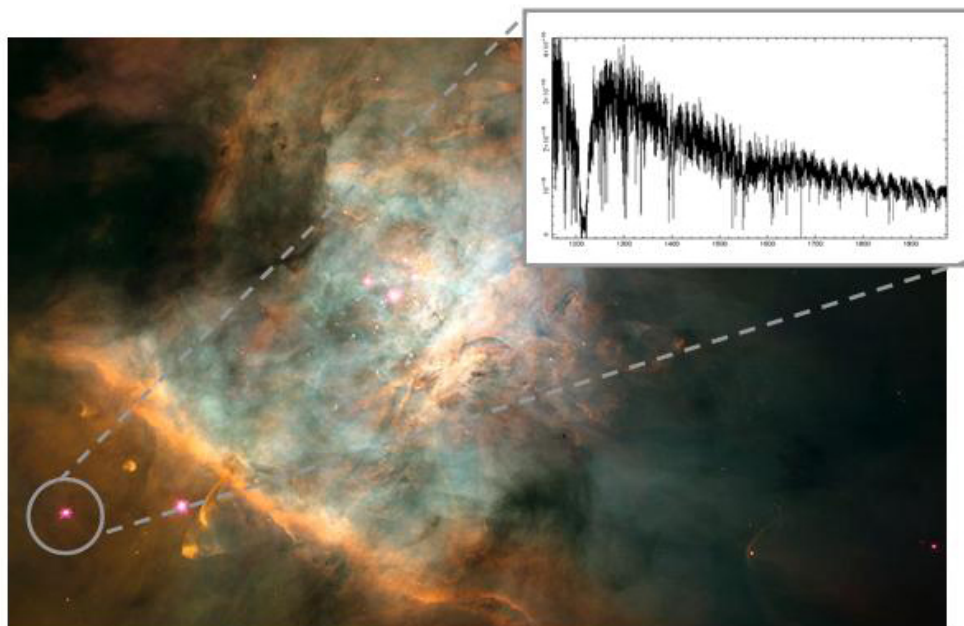
1.2.2 Zdroje energie, spektra mlhovin

Zdrojem energie, který umožňuje emisním mlhovinám zářit, je ultrafialové záření hvězd nacházející se v blízkosti mlhoviny. V případě H II oblastí se jedná o hvězdy typu O, popř. typu B, u planetárních mlhovin je zdrojem energie obnažené, elektronově degenerované jádro hvězdy. Jedná se ve většině případů o hvězdy s povrchovou teplotou $T > 3 \cdot 10^4$ K. Fotony emitované hvězdou s energií větší než 13,6 eV, což je ionizační potenciál vodíku, jsou pohlceny v procesu fotoionizace, při kterém se přebytek energie uvolní ve formě kinetické energie uvolněného elektronu. Díky srážkám mezi elektrony a ionty se v mlhovinách udržuje Maxwellovo rozložení rychlostí částic odpovídající teplotě 5000 K – 20000 K. Při rekombinaci elektron však se nevrátí přímo na základní hladinu, ale postupuje kaskádovitě, díky tomu můžeme pozorovat mlhoviny ve viditelném záření. Některé z přechodů, které nazýváme zakázané, mají tak malou pravděpodobnost, že k nim zářivým procesem většinou nedochází. Avšak v případě mlhovin, pro které jsou typické nízké hustoty, mají srážkové deexcitace menší pravděpodobnost než zakázané přechody, proto se ve spektrech mlhovin setkáme i s čarami, které lze těžko vytvořit v laboratorních podmínkách, jako jsou: [OII] v ultrafialové části spektra, [OIII] v zelené části nebo [NII] v červené oblasti spektra.

Kromě zakázaných čar pozorujeme samozřejmě i čáry povolených přechodů, u vysoce ionizovaných mlhovin nalezneme i čáry neutrálního nebo ionizovaného helia. Kontinuum je složeno ze dvou složek: první tvoří atomární volně – vázané přechody v části Paschenova a Balmerova kontinua. Druhou část kontinua spektra mlhovin tvoří reflexní kontinuum, které vzniká v důsledku rozptylu záření na částech prachu. Prach se však projeví především v infračervené části kontinua, kde září díky své teplotě okolo 100 K. Přes všechny tyto složky kontinua patřícím spektru mlhovin, je samotné kontinuum velmi slabé.

Pořídíme-li spektrum některé z hvězd, i v jejím spektru se nám mezihvězdná látka projeví a to především absorpčními čarami, které se projevují především úzkými profily. Tyto čáry vznikají v prostředí mezi pozorovanou

hvězdou a pozorovatelem. Z těchto čar lze zjistit mnoho zajímavých vlastností mezihvězdné látky. Lze zjistit radiální rychlosti jednotlivých komponentů mezihvězdných oblaků, které putují prostorem a tudíž zkoumat dynamiku daného prostředí.



Obrázek 1.3: Ilustrativní obrázek spektra hvězdy HD 37042, která se nachází v H II oblasti, konkrétně v okolí mlhoviny M 42. Kromě čar vzniklých v samotné hvězdě, nalezneme ve spektru i čáry mezihvězdného prostředí, které se nachází mezi pozorovatelem a hvězdou. Snímek: HST [1], spektrum: STIS [2]

1.3 Podoby mezihvězdné látky

Jak již bylo naznačeno v předchozím textu, mezihvězdná látka se ve vesmíru nachází v mnoha podobách. Rozeznáváme H I oblasti, H II oblasti, molekulová oblaka, prachová oblaka, planetární mlhoviny, zbytky po výbuchu supernov, koronální plyn a mezigalaktickou látku.

1.3.1 Oblasti neutrálního vodíku H I

Mezihvězdná látka, ve které se vodík nachází v neutrální formě, se nazývá H I oblast. Většina látky ve spirálních ramenech galaxií se právě nachází v této formě relativně studeného, neutrálního vodíkového plynu. Tyto oblasti se dají jednoduše detekovat v rádiové oblasti, protože neutrální vodík září na vlnové délce 21,1 cm. Dochází k tomu díky zakázanému přechodu z metastabilní hladiny na hladinu s nižší energií. Při tom je vyzářen foton, jehož vlnová délka odpovídá 21,1cm. Elektron zůstává na metastabilní hladině, kdy je spin protonu a elektronu orientován paralelně, po dobu několika miliónů let a až poté spontánně přechází do hladiny, kdy jsou spiny orientovány antiparalelně. K excitaci do metastabilní hladiny dochází nepružnými srážkami, jelikož pravděpodobnost excitace absorbováním záření o vlnové délce 21,1 cm je menší, než pravděpodobnost excitace právě nepružnou srážkou.

Neutrální vodík je dominantní právě v mračnecích, která mají dostatek hvězdného záření, které je schopno disociovat molekuly na jednotlivé atomy, ale nemají přísun vysokoenergetických fotonů, které mají schopnost vodík ionizovat. Tato oblaka mohou putovat prostorem samostatně, proto můžeme ve spektrech hvězd nalézat čáry těchto oblaků, jejichž profily jsou odlišné od těch hvězdných a svým posunem středu čáry poukazují na své radiální rychlosti.

1.3.2 Oblasti ionizovaného vodíku H II

Difuzní mlhoviny neboli H II oblasti jsou vyhledávanými objekty na noční obloze nejen při pohledu pouhým okem, ale také při pořizování snímků. Tyto

oblasti jsou atraktivní především nejen kvůli své zajímavé struktuře, ale také se často nacházejí v místech zrodu mladých jasných hvězd, s nimiž tvoří krásná zákoutí nočního nebe, a tudíž jsou velmi oblíbená jak u astronomů, tak u laické veřejnosti. Oblasti H II se odlišují od H I oblastí především tím, že se nacházejí v blízkosti hvězd spektrálního typu O, popřípadě B, které produkují vysoko-energetické záření schopné ionizovat dostatečné množství vodíku (proto označení H II). Oblast pak v důsledku rekombinace sama vyzařuje ve viditelném světle. Ostatní rozdíly mezi H I a H II oblastmi už vyplývají z výše popsaného faktu.

Jedná se o poměrně rozlehlé oblasti – s rozměry okolo 50 pc. Koncentrace částic H II oblastí se pohybuje okolo 10 až 10^2 cm^{-3} , avšak nalezneme i oblasti mnohem hustší, ve kterých může dojít k tvorbě hvězd. Hmotnosti škála je od 10^2 do 10^4 sluneční hmotnosti a typická teplota H II oblastí je 8000 K. Rozložení látky v H II oblastech není rovnoměrné, vyskytují se v ní méně či více husté oblasti, které se mohou pohybovat, ať už kvůli hvězdnému větru, či expanzi H II oblastí. Typické vnitřní pohyby dosahují rychlostí v řádu desítek km/s.

Jak již bylo psáno v předchozím odstavci, H II oblasti se vyskytují v okolí hvězd spektrálního typu O nebo B, respektive v okolí takovýchto hvězd vznikají. Hvězdy těchto spektrálních typů totiž vyzařují dostatek fotonů o energii rovné nebo větší než 13,6 eV, což je ionizační potenciál vodíku. Jedná se o UV záření s vlnovou délkou rovnou nebo kratší 91,2 nm. Tyto energetické fotony dokáží vodík ionizovat. Elektrony se však nemusí vrátit na základní hladinu přímo, ale postupují kaskádovitě a UV záření se v podstatě mění na záření menších energií. Ve spektru hvězdy tak můžeme nalézt čáry jednotlivých přechodů a to nejen vodíkových, ale nacházíme i čáry Si II, S II nebo Mg II. Pokud se nachází v blízkosti H II oblasti velmi horká hvězda, nalezneme i čáry C IV, nebo Si IV.

V H II oblastech můžeme také najít i molekuly. Mezi nalezené molekuly patří OH, CO, CS, H₂O, CN, HCN, CH₃OH nebo H₃CO. Většina molekul je ale uvnitř hustých, koncentrovaných oblastí, které jsou bohaté i na prachovou složku a ionizující záření nemůže do těchto oblastí proniknout. Avšak ne

u všech molekul je tomu tak, některé unikají z těchto oblastí a obohacují tak ionizovanou H II oblast.

H II oblasti se koncentrují v galaktickém disku, respektive ve spirálních ramenech Galaxie. Tudíž pozorování vzdálených H II oblastí je omezováno mezihvězdnou látkou koncentrovanou v disku Galaxie. Mezihvězdnou extinkci, která takto vzniká, omezuje pozorování především na krátkých vlnových délkách. Ale díky rádiovým pozorováním můžeme objevit i vzdálené



Obrázek 1.4: H II oblast, mlhovina Carina, ESO

H II oblasti, které jsou v optickém oboru neviditelné. Zde se setkáváme s dalším problémem a to je určení blízké hvězdy, díky níž bychom byli schopni spočítat vzdálenost H II oblasti pomocí metody spektroskopických paralax. Známou obecnou metodou jak alespoň přibližně zjistit vzdálenost těchto oblastí je zjištění jejich radiálních rychlostí a porovnání s modelem Galaxie. Jedná se však o velmi nepřesnou metodu, jelikož radiální rychlosti jsou ovlivnitelné mnoha faktory, protože H II oblasti silně interagují s hvězdami v jejich blízkosti (např. prostřednictvím hvězdného větru).

Avšak u H II oblastí, které můžeme pozorovat v optickém oboru, lze jejich vzdálenost zjistit přesněji. Jak bylo naznačeno v předchozím odstavci, stačí k výpočtu jejich vzdálenosti nalezení hvězdy, která se nachází v blízkosti H II oblasti a která je odpovědná za její ionizaci. U těchto hvězd zjistíme jejich vzdálenost (která bude odpovídat vzdálenosti H II oblasti) pomocí metody spektroskopických paralax. Ne vždy lze ale určit hvězdu, jejíž vzdálenost by odpovídala vzdálenosti H II oblasti. Dodnes jsou místa, ve kterých se nepodařilo takovou hvězdu nalézt.

1.3.3 Molekulová oblaka

Molekulová oblaka (GMC - Giant Molecular Clouds) obsahují více než polovinu mezihvězdné látky. Po chemické stránce obsahují neutrální i molekulární vodík, helium a další těžší prvky, jednoduché i složitější molekuly a prachová zrna, která udržují nízké teploty těchto objektů, protože právě díky tomu se mohou uvnitř rodit nové hvězdy. Ne nadarmo se GMC přezdívají hvězdné porodnice.

Obří molekulová mračna se vyznačují velkými hmotnostmi - 10^5 do $10^6 M_{\odot}$ a zároveň velkými rozměry – okolo 150 světelných let. V porovnání s H II oblastmi je koncentrace částic vyšší, pohybuje se okolo $2 \cdot 10^2$ částic na cm^3 a srovnáme-li teplotu těchto objektů, tak teplota GMC je podstatně nižší – pohybuje se okolo 20 K. Vnitřní stabilita GMC je udržována především pohybem hustších částí, které kromě hustoty mají vyšší i teplotu, ta se pohybuje okolo 100 až 200 K.

Jak název „molekulová oblaka“ napovídá, mají GMC co dočinění s molekulami. Mezi nejlépe identifikovatelné molekuly (indikační) patří molekuly OH, CH, CS, C₃H₂ a především molekula CO. Čáry těchto molekul leží v oblastech spektra, která se dají dobře pozorovat pozemskými přístroji. Např. nejsilnější čára CO na 2,6 mm patří mezi nejzákladnější ukazatele přítomnosti GMC. A právě ke studiu molekul v mezihvězdném prostředí se využívá mikrovlnné a infračervené oblasti spektra. V infračervené oblasti spektra se vyskytují čáry molekul, které změnilly svůj vibrační stav a naopak v mikrovlnné oblasti dochází k emisi resp. absorpci při změně rotačního stavu molekuly.

1.3.4 Prachová oblaka

Prachová oblaka, resp. prachová složka v mlhovinách, vytváří známé reflexní mlhoviny, které vznikají v oblastech bohatých na prachová zrna a jsou os-



Obrázek 1.5: Molekulový oblak v oblasti Orlí mlhoviny s označením M 16. Snímek: HST [1]

větlovány blízkou hvězdou. Pozorovatel noční oblohy je může znát i v jiné formě, jako tzv. absorpční mlhoviny – velmi husté oblasti, které zeslabují světlo hvězd, které se za nimi nacházejí.

Nelze však rozlišovat čistě plynná oblaka a čistě prachová oblaka. Prachová složka se v podstatě nachází všude, záleží ale v jakém poměru se vyskytuje vůči plynové složce. Prachové částice nalezneme jak H II oblastech, tak v planetárních mlhovinách. A důsledky, které prachové částice zanechávají na vlastnostech dané oblasti, nejsou nezanedbatelné. Existují oblasti, které jsou na prachovou složku bohatší a ty můžeme rozpoznat i na nejznámějších snímcích H II oblastí jako tmavá místa, která zastiňují světlo vzdálenějších hvězd. Objektům, které jsou velmi tmavé a malé, se často říká globule. Naopak objektům, resp. útvarům, které se nacházejí na okrajích H II oblastí, se říká, podle jejich zjevu, elephant-trunk nebo comet-tail structures, neboli struktury připomínající sloní chobot nebo ocas komety.

Prachové částice samotné jsou po chemické stránce složeny především ze silikátů, křemičitanů, grafitu a amorfního uhlíku, polycyklických uhlovodíků a vodního ledu. Ten však není obvyklou součástí prachu mezihvězdného prostředí, vyskytuje se spíše uvnitř hustých částí GMC. Původ prachových částic je ve hvězdném větru chladných hvězd, především hvězd spektrálního typu M nebo hvězd typu C. Orientace částic je přizpůsobena magnetickému poli Galaxie: silokřivky magnetického pole svírají pravý úhel s delší osou prachových částic. To má za následek slabou polarizaci záření procházející prachovou oblastí.

Rozložení mezihvězdného prachu koresponduje s rozložením mezihvězdné látky v Galaxii. Koncentruje se především v galaktickém disku, konkrétněji ve spirálních ramenech. Jak již bylo popsáno v předchozím odstavci, vytváří mezihvězdná látka, ať už je nebo není bohatá na prachovou složku, shluky o rozměrech v desítkách až stovkách světelných let a o hmotnostech opět v desítkách až stovkách hmotností Slunce. Existují však hustší oblasti, říká se jim globule, resp. Bokovy globule, jejichž hmotnosti sahají do $1000 M_{\odot}$ a rozměry pouze okolo 1 pc. Prachová složka je velmi důležitá, protože udržuje relativně nízkou teplotu globulí, díky níž může docházet



Obrázek 1.6: Prachová oblast s označením VdB152. Snímek: Stephen Leshin

ke gravitační kontrakci objektů a tudíž k možnému vzniku hvězd.

Pro monitorování rozložení prachu v Galaxii se využívá především pozorování v infračerveném a rádiovém oboru. Neznámější prohlídku provedla družice IRAS, v této době pracuje na obdobném studiu rozložení prachu v Galaxii družice ISO.

1.3.5 Planetární mlhoviny

Název „planetární“ mlhovina nekorresponduje s objektem samotným. Název je čistě historický, jelikož se planetární mlhoviny v dalekohledech jeví jako nazelenalé kotoučky, připomínající pohled na planety. Jedná se o osamocené objekty, obálky plynu, které byly odvrženy v závěrečném vývojovém stádiu hvězdy. Centrální hvězda uvnitř planetární mlhoviny je velmi horká, s teplotou okolo $T = 5 \cdot 10^4$ K, což ji v mnoha případech činí teplejší než hvězdy spektrálního typu O, ale za to má nižší zářivý výkon. Tato elektronově de-

generovaná hvězda přechází postupně ve stádium bílého trpaslíka.

Obálky, které pozorujeme jako planetární mlhoviny, se rozpínají do okolního prostoru rychlostmi okolo 25 km/s. Koncentrace částic planetárních mlhovin sahá od 10^2 cm^{-3} do 10^4 cm^{-3} , což s přihlédnutím k faktu, že se neustále rozpíná, znamená, že postupně jejich hustota klesá a s ní i možnost planetární mlhovinu pozorovat. Během řádově 10^4 let přestane být mlhovina pozorovatelná. Hmotnost typické planetární mlhoviny se pohybuje okolo $0,1 M_{\odot} - 1,0 M_{\odot}$ a poloměr okolo 0,1 pc.

Jak již bylo psáno v předchozím textu, záření planetárních mlhovin je přetransformovaným UV zářením z hvězdy, nacházející se poblíž mlhoviny. V tomto případě se jedná o centrální hvězdu, která je zdrojem UV záření. Vzhledem k vyšším teplotám centrálních hvězd u planetárních mlhovin než



Obrázek 1.7: Planetární mlhovina NGC 6164. Snímek: Don Goldman

u H II oblastí, mají planetární mlhoviny vyšší stupeň ionizace. U mlhovin, jejichž centrální hvězda má spíše nižší teplotu, jsou spektra podobná spektrům H II oblastí, ale u planetárních mlhovin s teplejší centrální hvězdou, nacházíme ve spektru nejen čáry H II a He I, ale i silné čáry He II, [O III], [Ne III] nebo i [Ne V].

1.3.6 Zbytky po novách a supernovách

Mezihvězdnou látku do okolního prostředí navrací i výbuchy nov a supernov. Jedná se o odlišnou událost, než v případě vzniku planetárních mlhovin, proto nalezneme rozdíly i ve spektrech těchto dvou forem mezihvězdné látky.

Obálky, kterými jsou novy obklopeny, nejsou příliš fotoionizovány. Jejich emisní spektra obsahují čáry [Fe II] a [Fe III], případně [Co III]. Mlhoviny, které vznikly po výbuších supernov září především díky synchrotronovému záření volných elektronů. Ve vyvrženém materiálu, v obálce, zůstalo zamrzlé magnetické pole, podél jehož siločar se volné elektrony spirálovitě pohybují. Centrální hvězda je tvořena především neutrony, s typickou hmotností okolo $1,3 M_{\odot}$ a rozměry okolo 20 km. Látka této tzv. neutronové hvězdy je neutronově degenerovaná.

Rozeznáváme dva druhy zbytků po supernovách, které se odlišují ve tvaru a ve zdroji energie: klasické zbytky a pleriony. Klasické zbytky po výbuchu supernovy nejsou příliš nápadné, jejich tvar je sférický a uvnitř tohoto útvaru se vyskytuje velmi zředěný plyn. Zdrojem energie je v tomto případě kinetická energie exploze. Při rozpínání se části vyvržené obálky srážejí s látkou okolního prostoru, čímž se uvolňuje energie, která se využije k ionizaci a tepelnému pohybu částic. Pleriony jsou typické svým nepravidelným tvarem, látka se vyskytuje i uvnitř mlhoviny, kde se také nalézá i zdroj energie – rádiový pulzar (typickým příkladem je M 1 v souhvězdí Býka).



Obrázek 1.8: Zbytek po supernově Vela. Koláž: David De Martin, Snímek: ESO/ESA/NSA

1.3.7 Koronální plyn

Koronální plyn je zřejmě produktem supernov. Svůj název si vysloužil především díky svým typickým vysokým teplotám. Jedná se tedy o velmi horký plyn, teplota sahá zhruba od $5 \cdot 10^5$ do 10^6 K, a zároveň o velmi řídký plyn, koncentrace částic se pohybuje okolo 10^3 částic/ m^3 . Tento zajímavý typ ionizované mezihvězdné látky je velmi ovlivňován magnetickým polem Galaxie. To udržuje koronální plyn ve vázaných strukturách.

Koronální plyn lze pozorovat pouze mimo Zemi. Rentgenové záření, které emituje, stejně tak jako typické absorpční čáry O VI a N V, které se vyskytují v jeho spektru, nejsou pozorovatelné přes zemskou atmosféru.

1.3.8 Mezigalaktická látka

Mezigalaktická látka je, jak název napovídá, látka, vyplňující prostor mezi galaxiemi. Jedná se o horkou látku o teplotách v řádu 10^6 K, která se vyznačuje velmi nízkou hustotou 10^{-27} kg/m³. Původní myšlenky předpokládaly, že se jedná o materiál složený z prvotního vodíku a helia. Ale později bylo zjištěno, že obsahuje obrovské množství kovů, které je promícháno s vodíkem i heliem. Tyto těžké prvky nemohly vzniknout jinak, než ve hvězdách a být určitým způsobem vyvrhnuty mimo galaxie.

V této době se předpokládá, že látka mezigalaktického prostředí je o tyto těžší prvky obohacována především díky "galaktickému větru", resp. výtrysky látky z aktivních galaktických jader, které vyvrhují do okolního prostoru vysoce nabitě částice. Na druhou stranu, mezigalaktická látka interaguje i se samotnými galaxiemi. Jak již lze předpokládat i z předchozího textu, mezigalaktická látka není rozložena rovnoměrně. Spektroskopickým rozborem kvazarů byla nalezena oblaka ionizovaného helia a pozorováním čáry L_α ve spektrech mezigalaktické látky byly odhalena vodíková oblaka, jejichž počet je natolik veliký, že se jim říká Lymanův les (Lyman Forest).

Kromě plynné složky byl pozorován i prach v mezigalaktickém prostředí a to pomocí pozorování ISO. Naopak družice ROSAT poodhalila právě přítomnost žhavého plazmatu mezi galaxiemi o teplotě několika desítek miliónů kelvinů.

Kapitola 2

Fyzika mezihvězdné látky

V následující kapitole bylo především čerpáno z těchto zdrojů: Mikulášek, Krtička, 2005; Dyson, Williams, 1997; Osterbrock, 1989 a Rutten, 2003

2.1 Spektrální čáry

Ve své diplomové práci se zabývám především zpracováním pozorování spektrálních čar mezihvězdného prostředí. Pro jejich správné zpracování je nutné porozumět procesům, při kterých čáry vznikají, jakým způsobem jsou rozšířeny a které profily odpovídají hvězdným a které mezihvězdným čarám.

2.1.1 Základní parametry

Absorpční čára vzniká při přechodu elektronu z nižší energetické hladiny s energií E_n na vyšší hladinu s energií E_m . Při daném přechodu se spotřebuje přesně dané množství energie odpovídající energetickému rozdílu jednotlivých hladin n a m :

$$\Delta E = E_m - E_n . \quad (2.1)$$

Toto přesné množství energie vymezí i konkrétní frekvenci, která přechodu odpovídá:

$$\Delta E = h\nu_0 . \quad (2.2)$$

Ve spektru zaznameneáme úbytek energie na dané vlnové délce v podobě úzké absorpční čáry. Takových spektrálních čar se vyskytuje ve spektru mnoho – v závislosti na chemickém složení a obsahu prvků, teplotě prostředí, resp. na stupni ionizace daných prvků.

Vzhled čar, resp. jejich tvar, neodpovídá zcela tenké, ostré čáře, ale je poněkud rozšířený. Mluvíme tak o přirozené šířce čáry. Ta je dána konečnou dobou přechodu mezi jednotlivými hladinami E_m a E_n . Čáry jsou ale především rozšířeny díky jiným efektům. U těch nejběžnějších rozšíření rozeznáváme určité profily, které vystihují rozšíření dané čáry právě konkrétním procesem (blíže v kapitole 2.1.4. Rozšíření spektrálních čar).

U spektrální čáry rozeznáváme tzv. jádro čáry a křídla čáry. Ta dělíme na modré a červené křídlo, podle toho, ve které části spektra (krátkovlnější nebo dlouhovlnější) se křídlo nachází. Profil čáry se obvykle vztahuje ke kontinuu spektra – toku záření, kterému se přisuzuje relativní intenzita $I_r = 1$. Ekvivalentní šířkou nazýváme hodnotu odpovídající šířce obdélníku o výšce odpovídající jednotkové intenzitě ve středu čáry a o obsahu odpovídajícímu obsahu reálné čáry.

2.1.2 Procesy při vzniku čar a kontinua

Spektrální čáry vznikají uvnitř atomu několika procesy:

1) zářivou excitací – elektron je vybuzen z nižší n -té hladiny na vyšší m -tou hladinu pohlcením fotonu o frekvenci odpovídající rozdílu energií jednotlivých hladin:

$$h\nu = E_m - E_n . \quad (2.3)$$

2) spontánní zářivou deexcitací – elektron samovolně seskočí z vyšší m -té hladiny na nižší n -tou hladinu, přičemž vyzáří foton o frekvenci odpovídající

rozdílu energií jednotlivých hladin:

$$h\nu = E_m - E_n . \quad (2.4)$$

3) vynucenou zářivou deexcitací – k seskoku elektronu z vyšší m -té hladiny na nižší n -tou hladinu dojde při interakci atomu s fotonem o frekvenci odpovídající energii přechodu mezi jednotlivými hladinami. Při deexcitaci je vyzářen další foton opět o vlnové délce odpovídající danému přechodu.

4) srážkovou excitací – k excitaci atomu – přechodu elektronu z nižší n -té hladiny na vyšší m -tou hladinu dojde v důsledku nepružné srážky s další částicí.

5) srážkovou deexcitací - k deexcitaci atomu může dojít i v důsledku srážky s další částicí, která odebere energii odpovídající přechodu na nižší hladinu.

Záření v kontinuu vzniká díky širšímu spektru procesů. Od neelastických (vázaně-volné, volně-vázané, volně-volné) až po elastické procesy (Thomsonův a Rayleighův rozptyl).

Neelastické procesy

1) fotoionizace — atom nebo iont absorbuje foton o energii vyšší nebo rovné energii potřebné k ionizaci atomu.

2) srážková ionizace – atom nebo iont získá nepružnou srážkou dostatek energie k ionizaci.

3) zářivá rekombinace – elektron se vrátí na některou z hladin atomu E_n zároveň s vyzářením fotonu o frekvenci v závislosti na kinetické energii elektronu E_{kin} :

$$h\nu = E_{kin} - E_n . \quad (2.5)$$

4) srážková rekombinace – k rekombinaci může dojít i při tříčásticové srážce, při které se srazí atom, elektron a další částice, která odebere elektronu dostatek energie k tomu, aby rekombinoval.

5) absorpce fotonu – při těsném průletu kolem iontu, který na sebe přeneše část hybnosti a energie fotonu, může elektron absorbovat foton, který zvýší jeho kinetickou energii.

6) brzdné záření – záření vznikající při procesu, kdy elektron emituje foton, o jehož energii se sníží kinetická energie elektronu. Stejně jako v předchozím procesu, musí dojít k těsnému průletu v blízkosti iontu.

Elastické procesy

1) Thomsonův rozptyl – rozptyl na volných elektronech. Účinný průřez je konstantní a nezávisí na vlnové délce (v CGS):

$$\sigma^T = \frac{8\pi}{3} r_e^2 = 6,65 \cdot 10^{-25} \text{cm}^2 . \quad (2.6)$$

2) Rayleighův rozptyl – za rozptylující částice se považují shluky molekul, jejichž velikost lze srovnat s vlnovou délkou záření. Zde již účinný průřez závisí na vlnové délce, resp. frekvenci:

$$\sigma_\nu^R \sim f_{mn} \sigma^T \nu^4 . \quad (2.7)$$

3) Mieův rozptyl – rozptylujícími částicemi jsou částičky prachu. S tímto rozptylem se setkáme např. v mezihvězdném prostředí. Účinný průřez je pro viditelnou část spektra úměrný frekvenci:

$$\sigma_\nu^M \sim \nu . \quad (2.8)$$

2.1.3 Mezihvězdná extinkce

Světlo vzdálenějších hvězd může být zeslabeno extinkcí v důsledku přítomnosti mezihvězdné látky, které se nachází mezi objektem a pozorovatelem. Projev této tzv. mezihvězdné extinkce je patrný i pouhým okem na noční obloze v místech Mléčné dráhy, kde se vyskytují tmavé oblasti.

Záření o hustotě toku dI_ν , které je pohlceno v oblasti o základně 1 cm^2 , výšce sloupce ds a koncentraci částic n lze popsat (za předpokladu kolmo dopadajícího záření):

$$dI_\nu \equiv -\sigma_\nu n I_{\nu 0} ds , \quad (2.9)$$

kde σ_ν je účinný průřez částice. Pak lze psát:

$$I_\nu = I_{\nu 0} \exp(-\tau) , \quad (2.10)$$

kde I_ν je pozorovaná hustota zářivého toku, $I_{\nu 0}$ je počáteční hustota zářivého toku a τ je optická hloubka, kterou lze zapsat vztahem (pokud se extinkční vlastnosti částic, nacházející se v pozorovaném prostředí, nemění a jejich rozložení je ve směru paprsku rovnoměrné):

$$\tau = (\sigma_\nu \cdot n) \cdot s , \quad (2.11)$$

Prostředí dělíme podle optické hloubky:

- $\tau > 1$ opticky tlusté vrstvy
- $\tau < 1$ opticky tenké vrstvy

2.2 Rozšíření spektrálních čar

2.2.1 Přirozená šířka čáry

Přirozená šířka čáry vyplývá z přirozené neostrosti energetických hladin. Elektron, který přechází na hladinu E_n , neusedne přesně na hladinu E_n ,

ale může se usadit v rozmezí hladin: $E_n - \Delta E$ až $E_n + \Delta E$. Tímto může atom pohltit záření o frekvenci v rozmezí $\nu_0 - \Delta\nu$ až $\nu_0 + \Delta\nu$. Čára je nejhlubší v místě odpovídající frekvenci ν_0 , poté se její hloubka symetricky zmenšuje, což odpovídá největší pravděpodobnosti přechodu na E_n hladinu a s přibývajícím intervalem ΔE se pravděpodobnost snižuje.

Jednodušeji lze říci, že neurčitost doby $\Delta\tau$, po kterou atom zůstává v excitovaném stavu je spojena s neurčitostí energie ΔE pomocí Heisenbergovy relace:

$$\Delta E \cdot \Delta\tau = h . \quad (2.12)$$

Toto rozšíření se nazývá přirozené rozšíření ("přirozené" díky tomu, že rozšíření nastává vždy, aniž by byly přítomny jiné částice) nebo jako zářivý útlum (vycházející z představy atomu jako tlumeného harmonického oscilátoru). Vezmeme-li jako příklad atom s dvěma hladinami, pak útlumová konstanta odpovídá pravděpodobnosti přechodu z hladiny m na hladinu n :

$$\gamma = b_{mn} , \quad (2.13)$$

která se pohybuje okolo $b \approx 10^8 \text{s}^{-1}$. Tvar takto rozšířené čáry odpovídá Lorenzovu profilu:

$$\phi(\nu - \nu_0) = \frac{\frac{\gamma}{4\pi^2}}{(\nu - \nu_0)^2 + \left(\frac{\gamma}{4\pi}\right)^2} . \quad (2.14)$$

Rozšíření pak odpovídá:

$$\Delta\nu = \frac{\gamma}{2\pi} , \quad (2.15)$$

v jednotkách frekvence a pro vlnovou délku odpovídá rozšíření:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2\gamma}{2\pi c} . \quad (2.16)$$

Rozšíření je velmi malé, je v řádu asi 10^{-3} pm. Na reálné rozšíření spektrálních čar má vliv mnoho jiných efektů, které čáru rozšiřují mnohem více.

Podíváme-li se na vyjádření absorpčního koeficientu, pak jej lze napsat jako:

$$k_\nu = \frac{\pi e^2}{mc} \frac{\gamma N_m f_{mn}}{4\pi^2(\nu - \nu_0)^2 + (\frac{\gamma}{2})^2}, \quad (2.17)$$

kde N_m je počet atomů nalézajících se v 1 cm^3 v kvantovém stavu m a funkce f_{mn} je tzv. síla oscilátoru pro přechod z hladiny m do hladiny n . Hodnota absorpčního koeficientu je maximální pro $\nu = \nu_0$, poté se postupně symetricky na obě strany zmenšuje.

2.2.2 Rozšíření čar srážkami

Rozšíření srážkami nebo také rozšíření tlakem vychází z přítomnosti dalších částic v okolí studovaného atomu. Jedná se jak o elektrony, atomu, ionty nebo molekuly. Díky Coloumbovské interakci mezi sebou částice ovlivňují vyzařující atom nebo iont. Dochází k většímu tlumení než u předchozího probíraného rozšíření, s množstvím srážek roste i rozšíření spektrální čáry. Ve vzorci (2.18) je patrné, že čárový absorpční koeficient závisí na konstantě útlumu, proto s větší konstantou útlumu je i pozvolnější pokles k_ν od svého maxima k hodnotám blízkým nule. Ke konstantě útlumu připočteme ještě jednu hodnotu – γ^* – konstantu útlumu srážkami. Problém ale není tak jednoduchý, existuje i klasifikace rozšíření srážkami, která závisí na způsobu ovlivňování, k jakému mezi částicemi dochází. Klasická klasifikace dělí interakce podle jejich závislosti na vzdálenosti r_n absorbujícího atomu a srážející se částice (Rutten, 2003):

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{C_n}{r_n}, \quad (2.18)$$

kde C_n je interakční konstanta a index označuje jednotlivé interakce:

$n = 2$ Lineární Starkův efekt – popisuje srážky mezi vodíkem nebo vodíku podobným iontům s elektrony nebo ionty. Je důležitý pro rozšíření H I čar ve spektrech horkých hvězd.

$n = 3$ Rezonanční rozšíření – popisuje srážky atomů neutrálního vodíku ve spektrech hvězd podobných Slunci.

$n = 4$ Kvadratický Starkův efekt – popisuje interakci mezi nevodíkovými atomy s elektrony a ionty.

$n = 6$ Van der Waalovo rozšíření – popisuje srážky mezi nevodíkovými atomy a samotným vodíkem. Rozšíření uplatňující se v atmosférách chladných hvězd.

Vrátíme se zpět útlumové konstantě srážkami γ^* . Podle teorie tlumného harmonického oscilátoru:

$$E = E_0 \cdot e^{-\gamma t} , \quad (2.19)$$

klesne energie oscilátoru na hodnotu $1/e$ za čas:

$$T = \frac{1}{\gamma} , \quad (2.20)$$

Dobou útlumu amplitudy oscilátoru nazýváme dvojnásobek této hodnoty – tedy $2T$. Podle vztahu mezi $2T$ a hodnotou τ – střední doba mezi dvěma srážkami – můžeme zjišťovat, které rozšíření převažuje:

- $\tau \gg 2T$ Je-li doba mezi jednotlivými srážkami mnohem větší než doba útlumu amplitudy oscilátoru, pak srážky příliš rozšíření čar neovlivňují a v rovnici pro absorpční koeficient i Lorenzův profil vystupuje pouze γ . Rozšíření srážkami je tedy zanedbatelné.
- $\tau \approx 2T$ Pokud srážek přibývá tak, že hodnota τ je srovnatelná s hodnotou $2T$, pak začne rozšíření srážkami působit na profil čáry a k hodnotě γ se přičte i γ^* :

$$\gamma^* = \frac{2}{\tau} , \quad (2.21)$$

- $\tau \ll 2T$ Převládají-li srážky, pak můžeme hodnotu γ zcela nahradit hodnotou γ^* , jelikož přirozené rozšíření je v porovnání s rozšířením srážkami zcela zanedbatelné.

K rozšíření srážkami dochází především v hustém prostředí o vysoké teplotě. Jelikož tvar rovnice pro profil takto rozšířené spektrální čáry odpovídá profilu přirozeně rozšířené čáry (s přihlédnutím na odlišnou hodnotu útlumové konstanty), je určujícím profilem tedy profil Lorenzův.

2.2.3 Tepelné rozšíření

Atomy jsou v neustálém tepelném pohybu, který je dalším činitelem rozšiřujícím spektrální čáry. Důvod, proč k rozšíření dochází, je dán Dopplerovým jevem, který způsobuje, že vzdalující se částice vyzáří záření o něco delší vlnové délce a o něco kratší vlnové délce v případě, že by se k pozorovateli blížila, než kdyby byla v klidu. Posun frekvence v důsledku Dopplerova jevu je dán:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{-V}{c}, \quad (2.22)$$

kde V je radiální složka rychlosti. Pro čistě termální pohyb je rychlostní rozložení dáno Maxwellovým rozložením. Průměrná hodnota $\langle V^2 \rangle$ všech částic odpovídá rychlosti V_0 vztahem:

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{2}V_0^2, \quad (2.23)$$

kde

$$V_0 = \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (2.24)$$

kde k je Boltzmanova konstanta a m je hmotnost atomu.

Čárový absorpční koeficient, který popisuje měnící se absorpci se změnou frekvence je v tomto typu rozšíření popsán:

$$k_\nu = \frac{e^2 \sqrt{\pi}}{m_e c} \frac{f}{\Delta\nu_D} e^{-(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_D})^2}, \quad (2.25)$$

kde f je síla oscilátoru a $\Delta\nu_D$ je koeficient popisující Dopplerovo rozšíření:

$$\Delta\nu_D = \frac{V_0}{c} \nu_0 = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (2.26)$$

Profil, který popisuje takto rozšířenou čáru, se nazývá Gaussův profil:

$$\varphi(\nu - \nu_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} e^{-(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_D})^2}, \quad (2.27)$$

Převědeme-li čárový absorpční koeficient na vlnové délky, pak jej lze psát:

$$k_\lambda = \frac{e^2 \sqrt{\pi} \lambda^2}{m_e c} \frac{f}{\Delta\lambda_D} e^{-(\frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_D})^2}, \quad (2.28)$$

kde $\Delta\lambda_D$ je koeficient popisující Dopplerovo rozšíření (Rutten, 2003).

$$\Delta\lambda_D = \frac{V_0}{c} \lambda_0 = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.29)$$

Uvažujeme-li prostředí, kde panuje vysoká teplota a zároveň se jedná o prostředí řídké, rozšíření čar je především právě tepelné. Avšak při zkoumání čar hvězdného spektra se setkáme jak s rozšířením tepelným, tak srážkovým. Pro popis takto rozšířené čáry se uplatňuje Voigtův profil:

$$\varphi(\nu - \nu_0) = \frac{H(a, v)}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D}, \quad (2.30)$$

kde $H(a, v)$ je Voigtova funkce:

$$H(a, v) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2}}{(v - y)^2 + a^2} dy, \quad (2.31)$$

kde

$$y \equiv \frac{V}{V_0} = \frac{V}{c} \frac{\nu_0}{\Delta\nu_D} = \frac{V}{c} \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda_D}, \quad (2.32)$$

$$v \equiv \frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_D} , \quad (2.33)$$

$$a \equiv \frac{\gamma}{4\pi\Delta\nu_D} = \frac{\lambda^2}{4\pi c} \frac{\gamma}{\Delta\lambda_D} . \quad (2.34)$$

Tento popis vede k tomu, že v centrálních oblastech čáry převládá rozšíření teplotní a v oblasti křídel čáry rozšíření útlumem.

2.2.4 Rozšíření rotací

Obecná rotace (např. rotace hvězd nebo oběh složek dvojhvězdy) mění polohu čáry ve spektru nebo její rozšíření. Tím, že se hvězda pohybuje směrem k pozorovateli nebo od pozorovatele, se mění poloha čáry buď ke kratším nebo k delším vlnovým délkám. Toto nastává, ať už se hvězda sama pohybuje, nebo je součástí dvojhvězdného systému. Obdobným způsobem se posunují čáry ve spektru, pokud hvězda pulzuje. Naopak samotná rotace hvězdy je rozšiřuje. Uvažujme hvězdu, jejíž osa rotace splývá s osou z , neboli inklinace je rovna 90° . Rovníkovou rychlost označme v_0 a obecnou rychlost v v závislosti na úhlové vzdálenosti φ od rovníku označme:

$$v(\varphi) = v_0 \cos \varphi . \quad (2.35)$$

K rozšíření spektrálních čar přispívá pouze její radiální složka:

$$v_r(\varphi, \vartheta) = v_0 \cos \varphi \sin \vartheta , \quad (2.36)$$

kde ϑ je úhlová vzdálenost od středu na rovníku. Posun, k jakému dochází v různých částech disku hvězdy lze psát:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{c} v_0 \cos \varphi \sin \vartheta . \quad (2.37)$$

Největší posun však nastává u atomů, které se současně nalézají na rovníku a na okraji disku, proto:

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{\lambda}{c} v_0 . \quad (2.38)$$

Započítáme-li k tomu, že obecně je inklinace $i \neq 90^\circ$ pak:

$$\Delta\lambda_{max} = \frac{\lambda}{c} v_0 \sin i . \quad (2.39)$$

Podstatné u tohoto rozšíření je to, že rozšiřuje stejnou měrou čáry všech atomů, nezávisí na hmotnosti atomu. Proto jej lze snadněji rozpoznat a určit. Podmínkou však je, aby hodnota $v_0 \sin i$ byla dostatečně velká, aby rozšíření bylo patrné v rámci dalších typů rozšíření.

2.2.5 Rozšíření turbulencí

V některých hvězdných atmosférách dochází k turbulentnímu pohybu – ať už mikroskopickému (s rychlostmi v řádu km/s) nebo makroskopickému (v řádech 10 km/s) – při kterém dochází k přenosu plynné látky. Tento pohyb rozšiřuje spektrální čáry (nezávisí na atomové hmotnosti). Profil čáry rozšířené mikroturbulencí odpovídá Gaussovu profilu (2.29), kde jen rychlost nahradíme tvarem:

$$V_0^2 = \frac{2kT}{m} + V_T^2 , \quad (2.40)$$

kde V_T je turbulentní rychlost. Dopplerovo rozšíření poté odpovídá:

$$\Delta\nu_D = \frac{\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + V_T^2} . \quad (2.41)$$

Avšak některé studie ukazují, že zavedení turbulentního faktoru do rovnic pro výpočet profilu čar v sobě skrývá nepřesnosti vzniklé v LTE modelech hvězdných atmosfér, které by měly v NLTE modelech vymizet a tudíž i potřeba zahrnovat turbulentní rychlost. Tento problém je teprve předmětem výzkumu.

Kapitola 3

Studované hvězdy a jejich okolí

Všechny studované hvězdy se nachází v souhvězdí Orion. Spojuje je kromě pozice i jejich spektrální typ, který je O nebo B, což byla dvě ze tří hledisek, dle kterých jsem hvězdy vybírala. Třetí hledisko výběru hvězd bylo vhodné UV spektrum ke zpracování.

V souhvězdí Orion se nachází velmi zajímavá oblast – rozsáhlý molekulový oblak s označením OMC (Orion Molecular Cloud), jehož součástí jsou molekulová oblaka a mezihvězdná hmota – známé mlhoviny jako např. M42, M43 nebo mlhovina Koňská hlava. Součástí tohoto komplexu jsou i velmi mladé, horké hvězdy – tzv. OB asociace hvězd s názvem Orion OB1 asociace. Některé ze studovaných hvězd se nacházejí uvnitř této oblasti, resp. jsou členy OB asociace, některé se nacházejí za nebo před touto oblastí. Více o jednotlivých hvězdách a jejich okolí bude popsáno v následujících podkapitolách.

3.1 Orion OB1 asociace

Orion OB1 asociace je jedna z nejlepších oblastí pro studium vzniku hvězd. Jak název napovídá, jedná se o seskupení hvězd spektrálního typu O, B nacházející se v podobné vzdálenosti, vzniklé ve stejné oblasti. Kromě horkých, mladých hvězd se zde nachází tisíce méně hmotných hvězd a proto-

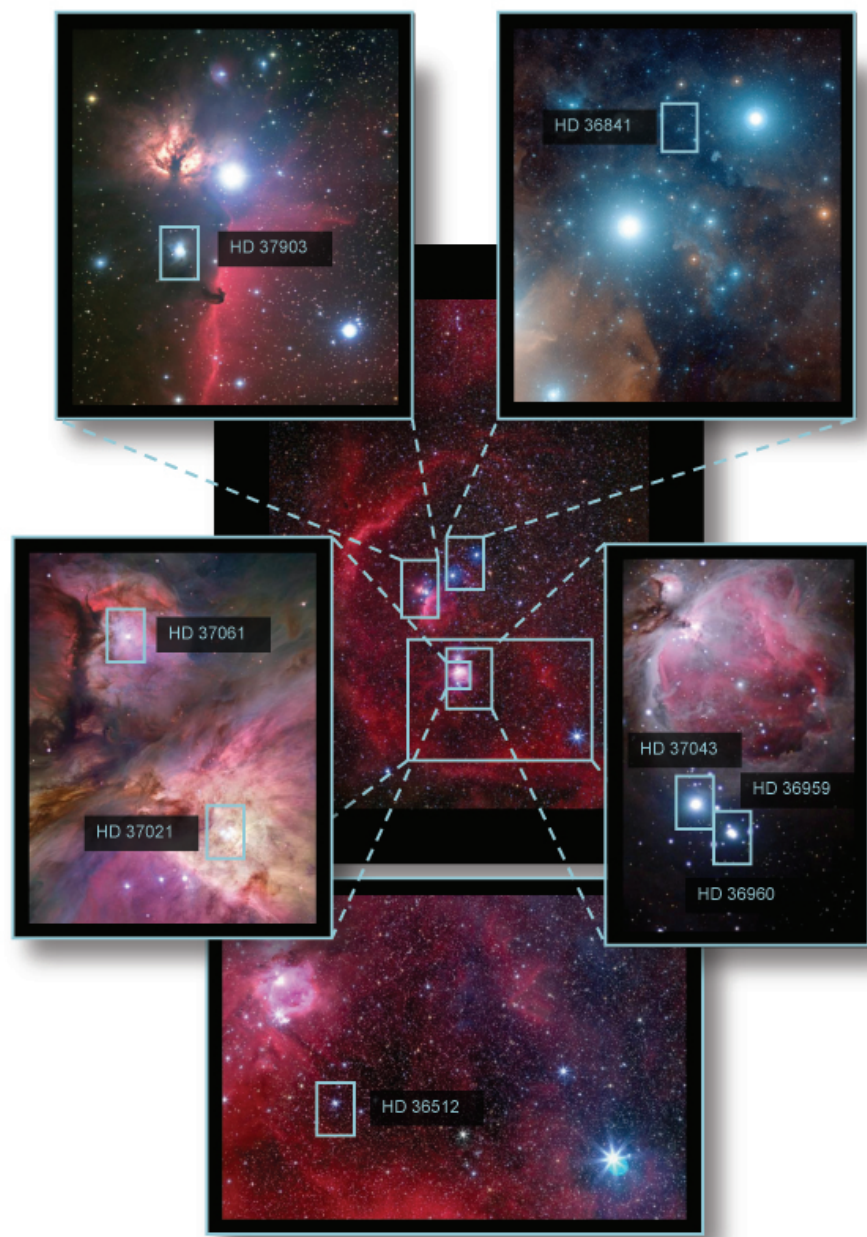
hvězd. Vzdálenost OB1 asociace je udávána v rozmezí 320 - 500 pc (Brown a kol, 1994). Oblast okolo OB1 asociace je velmi zajímavá - nachází se zde komplex Orionova molekulového oblaku, Barnardův oblouk (s emisí na H_{α}) a expandující HI oblasti. Byly objeveny i dvě obálky obklopující tuto oblast: jedna rozpínající se vysokou a druhá nízkou rychlostí (Cowie a kol, 1979). Některé práce vysvětlují tyto pohyby jako důsledek vzplanutí několika supernov, jiné zase poukazují na hvězdný vítr vznikající ve hvězdách OB1 asociace (Brown a kol, 1994).

OB1 asociaci lze rozdělit do následujících podskupin (Blaauw a kol, 1964):

- 1a – tvoří hvězdy Orionova pásu: Alnitak, Alnilam a Mintaka a další menší hvězdy, stáří 10-12 miliónů let
- 1b – skupina hvězd nacházejících se severozápadně od Orionova pásu, stáří 5-10 miliónů let
- 1c – hvězdy Orionova meče, stáří 3-6 miliónů let
- 1d – hvězdy Velké mlhoviny v Orionu M42 a M 43, jedná se o nejmladší hvězdy



Obrázek 3.1: Oblast v Orionu s nejznámějšími mlhovinami: M42 a M43, mlhovina Koňská hlava, Barnardův oblouk a mlhovina Čarodějnice. Snímek: Stephane Guisard,



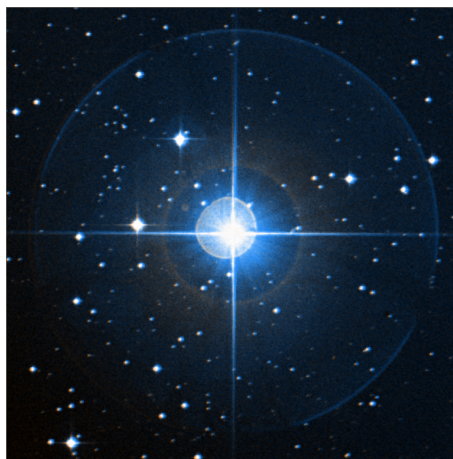
Obrázek 3.2: Polohy studovaných hvězd. Vlastní koláž, snímky: Gendler, Guisard, de Martin

3.2 HD 36512

RA	$05^h 31^m 55,86^s$
DE	$-07^\circ 18' 05,53''$
π	$2,11 \pm 0,74$ mas
r	470 ± 120 pc
v_{rad}	$17,4 \pm 2$ km/s
v_{rot}	25 km/s (*) 10 km/s (**)
SpT	B0 V

Tabulka 3.1: Charakteristiky hvězdy HD 36512 (zdroj: [5],[6], (*)Glebocki, 2000 a (***) Abt, 2002)

Hvězda HD 36512 leží, stejně jako všechny studované hvězdy, v souhvězdí Oriona, přibližně dva stupně od mlhoviny M42 ve vzdálenosti 470 pc. Přestože se HD 36512 nachází mimo hlavní oblast mlhoviny M42, lze i tak předpokládat, že se mezihvězdné prostředí dané oblasti ve spektru projeví. Hvězda se totiž nachází za danou oblastí, tudíž její spektrum mezihvězdnou látkou ovlivněné bude. Na druhou stranu se nachází v ne příliš zajímavé oblasti, tudíž lze usoudit, že výsledky ze studia jejího spektra nebudou tak bohaté jako u ostatních hvězd.



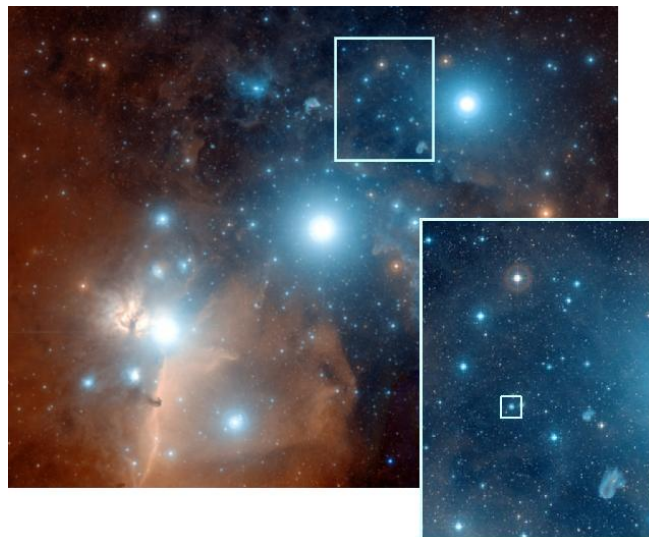
Obrázek 3.3: HD 36512, Zdroj: Simbad [5]

3.3 HD 36841

RA	$05^h 34^m 33,72^s$
DE	$-00^\circ 23' 11,49''$
π	$0,84 \pm 1,33$ mas
r	1190 ± 730 pc
v_{rad}	není známá
v_{rot}	180 km/s (*)
SpT	O8

Tabulka 3.2: Charakteristiky hvězdy HD 36841 (zdroj: [5],[6], (*)Savage, 2001)

Hvězda HD 36841 se nachází v oblasti Orionova pásu. Její okolí není tolik zajímavé jako třeba okolí hvězd HD 37021 nebo HD 37903, ale i tak lze usoudit, že v jejím spektru nalezneme mnoho čar mezihvězdného prostředí. Hvězda se totiž nachází ve vzdálenosti asi 1200 pc, což je daleko za oblastí Orion asociace a s ní spojenými H II oblastmi a molekulovými oblaky a tudíž tato oblast bude promítnuta do jejího spektra.



Obrázek 3.4: HD 36841, Vlastní koláž, snímek: de Martin

Zjištěním radiálních rychlostí komponent mezihvězdných oblaků z UV spektra hvězdy HD 36841 se zabýval Savage (2001), který našel z pozorování čar CIV a Si II tyto radiální rychlosti: $-7,0 \pm 3,1$ km/s a $12,9 \pm 3,2$ km/s. Cartledge (2004) našel ve své práci jednu hodnotu radiální rychlosti: $29,9 \pm 3,2$ km/s.

3.4 HD 36959 a HD 36960

RA	$05^h 35^m 01,01^s$
DE	$-06^\circ 00' 33,37''$
π	$0,55 \pm 1,11$ mas
r	1800 ± 1200 pc
v_{rad}	29,5 km/s
v_{rot}	25 km/s (*) 5 km/s (**)
SpT	B1 V

Tabulka 3.3: Charakteristiky hvězdy HD 36959 (zdroj: [5],[6], (*)Glebocki, 2000 a (**))Abt, 2002)

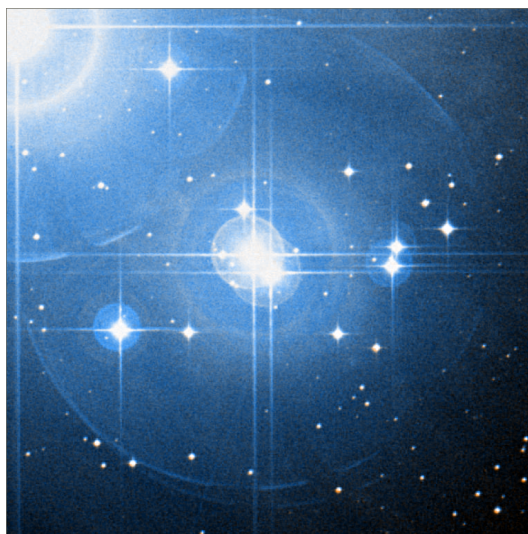
RA	$05^h 35^m 02,68^s$
DE	$-06^\circ 00' 07,30''$
π	$1,75 \pm 0,75$ mas
r	570 ± 180 pc
v_{rad}	27,7 km/s
v_{rot}	35 km/s (*) 20 km/s (**) 25 km/s (***)
SpT	B0,5 V

Tabulka 3.4: Charakteristiky hvězdy HD 36841 (zdroj: [5],[6], (*) Glebocki, 2000, (**)) Abt, 2002 a (***) Howe, 2009)

Hvězdy HD 36959 a HD 36960 se stejně jako hvězda HD 37043 nachází v blízkosti mlhoviny M42, molekulárního oblaku Orion A, konkrétně u části OMC 5. Avšak oproti hvězdě HD 37043 se nachází dále než molekulový oblak a tím i celá H II oblast mlhoviny M42 a tudíž jejich spektra jsou s nejvyšší pravděpodobností ovlivněna touto oblastí. Většina prací (Johnstone, Bally,

2006 a Ikeda a kol, 2007), zabývající se touto oblastí, vyhledává jádra nebo shluky mezihvězdné látky v těchto oblastech. Celý region je bohatý na hustá jádra, např. přibližně 1,7' od HD 36959 a HD 36960 se nachází jádro s označením ID 90 (podle Ikeda a kol, 2007) o průměru 0,17 pc, dále pak jádra ID 103, 115 a 141. Můžeme zde nalézt i objekty z dalších prací (Li a kol, 2003) jádro Ori 3 nebo výron látky s označením Outflow 41 (Stanke a kol, 2002), které dokazují, že se jedná o velmi kinematicky zajímavou oblast.

Velmi zajímavé bude porovnání výsledků u těchto dvou hvězd. Ze vzdálenosti hvězd lze usoudit, že HD 36960 se nachází uvnitř nebo v bezprostřední blízkosti OMC, kdežto HD 36959 se nachází o více než 1000 pc dále než HD 36960.



Obrázek 3.5: HD 36959 a HD 36960, Zdroj: Simbad [5]

3.5 HD 37021

RA	$05^h 35^m 31,37^s$
DE	$-05^\circ 16' 02,58''$
π	$1,85 \pm 2,10 \text{ mas}$
r	$540 \pm 290 \text{ pc}$
v_{rad}	$24,0 \pm 2 \text{ km/s}$
v_{rot}	$214 \text{ km/s (*) } 113 \text{ km/s (**)}$
SpT	B0 V

Tabulka 3.5: Charakteristiky hvězdy HD 37021 (zdroj: [5],[6], (*) Glebocki, 2000 a (***) Abt, 2002)

Hvězda HD 37021 se nachází zřejmě v té nejzajímavější H II oblasti, v samotné M42 jako součást tzv. Trapeze – čtyř hvězd, které jsou zdroji ionizačního záření této mlhoviny (HD 37020, HD 37021, HD 37022, HD 37023). O této oblasti – centru samotné M42 – bylo publikováno nespočet prací. Proto jsem se při studiu jejího okolí zaměřila na objekty v bezprostřední blízkosti této hvězdy (asi $1'$).



Obrázek 3.6: HD 37021, Zdroj: Simbad [5]

Nachází se zde mladé hvězdy s označením Parenago 1841, 1842, 1860 a 1888 a další mladé stelární objekty jako COUP 765, COUP 820, θ Ori G nebo θ Ori H. Nalezeny byly i zkustky o teplotě 0,5 K s označením ISK 120 a 121 (Ikeda a kol, 2007) a Herbig-Haro objekty: HH 508, HH 523, HH 529 a HH 624. U objektů HH 523 a HH 529 byla zjišťována i radiální rychlost (-49 km/s a -59 km/s, Doi a kol, 2004). Byly objeveny i další HH objekty nacházející se v této oblasti: DOH 3, DOH 4, DOH 5, DOH 6, DOH 7, DOH 10, DOH 11, DOH 12 a DOH 14, u nichž byla taktéž zjišťována radiální rychlost.

Ve spektru této hvězdy se objeví mnoho čar mezihvězdné látky a můžeme předpokládat velkou škálu zjištěných radiálních rychlostí komponent mezihvězdných oblaků.

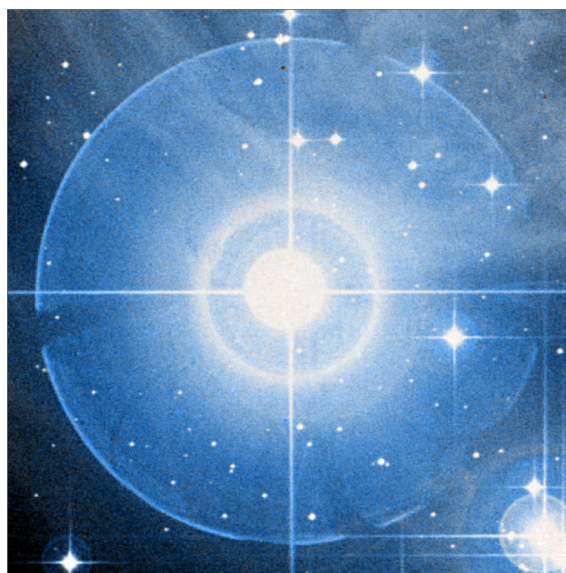
3.6 HD 37043

RA	$05^h 35^m 25,98^s$
DE	$-05^\circ 54' 35,65''$
π	$2,46 \pm 0,77$ mas
r	410 ± 100 pc
v_{rad}	$21,0 \pm 1$ km/s
v_{rot}	121 km/s (*)
SpT	O9 III

Tabulka 3.6: Charakteristky hvězdy HD 37043 (zdroj: [5],[6], (*) Glebocki, 2000)

Hvězda HD 37043 se nachází asi 30' od mlhoviny M42, konkrétně v oblasti molekulového oblaku s označením OMC 5, který je součástí tzv. Orion A molekulového oblaku, který kromě již zmiňovaného OMC 5 obsahuje také objekty: OMC 4, HH 1, HH 34 a L1641N. Mapováním této oblasti na $850\mu\text{m}$ (Johnstone, Bally, 2006) bylo nalezeno celkem 71 shluků s teplotami okolo 22 ± 5 K. Region OMC 5 leží 30' jižně od Velké mlhoviny v Orionu (M42) a nachází se za hvězdokupou s označením NGC 1980. Tato hvězdokupa se nachází přibližně ve vzdálenosti 500 pc, což je asi o 100 pc dál než se nachází

samotná hvězda HD 37043, takže samotná OMC 5 neovlivňuje spektrum této hvězdy. Kromě oblasti OMC 5 jsem našla v okolí této hvězdy ISM objekt s názvem Ced 55f, ale bohužel jsem nenašla bližší informace (vzdálenost) o tomto objektu, které by mohly pomoci při studiu této oblasti. Můžeme tedy předpokládat, že spektrum této hvězdy nebude ovlivněno oblastí kolem mlhoviny M42 a že nalezneme mnohem méně spektrálních čar mezihvězdného prostředí.



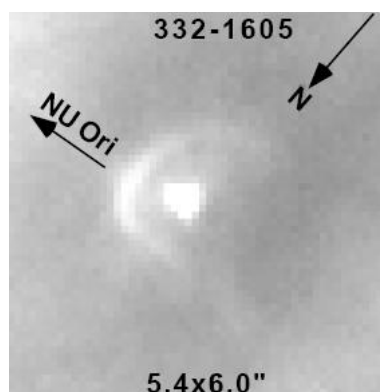
Obrázek 3.7: HD 37043, Zdroj: Simbad [5]

3.7 HD 37061

RA	$05^h 35^m 31,37^s$
DE	$-05^\circ 16' 02,58''$
π	$2,25 \pm 0,70$ mas (*)
r	440 ± 100 pc (*)
v_{rad}	$40,0 \pm 5$ km/s
v_{rot}	160 km/s (**) 225 km/s (***)
SpT	B1 V

Tabulka 3.7: Charakteristiky hvězdy HD 37061 (zdroj: [5],[6], (*) van Leeuwen, 2007,**) Glebocki, 2000 a (***) Wolff, 2004

Už při pohledu na samotnou HD 37061 je patrné, že oblast, ve které se nachází, patří mezi nejnámější H II oblasti. Nachází se totiž v mlhovině M 43, přičemž samotná hvězda HD 37061 je zdrojem ionizujícího záření této oblasti, její efektivní teplota je 31000 K (Simón-Díaz a kol, 2008). Mlhovina M43 se rozkládá na oblasti $20' \times 15'$, ve vzdálenosti asi 450 pc v okolí hvězdy HD 37061 (zde bych ráda uvedla, že hodnota z databáze SIMBAD uvádí paralaxu $2,77 \pm 0,88$ mas z katalogu The Hipparcos and Tycho Catalogues (ESA 1997), přičemž většina moderních prací zabývajících se M 43, resp. HD 37061, uvádí hodnotu $2,25 \pm 0,70$ mas z Hipparcos (van Leeuwen, 2007)).



Obrázek 3.8: Proplyd s označením 332-1605, Zdroj: O'Dell, 2001

Oblastí M43 se zabývá mnoho studií, které většinou vyhledávají nově rodící se hvězdy, protoplanetární disky nebo výrony látky. Poblíž HD 37061 byly například nalezeny dva proplydy z označením 307-1807, ve vzdálenosti $124,9''$ a průměrem $1,1''$, a 332-1605, ve vzdálenosti $27,5''$ a průměrem $2,0''$, obrázek 3.8 (O'Dell, 2001). Dále byly objeveny výrony H_2 látky z mladých hvězdných objektů nacházejících se v této oblasti. Nejblíže k HD 37061 se nacházejí YBD 55, 56 a 57 (Yu a kol, 1997). Jedná se velmi zajímavou oblast, můžeme předpokládat velmi zajímavé výsledky.

Zjišťováním radiálních rychlostí z UV spektra této hvězdy se zabýval také Savage (Savage, 2001), při výzkumu čar Al III, Si IV, C IV a Si II. V jeho práci byly zjištěny tyto radiální rychlosti: $1,5 \pm 1,6$ km/s, $-1,0 \pm 3,0$ km/s, $28,8 \pm 4,1$ km/s a $-28,1 \pm 9,5$ km/s.



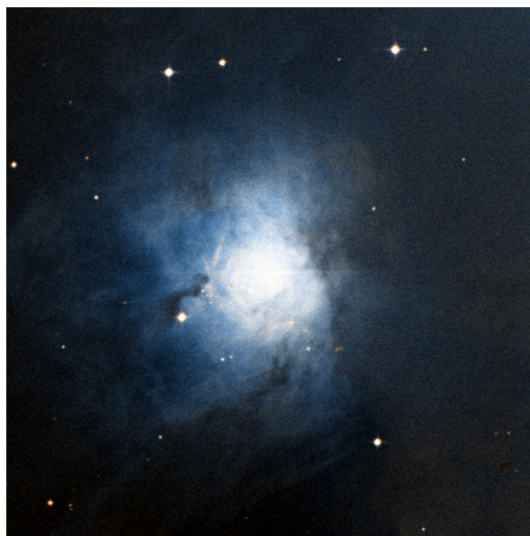
Obrázek 3.9: HD 37061, Zdroj: Christensen

3.8 HD 37903

RA	$05^h 41^m 38,39^s$
DE	$-02^\circ 15' 32,48''$
π	$2,12 \pm 1,23$ mas
r	470 ± 170 pc
v_{rad}	$7,2 \pm 2$ km/s
v_{rot}	200 km/s (*)
SpT	B1,5 V

Tabulka 3.8: Charakteristiky hvězdy HD 37903 (zdroj: [5],[6], (*) Glebocki, 2000

Hvězda HD 37903 se nachází poblíž známé mlhoviny Koňská hlava, konkrétně uvnitř reflexní mlhoviny NGC 2023, jejímž je zdrojem ionizujícího záření. V okolí hvězdy HD 37903 bylo nalezeno několik HH objektů s označením NGC 2023 HH1A, HH1B, HH1C, HH5 (Malin a kol, 1987).Vzhledem k tomu, že se hvězda nachází uvnitř NGC 2023, resp. je zdrojem ionizujícího záření, můžeme očekávat v jejím spektru mnoho čar mezihvězdného prostředí.



Obrázek 3.10: HD 37903, Zdroj: Simbad [5]

UV spektrem hvězdy HD 37903 se zabýval ve své práci Savage (2001), který našel radiální rychlosti komponentů mezihvězdných oblaků na čarách C IV a Si II: $-12,3 \pm 5,8$ km/s, $-20,3 \pm 8,1$ km/s a $-13,1 \pm 1,1$ km/s (zpracováním IUE spekter).



Obrázek 3.11: HD 37903 s mlhovinou Koňská hlava, Zdroj: HST [1]

Kapitola 4

Zpracování spekter

Tato kapitola se věnuje popisu zpracování studovaných spekter a diskutuje výsledky získané tímto zpracováním pro spektra jednotlivých hvězd. Všechna zpracovávaná spektra byla pořízena spektrografem STIS. Kalibrovaná spektra byla stažena z webových stránek, která je volně poskytují [2].

Výběr hvězd v okolí hvězdy HD 36841 byl podmíněn především dvěma faktory. Muselo se jednat o hvězdy spektrálního typu O nebo B a muselo k nim existovat nasnímané UV spektrum, navíc takové spektrum, které by bylo vhodné ke zpracování v rámci této práce (např. spektra IUE nebyla vhodná vzhledem k svému nízkému rozlišení). Další podmínkou výběru byla poloha vůči hvězdě HD 36841. Jelikož tématem je studium jejího okolí, bylo nutné vybrat hvězdy blízké HD 36841.

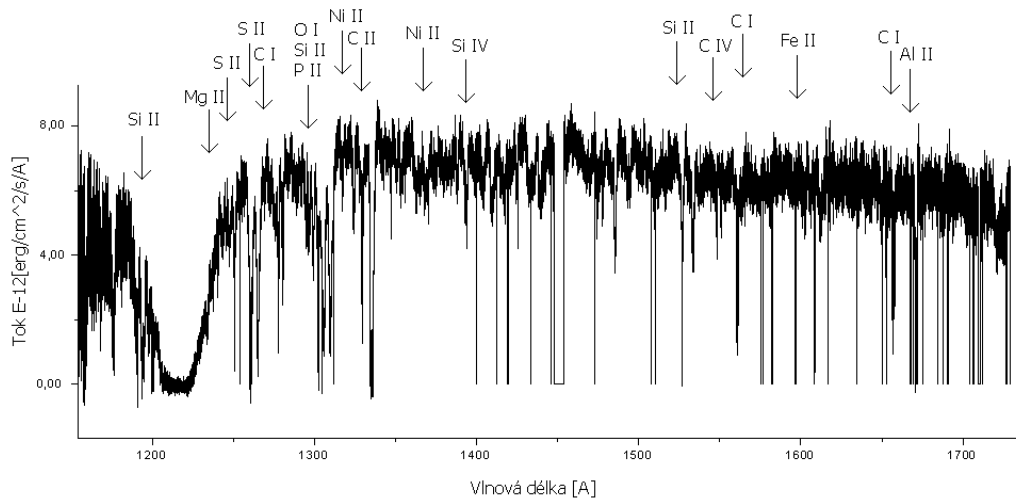
4.1 Identifikace spektrálních čar

Zpracovávaná spektra jsou UV spektra vybraných hvězd. V těchto spektrech můžeme nalézt i čáry vzniklé v mezihvězdném prostředí – na spojnici pozorovatel – hvězda. Tyto čáry jsou úzké a jejich profil je odlišný od profilu hvězdných čar (především kvůli různým typům rozšíření, která se vyskytují u čar vznikajících v mezihvězdném prostředí nebo ve hvězdných atmosférách – např. rozšíření tlakem nebo rotací je především typické pro hvězdné atmos-

féry než pro mezihvězdnou látku, kde převažuje především rozšíření tepelné).

Pro identifikaci čar je nutné znát jejich laboratorní vlnovou délku λ_0 . Ne vždy je identifikace čar triviální. Vzhledem k tomu, že spektrální čáry mezihvězdného prostředí pocházejí z oblastí, které se vůči pozorovateli pohybují určitou radiální rychlostí, jsou vždy posunuty vůči své laboratorní hodnotě vlnové délce. A navíc, ne vždy o stejnou hodnotu, jelikož se do spektra může promítat více mezihvězdných oblaků o různé radiální rychlosti.

S tím souvisí i fakt, že se ve spektru může vyskytnout několik čar o tožné laboratorní délce, ale s různými pozorovanými vlnovými délkami. Vysvětlení je jednoduché: na spojnici hvězda – pozorovatel se nachází několik oblaků absorbujících na stejné laboratorní vlnové délce, ale každý z oblaků má jinou radiální rychlost.



Obrázek 4.1: Příklad – spektrum hvězdy HD 36841 s označením některých identifikovaných čar.

4.2 Fitování spektrálních čar

Abychom mohli vypočítat radiální rychlosti jednotlivých oblaků, musíme nejen identifikovat jednotlivé čáry, ale musíme je vhodně fitovat pro zjištění vlnové délky středu čáry. Abychom odvodili fitovací funkci, vyjdeme z následujícího vztahu řešení rovnice přenosu záření v prostředí s nulovou zdrojovou funkcí (Rutten, 2003):

$$I = I_0 \exp(-\tau) , \quad (4.1)$$

kde I je pozorovaná hustota zářivého toku, I_0 je počáteční hustota zářivého toku a τ je optická hloubka:

$$\tau = \int_0^{s_0} n \sigma ds , \quad (4.2)$$

kde n je koncentrace částic a σ je účinný průřez odpovídající dané čáře:

$$\sigma = \frac{\pi e^2}{m_e c} \cdot f \cdot \Phi_\lambda , \quad (4.3)$$

kde f je síla oscilátoru, e je elementární náboj, m_e je hmotnost elektronu a Φ_λ je profil čáry, předpokládáme Gaussův profil. Poté můžeme psát:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\pi} e^2}{m_e c} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{f}{\Delta \lambda_D} e^{-(\lambda - \lambda_0) / \Delta \lambda_D)^2} , \quad (4.4)$$

kde $\Delta \lambda_D$ je koeficient odpovídající Dopplerovu rozšíření. Dosazením vztahu (4.4) do vztahu (4.2) a dále do (4.1) dostáváme výslednou funkci:

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{\sqrt{\pi} e^2}{m_e c} \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{f}{\Delta \lambda_D} e^{-(\lambda - \lambda_0) / \Delta \lambda_D)^2} \int_0^{s_0} n ds\right] . \quad (4.5)$$

Vztah přepíšeme do tohoto výsledného tvaru fitovací funkce:

$$I = I_0 \exp\left[-A \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda_D} e^{-(\lambda - \lambda_0) / \Delta \lambda_D)^2}\right] . \quad (4.6)$$

Seznam čar mezihvězdného prostředí byl převzat z *Astrophysical quantities* (Cox, 2000). Laboratorní vlnové délky byly převzaty z databáze NIST [7].

4.3 Radiální rychlosti

Jakmile je zjištěn střed fitované čáry, pak výpočet radiální rychlosti je triviální:

$$v_r = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} , \quad (4.7)$$

kde $\Delta\lambda$ je posun středu čáry vůči laboratorní délce, λ_0 je laboratorní vlnová délka a c je rychlost světla. Podle zákona šíření chyb platí:

$$\delta_{v_{rad}} = \frac{\partial v_{rad}}{\partial(\Delta\lambda)} , \quad (4.8)$$

$$\delta_{v_{rad}} = \frac{c}{\lambda_0} \cdot \delta_{\Delta\lambda} , \quad (4.9)$$

kde $\delta_{\Delta\lambda}$ a $\delta_{v_{rad}}$ jsou nejistoty jednotlivých veličin.

4.4 Teploty, turbulentní rychlosti

Předpokládáme-li tepelné rozšíření, pak koeficient Dopplerova rozšíření je úměrný tepelné rychlosti v_T :

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} v_T , \quad (4.10)$$

kde:

$$v_T = \sqrt{\frac{2kT}{m}} . \quad (4.11)$$

Je-li rozšíření čar způsobené pouze tepelným rozšířením, pak teplotu oblasti určíme velmi jednoduše z předchozích vztahů (případně fitováním více dat – vyneseme do grafu závislost tepelné rychlosti v_t na hmotnosti m a jednoduchým fitováním zjistíme teplotu). Ovšem lze předpokládat, že v mezihvězdném prostředí bude docházet k turbulencím. V tomto případě lze psát vztah pro koeficient Dopplerova rozšíření:

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} v_r , \quad (4.12)$$

kde rychlost v_r , odpovídající danému rozšíření, je součtem druhých mocnin tepelné rychlosti v_T a turbulentní rychlosti v_t :

$$v_r^2 = v_T^2 + v_t^2 . \quad (4.13)$$

Pak můžeme vztah přepsat:

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + v_t^2} . \quad (4.14)$$

V tom případě vyneseme do grafu závislost rychlosti odpovídající danému rozšíření v_r na hmotnosti m a fitujeme rovnicí:

$$v_r = \sqrt{\frac{2kT}{m} + v_t^2} , \quad (4.15)$$

odkud zjistíme nejen teplotu, ale i hodnotu turbulentní rychlosti.

4.5 HD 36512

Ve spektru hvězdy HD 36512 jsem identifikovala pouze tři čáry uvedené v následující tabulce 4.1.

Iont	λ [Å]
Al II	1670,787
Mg I	2026,477
Si II	1808,013

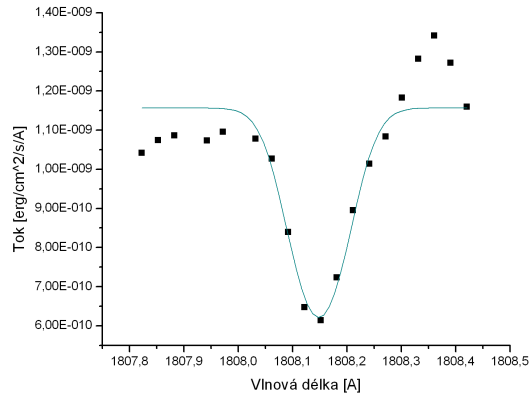
Tabulka 4.1: Identifikované absorpční čáry mezihvězdného prostředí ve spektru hvězdy HD 36512.

Fitováním jednotlivých čar jsem získala rozšíření, rozdíl mezi laboratorním a vypočteným středem, ze kterého lze získat radiální rychlosti. Jednotlivé parametry jsou uvedeny v následující tabulce 4.2:

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
Al II	1670,787	0,147	0,0023	26,4	0,4	0,085	0,004
Mg I	2026,477	0,175	0,0058	25,9	0,9	0,105	0,006
Si II	1808,013	0,138	0,005	22,9	0,8	0,050	0,007

Tabulka 4.2: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, $\delta_{v_{rad}}$ a $\delta_{\Delta\lambda_D}$ jsou nejistoty příslušných parametrů.

Intervaly nejistot určí rozdělení rychlostí. U prvních dvou čar Al II a Mg I se intervaly překrývají, radiální rychlost je $(26,1 \pm 0,3)$ km/s. Můžeme tedy předpokládat, že čáry vznikly ve stejném oblaku o této radiální rychlosti. Vynesením hodnot tepelné rychlosti v závislosti na hmotnosti obou čar do grafu lze získat závislost typickou pro tepelné rozšíření, kdy s rostoucí hmotností rychlost klesá. Budeme-li uvažovat pouze tepelné rozšíření, pak teplota výsledného prostředí je (440000 ± 15000) K, což je velmi vysoká hodnota v porovnání s typickými teplotami H II oblastí – 8000 K (Osterbrock, 1989). Zkusíme-li započítat turbulentní rozšíření, pak vychází $v_t = (18 \pm 3)$ km/s, což odpovídá teplotě prostředí (150000 ± 5000) K (výsledky jsou dány fitováním příslušných funkcí – viz podkapitola 4.4). Tato teplota je už nižší, ale stále vysoká pro mezihvězdné prostředí.



Obrázek 4.2: Ukázka fitované mezihvězdné čáry Mg I 2026,48 Å ve spektru hvězdy HD 36512.

Vzhledem k tomu, že profily těchto čar nevykazují saturaci nebo nejsou v nich patrné drobnější čáry, které by zvyšovaly rozšíření čar, lze předpokládat, že v tomto případě působí na čáry kromě tepelného a turbulentního ještě další rozšíření, např. tlakem.

4.6 HD 36841

Ve spektru hvězdy HD 36841 jsem identifikovala čáry uvedené v následující tabulce 4.3:

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C I	1656,928	Mg II	1239,925	Si IV	1393,755
C I	1560,310	Mg II	1240,395	P II	1301,874
C I	1277,245	Si II	1533,431	S II	1259,519
C II	1334,532	Si II	1526,707	S II	1253,811
C II	1335,708	Si II	1304,370	S II	1250,584
C IV	1548,187	Si II	1193,290	Fe II	1608,460
C IV	1550,772	Si II	1260,422	Ni II	1317,220
O I	1302,168	Si II	1264,738	Ni II	1370,140
Al II	1670,787	Si II	1190,416		

Tabulka 4.3: Identifikované mezihvězdné absorpční čáry ve spektru HD 36841.

Radiální rychlosti, koeficient Dopplerovského rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulkách 4.4 a 4.5:

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C I	1656,928	0,143	0,0035	25,87	0,64	0,023	0,006
C I	1560,310	0,143	0,0009	27,48	0,17	0,021	0,003
C I	1277,225	0,173	0,0012	40,61	0,28	0,028	0,003
C II	1334,532	0,060	0,0044	13,48	0,99	0,105	0,017
C II	1335,708	0,055	0,0033	12,34	0,73	0,055	0,002
C IV	1548,187	0,071	0,0043	13,75	0,83	0,089	0,018

Tabulka 4.4: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů. První část tabulky.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C IV	1550,772	-0,054	0,0192	-10,44	3,67	0,308	0,023
O I	1302,168	0,091	0,0011	20,95	0,25	0,063	0,002
Al II	1670,787	0,153	0,0020	27,45	0,36	0,066	0,004
Mg II	1239,925	0,108	0,0013	26,11	0,32	0,022	0,003
Mg II	1240,395	0,122	0,0008	29,49	0,20	0,010	0,002
Si II	1533,431	0,091	0,0119	17,83	2,34	0,600	0,040
Si II	1526,707	0,097	0,0024	19,05	0,47	0,079	0,005
Si II	1304,370	0,090	0,0017	20,69	0,38	0,049	0,004
Si II	1264,738	0,169	0,0130	40,20	3,33	0,371	0,018
Si II	1260,422	0,170	0,0141	39,35	3,08	0,491	0,017
Si II	1193,290	0,062	0,0042	15,58	1,05	0,130	0,010
Si II	1190,416	0,058	0,0039	14,61	0,99	0,066	0,007
Si IV	1393,755	-0,053	0,0128	-11,40	2,75	0,239	0,020
P II	1301,874	0,097	0,0014	22,34	0,32	0,022	0,004
S II	1259,519	0,099	0,0016	23,57	0,37	0,047	0,002
S II	1253,811	0,110	0,0021	26,30	0,51	0,056	0,004
S II	1250,584	0,093	0,0022	22,29	0,53	0,031	0,004
Fe II	1608,460	0,145	0,0026	27,03	0,48	0,034	0,005
Ni II	1317,220	0,124	0,0034	28,22	0,76	0,032	0,003
Ni II	1370,140	0,138	0,0037	30,20	0,81	0,024	0,010

Tabulka 4.5: Pokračování předchozí tabulky.

Nalezla jsem 7 skupin stejných radiálních rychlostí. Vypočtené teploty a případné turbulentní rychlosti jsou uvedeny k jednotlivým skupinám:

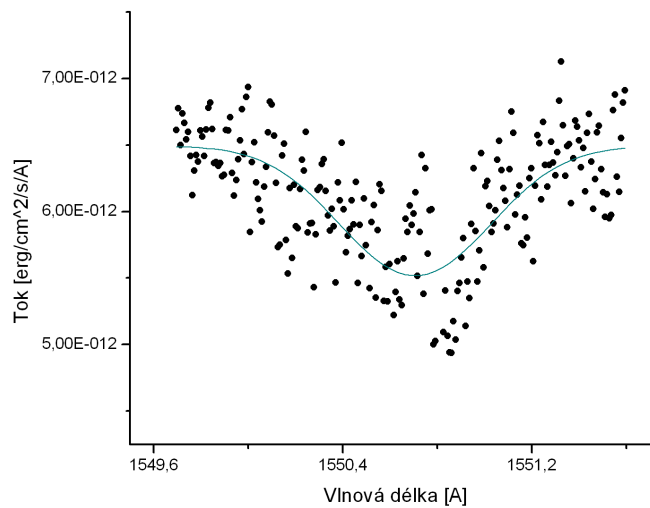
$$1) v_{rad} = (-10,9 \pm 0,5) \text{ km/s}$$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C IV	1550,772	-10,4
Si IV	1393,755	-11,4

Tabulka 4.6: Skupina hodnot $v_{rad} = (-10,9 \pm 0,5) \text{ km/s}$. Intervaly neurčitosti hodnot se vzájemně prolínají.

V případě započtení pouze tepelného rozšíření je teplota daného prostředí $(3700000 \pm 990000) \text{ K}$, což je samozřejmě příliš velká hodnota pro mezi-

hvězdné prostředí. Ale i když započteme turbulenci, vychází teplota (1400000 ± 60000) K a turbulentní rychlost $v_t = (63 \pm 7)$ km/s. Avšak už při prvním pohledu na profily těchto čar je patrné, že čáry nebyly rozšířeny pouze tepelně nebo turbulentně, ale že mechanismus jejich rozšíření bude složitější. Může se jednat o hvězdné čáry. Potom by jejich radiální rychlost měla souhlasit s radiální rychlostí hvězdy, ale ta není v žádném studovaném zdroji nebo katalogu uvedena.



Obrázek 4.3: Čára C IV $\lambda_0 = 1550,755 \text{ \AA}$

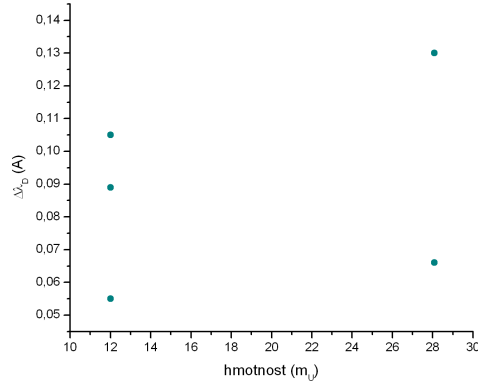
2) $v_{rad} = (14,0 \pm 1,6)$ km/s

Vyneseme – li do grafu závislost rozšíření jednotlivých čar na hmotnosti (obrázek 4.4), lze při pohledu na graf a hodnoty některých rozšíření usoudit, že mechanismus jejich rozšíření bude mnohem složitější než u jiných skupin, kdy alespoň z grafů byla vidět závislost klesajícího rozšíření s rostoucí hmotností. V této skupině jsou např. dvě čáry Si II, obě mají jiné rozšíření, což může být způsobeno odlišnou pravděpodobností daných přechodů anebo jsou některé z čar rozšířeny navíc drobnějšími čarami, o jiných radiálních rychlostech (příkladem je čára C II $1334,532 \text{ \AA}$, která je velmi

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1334,532	13,5
C II	1335,708	12,3
C IV	1548,187	13,8
Si II	1193,290	15,6
Si II	1190,416	14,6

Tabulka 4.7: Skupina hodnot $v_{rad} = (14,0 \pm 1,6)$ km/s. Intervaly neurčitosti hodnot se vzájemně prolínají ve všech případech.

saturovaná viz. obrázek 4.5). To stejné může platit i u ostatních čar. Vzhledem k tomu, že lze těžko takto uvažovat čistě tepelné rozšíření, případně doplněné o turbulentní rozšíření, nepočítala jsem u této skupiny žádnou konkrétní hodnotu teplot.

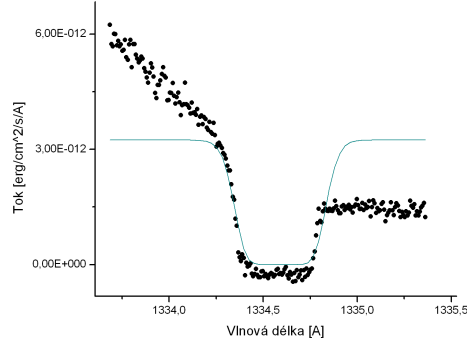


Obrázek 4.4: Graf závislosti rozšíření na hmotnosti.

3) $v_{rad} = (18,4 \pm 0,6)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1533,431	17,8
Si II	1526,707	19,1

Tabulka 4.8: Skupina hodnot $v_{rad} = (18,4 \pm 0,6)$ km/s.



Obrázek 4.5: C II $\lambda_0 = 1334,532 \text{ \AA}$

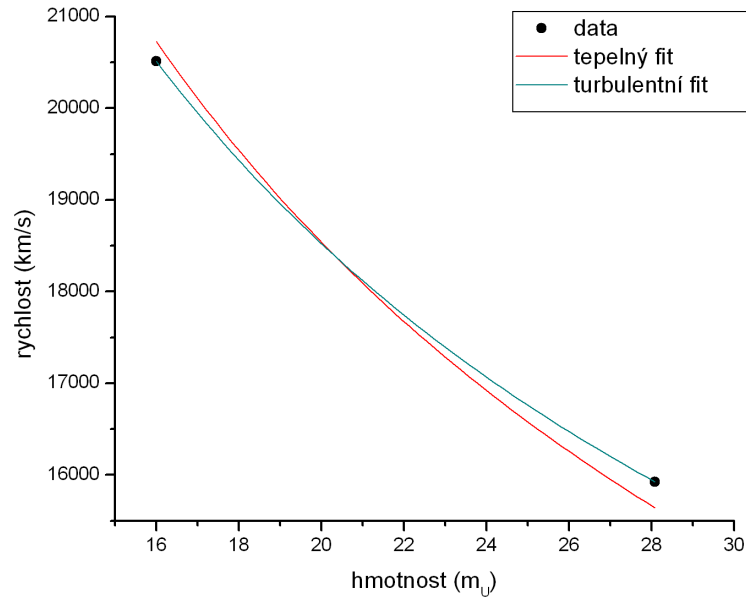
V této skupině jsem opět nepočítala konkrétní hodnotu teploty, protože čára Si II 1533,431 Å je silně rozšířená drobnými čarami uvnitř. Jediné co mohu konstatovat je, že rozšíření těchto čar není čistě tepelné. Zřejmě jsou rozšířeny dalšími mechanismy.

4) $v_{rad} = (20,8 \pm 0,1) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1302,168	21,0
Si II	1304,370	20,67

Tabulka 4.9: Skupina hodnot $v_{rad} = (20,8 \pm 0,1) \text{ km/s}$.

Tato skupina je velmi zajímavá, jelikož při vynesení závislosti hmotnosti na rozšíření do grafu lze vidět, že rozšíření klesá s rostoucí hmotností. Při započtení pouze tepelného rozšíření vychází teplota prostředí $(250000 \pm 7000) \text{ K}$ a při započtení turbulence vychází teplota velmi podobná $(230000 \pm 5000) \text{ K}$ a turbulentní rychlost $(5,7 \pm 0,1) \text{ km/s}$ (viz obrázek 4.6). Čáry jsou tedy tepelně rozšířené a zřejmě i turbulentně, ale vzhledem k vysoké teplotě, lze usoudit, že se nejedná jen o tyto dva mechanismy rozšíření, které čáry rozšiřují. Může se jednat i o rozšíření tlakem nebo o rozšíření drobnými čarami, jelikož obě čáry jsou saturované.



Obrázek 4.6: Fitované data dvěma způsoby, se započítáním čistě tepelného rozšíření a se započítáním turbulentního rozšíření. Rychlost odpovídá danému rozšíření.

5) $v_{rad} = (22,32 \pm 0,02)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
P II	1301,874	22,34
S II	1250,584	22,29

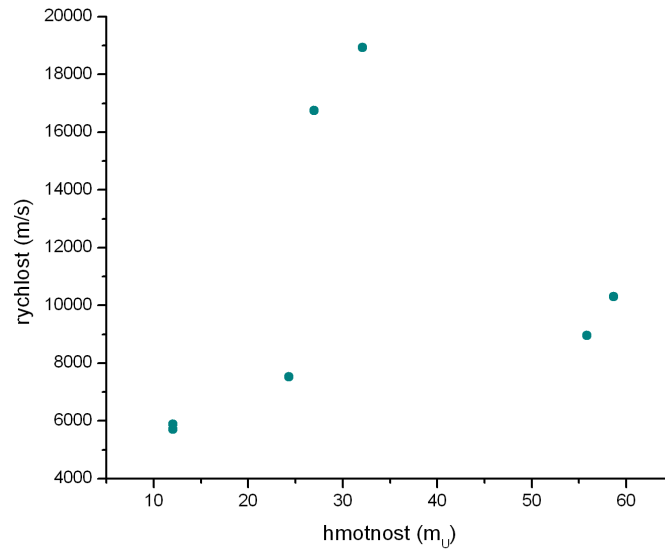
Tabulka 4.10: Skupina hodnot $v_{rad} = (22,32 \pm 0,02)$ km/s.

V případě této skupiny je určení teploty poněkud komplikované, protože závislost rozšíření na hmotnosti neodpovídá tepelnému rozšíření. Může to být dáno i tím, že prvky mají blízké atomové hmotnosti. Vypočteme - li teplotu i tak fitováním danou funkcí pro tepelné rozšíření, vychází teplota prostředí (89000 ± 35000) K. Vychází pochopitelně i velká chyba určení.

6) $v_{rad} = (26,9 \pm 1,9) \text{ km/s}$

Iont	$\lambda_0 [\text{\AA}]$	$v_{rad} [\text{km/s}]$
C I	1656,928	25,9
Mg II	1239,925	26,1
S II	1253,811	26,3
Fe II	1608,460	27,0
Al II	1670,787	27,5
C I	1560,310	27,5
Ni II	1317,220	28,2

Tabulka 4.11: Skupina hodnot $v_{rad} = (26,9 \pm 1,9) \text{ km/s}$.



Obrázek 4.7: Hodnoty pro vypočtenou rychlost vynesené do grafu v závislosti na hmotnosti. Rychlost odpovídá danému rozšíření.

Vyneseme - li do grafu závislost rychlosti na hmotnosti, zjistíme, že data neleží na křivce, která by popisovala teplotní rozšíření (viz. obrázek 4.7). Je možné, že se do spektra hvězdy promítly dva nebo více oblaky o podobné radiální rychlosti. V pravé části grafu lze vidět závislost, která by odpovídala

tepelnému rozšíření (viz. obrázek 4.8). V takovém případě vychází teplota prostředí (280000 ± 53000) K a při započítání turbulentního pohybu, $(9, 0 \pm 0, 9)$ km/s, vychází teplota nižší (18000 ± 46000) K. I tak se jedná o vysokou teplotu, proto rozšíření bude způsobeno i jinými mechanismy.

Zajímavá data jsou dále u čar C I. Z výpočtů vyplývá, že při uvažování čistě tepelného rozšíření u těchto dvou čar, je teplota daného prostředí (14600 ± 500) K, což odpovídá teplotám, které by se měly v mezihvězdném prostředí, konkrétně v H II oblastech, nacházet.

$$7) v_{rad} = (29, 9 \pm 0, 4) \text{ km/s}$$

Ion	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Mg II	1240,395	29,5
Ni II	1370,140	30,2

Tabulka 4.12: Skupina hodnot $v_{rad} = (29, 9 \pm 0, 4)$ km/s.

Teplotu pro tuto skupinu jsem nepočítala, jelikož hodnota rozšíření čáry Ni II je určena s velkou nepřesností (teplota prostředí vypočtená pouze z rozšíření této čáry by v chybě sahala od přibližně 40000 K do 200000 K). Zajímavější je ale teplota zjištěná z rozšíření čáry Mg II (10300 ± 300) K, což odpovídá teplotám H II oblastí (Osterbrock, 1989).

4.7 HD 36959

Ve spektru hvězdy HD 36959 jsem identifikovala čáry uvedené v následující tabulce 4.13. Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulce 4.14.

U této hvězdy jsem našla pět skupin stejných radiálních rychlostí. Vypočtené výsledné teploty a turbulentní rychlosti jsou uvedeny zvlášť u jednotlivých skupin.

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C I	1277,245	Mg II	1239,925	Si II	1194,500
C II	1334,532	Mg II	1240,395	Si II	1264,738
C II	1335,708	Si II	1526,707	Si III	1206,510
C IV	1548,187	Si II	1304,370	S II	1250,584
C IV	1550,772	Si II	1260,422	S II	1253,811
N I	1199,874	Si II	1190,416	S II	1259,519
O I	1302,168	Si II	1193,290	Fe II	1608,460
Al II	1670,787				

Tabulka 4.13: Identifikované mezihvězdné čáry ve spektru HD 36959.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C I	1277,245	-0,332	0,0038	-77,9	0,9	0,032	0,004
C II	1334,532	0,042	0,0088	9,4	2,0	0,076	0,008
C II	1335,708	0,077	0,0037	17,3	0,8	0,067	0,002
C IV	1548,187	0,155	0,0046	30,0	0,9	0,06	0,006
C IV	1550,772	0,172	0,0035	33,3	0,7	0,07	0,004
N I	1199,549	0,067	0,0033	16,7	0,8	0,04	0,002
O I	1302,168	0,085	0,0039	19,6	0,9	0,041	0,001
Al II	1670,787	0,170	0,0054	30,5	1,0	0,067	0,005
Mg II	1239,925	0,076	0,0034	18,4	0,8	0,031	0,006
Mg II	1240,395	0,115	0,0027	27,8	0,7	0,036	0,004
Si II	1526,707	0,090	0,0061	17,7	1,2	0,039	0,003
Si II	1304,370	0,086	0,0036	19,8	0,8	0,058	0,003
Si II	1260,422	0,075	0,0032	17,8	0,8	0,069	0,004
Si II	1193,290	0,066	0,0040	16,6	1,0	0,036	0,002
Si II	1190,416	0,050	0,0036	12,6	0,9	0,052	0,01
Si II	1194,500	0,077	0,0016	19,3	0,4	0,035	0,002
Si II	1264,738	0,106	0,0029	25,1	0,7	0,048	0,003
Si III	1206,510	0,056	0,0072	13,9	1,8	0,439	0,013
S II	1259,519	0,098	0,0023	23,3	0,6	0,042	0,002
S II	1253,811	0,102	0,0024	24,4	0,6	0,049	0,003
S II	1250,584	0,073	0,0019	17,5	0,5	0,037	0,004
Fe II	1608,460	0,14	0,0028	26,1	0,5	0,053	0,003

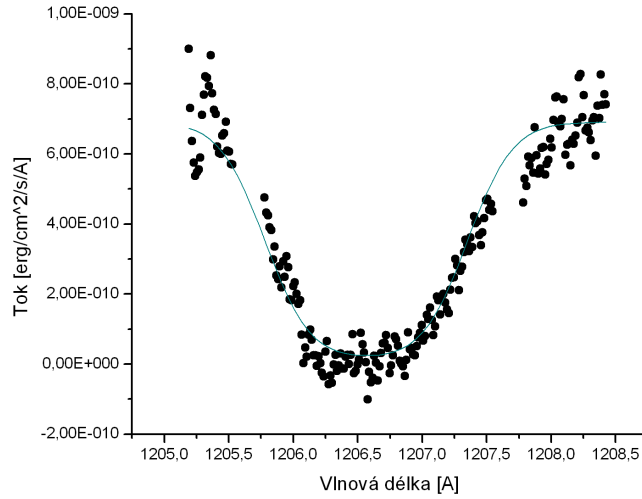
Tabulka 4.14: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů.

1) $v_{rad} = (13,3 \pm 0,7)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1190,416	12,6
Si III	1206,510	13,9

Tabulka 4.15: Skupina hodnot $v_{rad} = (13,3 \pm 0,7)$ km/s.

U této skupiny jsem teplotu oblasti nepočítala (jen hodnoty příslušející jednotlivým čarám), jelikož teplota pro čaru Si III přesahuje 24 miliónů K. Tudíž bylo vyhodnocování teploty v rámci skupiny zcela zbytečné. Teplota odpovídající čáře Si II je (350000 ± 63000) K, což je pro mezihvězdné prostředí také velmi vysoká hodnota. Rozšíření není čistě tepelné, zřejmě zde budou hrát roli i turbulentní pohyby, je možné i rozšíření tlakem. Při pohledu na čaru Si III (podobně je tak i u Si II), viz. obrázek 4.8, je patrné, že čára je složena z drobnějších čar, které ji opticky rozšiřují. Proto se čára zdá být širší a z výpočtů tudíž vyplývá vysoká teplota prostředí.



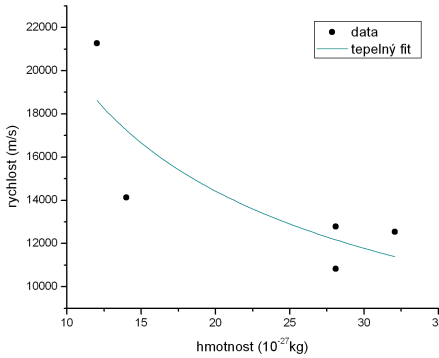
Obrázek 4.8: Si III $\lambda_0 = 1206,510$ Å

2) $v_{rad} = (17,4 \pm 0,8)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1335,708	17,3
N I	1199,549	16,7
Si II	1526,707	17,7
Si II	1260,422	17,8
Si II	1193,290	16,6
S II	1250,584	17,5

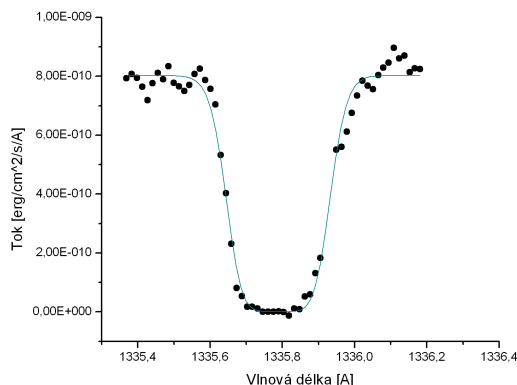
Tabulka 4.16: Skupina hodnot $v_{rad} = (17,4 \pm 0,8)$ km/s.

Po vynesení hodnot rozšíření v závislosti na hmotnosti je z grafu patrné, že hodnota pro čáru Si II 1260,422 Å nezapadá mezi ostatní hodnoty, které odpovídají tepelnému rozšíření viz. obrázek 4.9. Při fitování hodnot vyšel stejný fit u započítání čistě tepelného rozšíření a u započítání turbulence. Teplota prostředí pak je (150000 ± 20000) K.



Obrázek 4.9: Fitovaná data pro skupinu o radiální rychlosti $(17,4 \pm 0,8)$ km/s. Rychlost vynesená na ose y odpovídá danému rozšíření.

Vypočtená teplota je příliš vysoká pro mezihvězdné prostředí. Čáry mohou být rozšířeny jinými mechanismy, například čáry C II 1335,708 Å a Si II 1260,422 Å jsou zřejmě rozšířeny díky drobnějším čarám (viz. obrázek 4.10).



Obrázek 4.10: C II $\lambda_0 = 1335,708 \text{ \AA}$

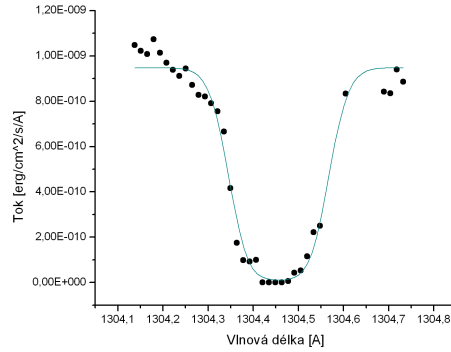
3) $v_{rad} = (19,3 \pm 0,9) \text{ km/s}$

Při vynesení závislosti rozšíření na hmotnosti je patrná křivka odpovídající tepelnému rozšíření, kromě bodu pro čáru Si II 1304,370 Å. Rozšíření této čáry je větší než by odpovídalo. Je možné, že čára je složena ze dvou čar (viz. obrázek 4.11) a tím je rozšířená.

Při započtení čar bez již zmiňované čáry Si II vychází teplota při čistě tepelném rozšíření $(11500 \pm 16000) \text{ K}$ a při započtení turbulence vychází teplota $(53000 \pm 5000) \text{ K}$ a turbulentní rychlost $v_t = (9,0 \pm 0,4) \text{ km/s}$. Teplota je sice stále vyšší než bychom očekávali, tudíž rozšíření čar nelze vysvětlit tepelným rozšířením a turbulencí. Zřejmě dochází i k rozšíření tlakem.

Ion	$\lambda_0 [\text{Å}]$	$v_{rad} [\text{km/s}]$
O I	1302,168	19,6
Mg II	1239,925	18,4
Si II	1304,370	19,8
Si II	1194,519	19,3

Tabulka 4.17: Skupina hodnot $v_{rad} = (19,3 \pm 0,9) \text{ km/s}$.



Obrázek 4.11: Si II $\lambda_0 = 1304,37 \text{ \AA}$

4) $v_{rad} = (24,7 \pm 1,4) \text{ km/s}$

Iont	$\lambda_0 [\text{\AA}]$	$v_{rad} [\text{km/s}]$
Si II	1264,738	25,1
S II	1259,519	23,3
S II	1253,811	24,4
Fe II	1608,460	26,1

Tabulka 4.18: Skupina hodnot $v_{rad} = (24,7 \pm 1,4) \text{ km/s}$.

Při uvažování pouze tepelného rozšíření vychází teplota prostředí (270000 ± 25000) K, při započtení turbulence $v_t = (8,5 \pm 0,3) \text{ km/s}$ vychází teplota nižší (190000 ± 18000) K. Jedná se opět o vysokou teplotu. Čáry mohou být rozšířeny jinými mechanismy. Je možné, že některé čáry pocházejí z jiných oblastí o podobné radiální rychlosti. Lze také zkusit vynechat některé hodnoty a fitovat zbylé, ale lze jen těžko říci, proč by ale daná hodnota měla být vynechaná, kromě toho, že by se mohlo jednat o čáru z jiné oblasti.

Zajímavý výsledek dostáváme, pokud fitujeme hodnoty pro čáry Si II 1259,519 Å a Fe II 1608,460 Å a uvažujeme rozšíření tepelné i turbulentní. Turbulentní rychlost vychází $v_t = (13,7 \pm 0,9) \text{ km/s}$ a teplota prostředí (12900 ± 600) K, což odpovídá teplotám H II oblastí. Je tedy možné, že zbylé dvě čáry vznikly v jiném prostředí.

5) $v_{rad} = (30,3 \pm 0,3) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C IV	1548,187	30,0
Al II	1670,787	30,5

Tabulka 4.19: Skupina hodnot $v_{rad} = (20,3 \pm 0,3) \text{ km/s}$.

V této skupině radiálních rychlostí se nacházejí pouze dvě čáry, jejichž rozšíření v závislosti na hmotnosti neodpovídá čistě tepelnému rozšíření ani rozšíření se započtením turbulence. Čáry mohou být rozšířené jinými mechanismy, např. rozšíření tlakem.

4.8 HD 36960

Ve spektru hvězdy HD 36960 jsem identifikovala čáry uvedené v následující tabulce 4.20:

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C II	1334,532	Si II	1533,431	Si II	1194,500
C II	1335,708	Si II	1526,707	Si III	1206,510
C II	2325,400	Si II	1304,370	S II	1250,584
N I	1199,549	Si II	1260,422	S II	1253,811
O I	1302,168	Si II	1190,416	S II	1259,519
Mg I	2026,477	Si II	1193,290	Fe II	1608,460
Al II	1670,787				

Tabulka 4.20: Identifikované mezihvězdné čáry ve spektru HD 36960.

Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulce 4.21.

U této hvězdy jsem našla také pět skupin obdobných radiálních rychlostí. Vypočtené výsledné teploty a turbulentní rychlosti jsou uvedeny zvlášť u jednotlivých skupin.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C II	1334,532	0,052	0,0069	11,7	1,6	0,079	0,007
C II	1335,708	0,067	0,0035	15,0	0,8	0,077	0,003
C II	2325,400	0,428	0,0135	55,2	1,7	0,193	0,015
N I	1199,549	0,455	0,0058	113,8	1,5	0,047	0,008
O I	1302,168	0,084	0,0043	19,3	1,0	0,041	0,002
Mg I	2026,477	0,392	0,0088	58,0	1,3	0,156	0,008
Al II	1670,787	0,191	0,0049	34,3	0,9	0,058	0,006
Si II	1533,431	0,664	0,0048	129,8	0,9	0,094	0,005
Si II	1526,707	0,094	0,0049	18,5	1,0	0,048	0,004
Si II	1304,370	0,085	0,003	19,5	0,7	0,05	0,002
Si II	1260,422	0,067	0,0039	15,9	0,9	0,078	0,004
Si II	1193,290	0,072	0,0068	18,1	1,7	0,043	0,008
Si II	1190,416	0,046	0,007	11,6	1,8	0,067	0,006
Si II	1194,500	0,076	0,0047	19,1	1,2	0,067	0,006
Si III	1206,510	-0,064	0,0071	-16,0	1,8	0,194	0,010
S II	1259,519	0,099	0,0034	23,6	0,8	0,031	0,003
S II	1253,811	0,091	0,0044	21,8	1,1	0,07	0,004
S II	1250,584	0,066	0,0027	15,8	0,7	0,027	0,003
Fe II	1608,460	0,149	0,003	27,8	0,6	0,043	0,003

Tabulka 4.21: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů.

1) $v_{rad} = (11,6 \pm 0,1)$ km/s

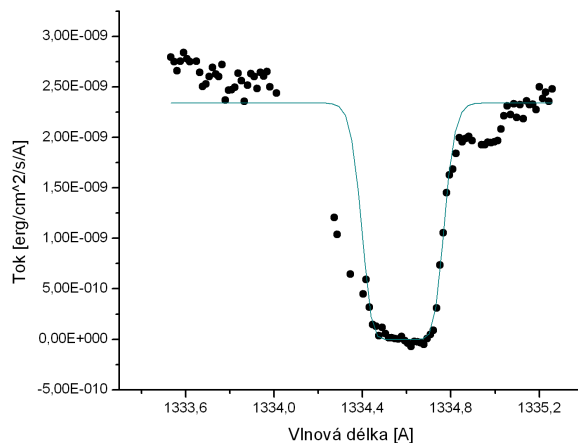
Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1334,532	11,7
Si II	1190,416	11,6

Tabulka 4.22: Skupina hodnot $v_{rad} = (11,6 \pm 0,1)$ km/s.

Přestože se v této skupině nachází pouze dvě čáry, závislost jejich rozšíření na hmotnosti odpovídá tepelnému rozšíření. Při uvažování pouze tepelného rozšíření vychází teplota prostředí (350000 ± 130000) K, což je opět vysoká hodnota.

Zajímavější výsledek vychází při uvažování i turbulentního rozšíření, $v_t = (23 \pm 1)$ km/s, (46000 ± 6000) K. Přesto je to vysoká teplota. Rozšíření

může být způsobeno i jinými mechanismy. Obě dvě čáry se jeví rozšířené drobnějšími čarami (viz. obrázek 4.12), což má za následek vyšší vypočtenou teplotu.



Obrázek 4.12: Saturovaná čára C II $\lambda_0 = 1334,532 \text{ \AA}$

2) $v_{rad} = (15,6 \pm 0,6) \text{ km/s}$

Iont	$\lambda_0 [\text{\AA}]$	$v_{rad} [\text{km/s}]$
C II	1335,708	15,0
Si II	1260,422	15,9
S II	1250,584	15,8

Tabulka 4.23: Skupina hodnot $v_{rad} = (15,6 \pm 0,6) \text{ km/s}$.

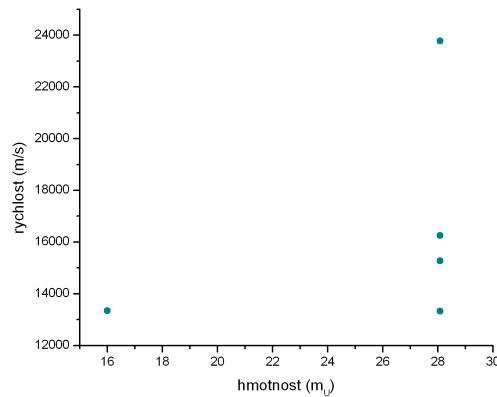
Už na první pohled je vidět, že čára Si II je rozšířena drobnějšími čarami. Pokud její hodnoty neuvažujeme a proložíme-li zbylá data, vychází závislost odpovídající tepelnému rozšíření, kdy teplota prostředí je $(210000 \pm 80000) \text{ K}$. Jedná se opět o vysokou teplotu. Může to být dáno i tím, že čára C II je taktéž, i když o něco méně, rozšířena drobnějšími čarami. Možné je i rozšíření tlakem nebo jinými mechanismy.

3) $v_{rad} = (18,9 \pm 0,8) \text{ km/s}$

Při vynesení závislosti odpovídajících tepelných rychlostí na hmotnosti dostáváme velmi zajímavé rozložení. Čáry Si II odpovídají jiným tepelným rychlostem, resp. jejich rozšíření se liší (viz. obrázek 4.13). To může být dáno jak pravděpodobností jednotlivých přechodů nebo tím, že jsou čáry rozšířeny ještě drobnějšími čarami.

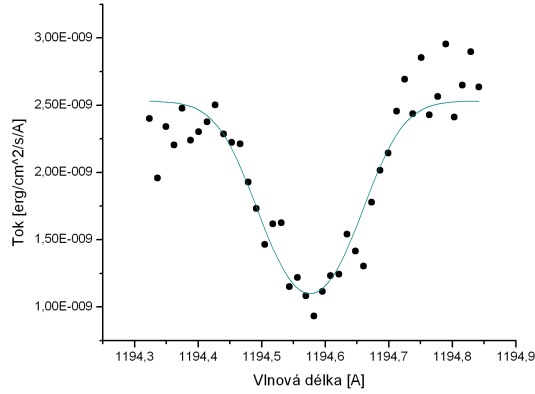
Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1302,168	19,3
Si II	1526,707	18,5
Si II	1304,370	19,5
Si II	1193,290	18,1
Si II	1194,500	19,1

Tabulka 4.24: Skupina hodnot $v_{rad} = (18,9 \pm 0,8) \text{ km/s}$.



Obrázek 4.13: Závislost rychlostí odpovídajících danému rozšíření na hmotnosti pro jednotlivé čáry.

Při pohledu na jednotlivé čáry Si II je patrné, že mohou být rozšířeny drobnějšími čarami (zároveň s velkou chybou určení). Příkladem je čára s největším rozšířením Si II 1194,500 Å (viz. obrázek 4.14).



Obrázek 4.14: SI II $\lambda_0 = 1194,500 \text{ \AA}$

V tom případě, když fitujeme pouze data prvních dvou čar, vychází teplota se započtením turbulence, $(13,3 \pm 0,7) \text{ km/s}$, $(700 \pm 70) \text{ K}$, což je na druhou stranu velmi nízká teplota. Jedním z důvodů, proč tak nízká hodnota vyšla může být i to, že máme málo dat, resp. atomové hmotnosti jsou si velmi blízké.

4) $v_{rad} = (22,7 \pm 0,9) \text{ km/s}$

Ion	$\lambda_0 [\text{\AA}]$	$v_{rad} [\text{km/s}]$
S II	1259,519	23,6
S II	1253,811	21,8

Tabulka 4.25: Skupina hodnot $v_{rad} = (22,7 \pm 0,9) \text{ km/s}$.

Teplotu prostředí pro tuto oblast jsem nevypočítávala, jelikož rozšíření čáry S II 1253,811 \AA je oproti čáře S II 1259,519 \AA mnohem vyšší, což je dáno tím, že se v čáře nacházejí drobnější čáry, které ji opticky rozšiřují. Teplota vycházející z čistě tepelného rozšíření čáry S II 1259,519 \AA je $(127000 \pm 19000) \text{ K}$, což je opět vysoká teplota, která může vycházet díky tomu, že čára není rozšířena pouze tepelně.

Zda je čára rozšířena i turbulentně lze těžko posoudit bez dalších hodnot pro jiné čáry, které ale bohužel nebyly s touto radiální rychlostí nalezeny, kromě čáry S II 1253,811 Å, která je ale prvotně široká díky drobnějším čarám uvnitř.

5) $v_{rad} = (56,6 \pm 1,4)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	2325,400	55,2
Mg I	2026,477	58,0

Tabulka 4.26: Skupina hodnot $v_{rad} = (56,6 \pm 1,4)$ km/s.

Obě čáry jsou patrně rozšířeny i jinými mechanismy než tepelným a turbulentním. Počítáme-li teplotu prostředí pouze v rámci tepelného rozšíření, vychází hodnota s velkou chybou určení (660000 ± 180000) K. Započítám-li turbulenci, která vychází (30 ± 10) km/s, teplota prostředí je (149000 ± 53000) K. Čára C II je zřejmě rozšířena drobnějšími čarami, což může způsobovat vysokou hodnotu teploty i se započtením turbulence.

4.9 HD 37021

Ve spektru hvězdy HD 37021 jsem identifikovala čáry uvedené v následující tabulce 4.27.

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C I	1277,245	Si II	1304,370	S II	1259,519
C II	1334,532	Si II	1260,422	S II	1253,811
C II	1335,708	Si II	1193,290	S II	1250,584
O I	1302,168	Si II	1190,416	Ni II	1317,220
Mg II	1239,925	Si II	1194,500	P II	1301,874
Mg II	1240,395	Si II	1264,738		

Tabulka 4.27: Identifikované mezihvězdné čáry ve spektru HD 37021.

Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulce 4.28.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C I	1277,245	0,141	0,0011	33,1	0,3	0,032	0,001
C II	1334,532	0,04	0,0036	9,0	0,8	0,075	0,005
C II	1335,708	0,033	0,0033	7,4	0,7	0,061	0,003
O I	1302,168	0,08	0,0017	18,4	0,4	0,05	0,002
Mg II	1239,925	0,077	0,0014	18,6	0,3	0,013	0,001
Mg II	1239,925	0,088	0,0018	21,3	0,4	0,009	0,001
Mg II	1240,395	0,085	0,0017	20,5	0,4	0,006	0,001
Si II	1304,370	0,07	0,0019	16,1	0,4	0,041	0,001
Si II	1260,422	0,081	0,0025	19,3	0,6	0,083	0,003
Si II	1193,290	0,066	0,0016	16,6	0,4	0,053	0,003
Si II	1190,416	0,065	0,0019	16,4	0,5	0,043	0,002
Si II	1194,500	0,025	0,0017	6,3	0,4	0,025	0,002
Si II	1264,738	0,038	0,0014	9,0	0,3	0,022	0,001
S II	1259,519	0,072	0,0012	17,1	0,3	0,029	0,001
S II	1253,811	0,075	0,002	17,9	0,5	0,029	0,001
S II	1250,584	0,065	0,0018	15,6	0,4	0,019	0,001
Ni II	1317,220	0,084	0,0015	19,1	0,3	0,009	0,001
P II	1301,874	0,068	0,0021	15,7	0,5	0,009	0,001

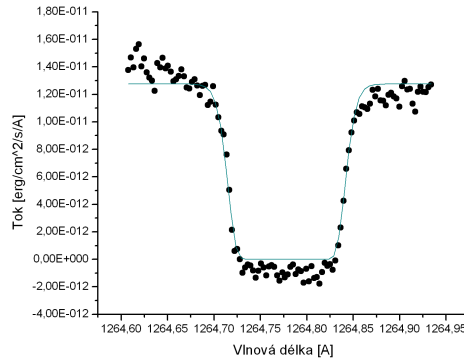
Tabulka 4.28: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů.

U této hvězdy jsem našla čtyři skupiny stejných radiálních rychlostí. Vypočtené výsledné teploty a turbulentní rychlosti jsou uvedeny zvlášť u jednotlivých skupin.

1) $v_{rad} = (8,5 \pm 1,1)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1334,532	9,0
C II	1335,708	7,4
Si II	1264,738	9,0

Tabulka 4.29: Skupina hodnot $v_{rad} = (8,5 \pm 1,1)$ km/s.



Obrázek 4.15: Si II $\lambda_0 = 1264,738 \text{ \AA}$

Vzhledem k tomu, že obě čáry C II jsou silně saturovány, je zbytečné počítat teplotu prostředí, jelikož jsou čáry očividně rozšířeny drobnými čarami uvnitř. Na druhou stranu, teplota vypočtena z rozšíření čáry Si II je $(55000 \pm 4000) \text{ K}$. Je to sice stále vysoká teplota, ale opět je čára saturovaná, i když o něco méně než čáry C II (viz. obrázek 4.15).

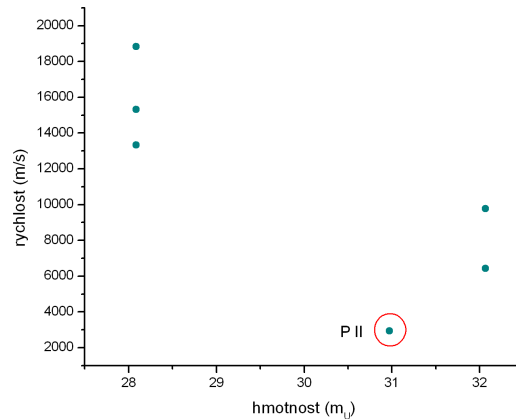
2) $v_{rad} = (16,2 \pm 0,9) \text{ km/s}$

Iont	$\lambda_0 \text{ [\AA]}$	$v_{rad} \text{ [km/s]}$
Si II	1304,370	16,1
Si II	1193,290	16,6
Si II	1190,416	16,4
S II	1259,519	17,1
S II	1250,584	15,6
P II	1301,874	15,7

Tabulka 4.30: Skupina hodnot $v_{rad} = (16,2 \pm 0,9) \text{ km/s}$.

Při pohledu na závislost rychlosti na hmotnosti (viz. obrázek 4.16) lze na první pohled vidět, že se data zjištěná z čáry P II nehodí k ostatním datům ze skupiny. Může se jednat o čáru, která pochází z jiného oblaku o stejné radiální rychlosti. Teplota vypočtená z rozšíření této čáry odpovídá před-

pokládané teplotě, (9600 ± 900) K. Profil čáry nevykazuje rozšíření jinými čarami, čára může být tedy rozšířena především tepelně.



Obrázek 4.16: Vynesené hodnoty do grafu závislosti rychlostí odpovídajících danému rozšíření na hmotnosti pro skupinu radiální rychlosti $v_{rad} = (16, 2 \pm 0, 9)$ km/s.

Z obrázku 4.16 je dále patrné, že čáry Si II odpovídají každá jiné vypočtené rychlosti. Vzhledem k tomu, že tepelná rychlost by měla být pro tyto čáry Si II stejná, je nutné hledat příčinu vysoké vypočtené rychlosti v rozšíření čar (také pro čáry S II). Důvod, proč jsou čáry stejného iontu rozšířeny jinak, může být v pravděpodobnosti jednotlivých přechodů. Teplota prostředí vychází (108000 ± 68000) K se započtením čistě tepelného rozšíření.

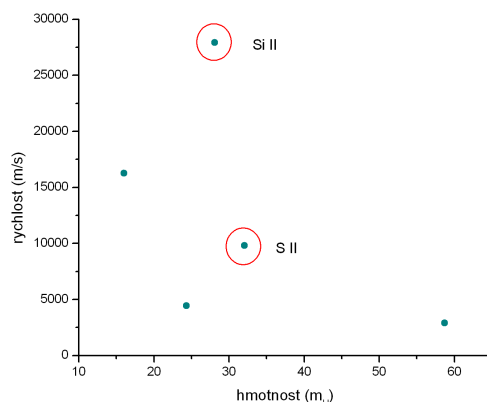
3) $v_{rad} = (18, 7 \pm 0, 7)$ km/s

Podle grafu závislosti vypočtené rychlosti na hmotnosti (obrázek 4.17) lze vidět, že hodnota rychlosti pro čáru Si II vybočuje oproti ostatním datům. Při pohledu na samotnou čáru lze vidět, že je velmi saturovaná a zřejmě rozšířena drobnějšími čarami.

Proto jsem ji při výpočtu teploty prostředí zanedbala. Čára S II vybočuje od skupiny svou radiální rychlostí (přesto ale při uvažování chyby určení radiální rychlosti do skupiny patří). Je tedy možné, že pochází z jiného

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1302,168	18,4
Mg II	1239,925	18,6
Si II	1260,422	19,3
S II	1253,811	17,9
Ni II	1317,220	19,1

Tabulka 4.31: Skupina hodnot $v_{rad} = (18,7 \pm 0,7)$ km/s.



Obrázek 4.17: Vynesené hodnoty do grafu závislosti rychlostí odpovídajících danému rozšíření na hmotnosti pro skupinu radiální rychlosti $v_{rad} = (18,7 \pm 0,7)$ km/s.

prostředí než zbylé čáry. Pokud ji taky nezohledníme ve výpočtech, vychází teplota prostředí (70000 ± 29000) K, při započtení turbulence je teplota prostředí o něco nižší (65000 ± 22000) K a $v_t = (2,9 \pm 0,7)$ km/s. Stále vysoká hodnota teploty může být způsobena i tím, že čára O I je očividně rozšířena kromě tepelného a turbulentního pohybu navíc drobnějšími čarami, jelikož je také saturovaná. Pokud vypočteme teplotu prostředí pouze z čar Mg II a Ni II vychází teplota prostředí mnohem blíže očekávané hodnotě (17500 ± 200) K s velmi nízkou chybou určení (pokud chceme započítat turbulenci, vychází stejný fit s téměř nulovou hodnotou turbulentní rychlosti). Čáry jsou tedy rozšířeny tepelně, některé čáry jsou opticky rozšířeny drob-

nějšími čarami a navíc se uplatňuje i jiný mechanismus rozšíření, zřejmě rozšíření tlakem. Turbulentní rozšíření se nepotvrdilo.

4) $v_{rad} = (20,9 \pm 0,4) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Mg II	1239,925	21,3
Mg II	1240,395	20,5

Tabulka 4.32: Skupina hodnot $v_{rad} = (18,7 \pm 0,7) \text{ km/s}$.

V této skupině se nacházejí pouze dvě čáry Mg II. Výsledná teplota je velmi zajímavá, jelikož s nachází blízko očekávané hodnoty, $(5800 \pm 2300) \text{ K}$ i když je s velkou chybou určení. Velký rozptyl výsledné teploty je dán tím, že teplota pro čáru Mg II 1239,925 Å je mnohem vyšší než pro čáru 1240,395 Å. To vyplývá z rozšíření daných čar, kdy čára Mg II 1239,925 Å je zřejmě rozšířenější díky vyšší pravděpodobnosti daného přechodu.

4.10 HD 37043

Ve spektru hvězdy HD 37043 jsem identifikovala pouze dvě čáry, resp. čtyři čáry, ke každé laboratorní hodnotě vlnové délky jsem našla dvě čáry, uvedené v následující tabulce 4.33:

Iont	λ [Å]
O I	1355,598
O I	1302,168

Tabulka 4.33: Identifikované mezihvězdné absorpční čáry ve spektru HD 37043.

Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulce 4.34.

U této hvězdy se vypočtené radiální rychlosti ani v jednom případě neshodují. Čáry jsou silně rozšířeny, zajímavé je jen to, že obě čáry jed-

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
O I	1355,598	-0,385	0,0055	-85,1	1,2	0,454	0,014
O I	1355,598	0,657	0,0057	145,3	1,3	0,435	0,024
O I	1302,168	-0,633	0,0031	-140,7	0,7	0,283	0,021
O I	1302,168	0,610	0,0047	135,6	1,0	0,283	0,039

Tabulka 4.34: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů.

notlivých dvojic mají stejné, nebo podobné rozšíření. Vzhledem k velkému rozšíření čar lze předpokládat, že tepelné rozšíření nebude jediným, natož hlavním, mechanismem rozšíření čar. Proto je výpočet teploty jednotlivých prostředí zbytečný.

4.11 HD 37061

Ve spektru hvězdy HD 37061 jsem identifikovala následující čáry, z toho pro některé laboratorní délky jsem našla dvě nebo více čar, uvedené v následující tabulce 4.35:

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C I	1277,245	Mg II	1240,395	Si II	1264,738
C II	1334,532	Si II	1304,370	S II	1259,519
C II	1335,708	Si II	1260,422	S II	1253,811
O I	1302,168	Si II	1193,290	S II	1250,584
O I	1355,598	Si II	1190,416	Ni II	1317,220
Mg II	1239,925	Si II	1194,500	P II	1301,874

Tabulka 4.35: Identifikované mezihvězdné absorpční čáry ve spektru HD 37061.

Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulce 4.36.

U hvězdy HD 37061 jsem našla šest skupin stejných radiálních rychlostí. Vypočtené výsledné teploty a turbulentní rychlosti jsou uvedeny zvlášť u jednotlivých skupin.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C I	1277,245	0,14	0,0008	32,9	0,2	0,013	0,001
C I	1277,245	0,173	0,0016	40,6	0,4	0,013	0,001
C II	1334,532	0,051	0,0038	11,5	0,9	0,078	0,003
C II	1335,708	0,067	0,002	15,0	0,5	0,057	0,002
O I	1302,168	0,09	0,002	20,7	0,5	0,07	0,002
O I	1355,598	0,108	0,0038	23,9	0,8	0,009	0,001
Mg II	1239,925	0,098	0,0022	23,7	0,5	0,01	0,003
Mg II	1240,395	0,108	0,0028	26,1	0,7	0,011	0,001
Si II	1304,370	0,078	0,0024	17,9	0,6	0,037	0,001
Si II	1260,422	0,097	0,0029	23,1	0,7	0,074	0,002
Si II	1193,290	-0,178	0,0023	-44,7	0,6	0,020	0,002
Si II	1193,290	0,074	0,0025	18,6	0,6	0,052	0,001
Si II	1190,416	-0,176	0,0023	-44,3	0,6	0,048	0,002
Si II	1190,416	-0,135	0,0017	-34,0	0,4	0,02	0,001
Si II	1190,416	0,068	0,0018	17,1	0,5	0,05	0,001
Si II	1194,500	0,042	0,002	10,5	0,5	0,013	0,001
Si II	1194,500	0,093	0,0011	23,3	0,3	0,018	0,003
Si II	1264,738	0,098	0,0012	23,2	0,3	0,017	0,002
S II	1259,519	0,049	0,0019	11,7	0,5	0,027	0,003
S II	1259,510	0,113	0,0014	26,9	0,3	0,029	0,001
S II	1253,811	0,043	0,0021	10,3	0,5	0,028	0,002
S II	1253,811	0,11	0,0013	26,3	0,3	0,024	0,001
S II	1250,584	0,086	0,0015	20,6	0,4	0,021	0,001
Ni II	1317,220	0,107	0,0018	24,4	0,4	0,01	0,002
P II	1301,874	0,079	0,0022	18,2	0,5	0,009	0,001
P II	1301,874	0,159	0,0023	36,6	0,5	0,007	0,001

Tabulka 4.36: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů.

1) $v_{rad} = (-44,5 \pm 0,2)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1193,290	-44,7
Si II	1190,416	-44,3

Tabulka 4.37: Skupina hodnot $v_{rad} = (-44,5 \pm 0,2)$ km/s.

U této skupiny radiálních rychlosti byly nalezeny pouze dvě čáry. Bohužel čára Si II 1190,416 Å je rozšířena dvěma drobnějšími čarami, které se nacházejí na jejich křídlech a tudíž vypočtená teplota pro tuto čáru je příliš vysoká (300000 ± 74000) K. Na druhou stranu teplota odpovídající rozšíření čáry Si II 1193,290 Å, za předpokladu pouze tepelného rozšíření, je (51000 ± 2900) K, což je sice nižší teplota, ale stále pro mezihvězdné prostředí vysoká hodnota. Pro zjištění teploty se započtením turbulence by bylo zapotřebí mít více dat.

2) $v_{rad} = (11,0 \pm 0,7)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1334,525	11,5
Si II	1194,500	10,5
S II	1259,519	11,7
S II	1253,811	10,3

Tabulka 4.38: Skupina hodnot $v_{rad} = (11,0 \pm 0,7)$ km/s.

Čára Si II se svou hodnotou rozšíření v závislosti na hmotnosti vybočuje od ostatních dat. Pokud vypočteme teplotu pouze z této čáry, vychází (22000 ± 1900) K, což je oproti ostatním hodnotám přibližně sedmkrát nižší hodnota. I tak se jedná o vyšší teplotu. Čára je zřejmě ještě rozšířena turbulentně, ale k potvrzení bohužel chybí další data. Pokud tedy tuto čáru nebudeme zahrnovat k ostatním datům, vychází teplota prostředí (186000 ± 61000) K, což je opět velmi vysoká hodnota. Vzhledem k tomu, že u obou čar S II vychází podobná teplota, bude výsledná hodnota ovlivněna hlavně rozšířením čáry C II, která je saturovaná a zřejmě opticky rozšířena drobnějšími čarami.

3) $v_{rad} = (18,0 \pm 0,8)$ km/s

Všechny tři čáry Si II jsou silně saturovány. Teplota z nich spočtená, resp. teplota prostředí pak vychází velmi vysoká. Zajímavější je ale čára P II, z jejíž rozšíření vychází teplota prostředí (9600 ± 1100) K, což je při-

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1304,370	17,9
Si II	1193,290	18,6
Si II	1190,416	17,1
P II	1301,874	18,2

Tabulka 4.39: Skupina hodnot $v_{rad} = (18,0 \pm 0,8)$ km/s.

patrná teplota pro mezihvězdné prostředí. Silně saturované čáry nelze použít k výpočtu teploty prostředí.

4) $v_{rad} = (20,7 \pm 0,1)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1302,168	20,7
S II	1250,584	20,6

Tabulka 4.40: Skupina hodnot $v_{rad} = (20,7 \pm 0,1)$ km/s.

Čára O I je velmi saturovaná, tudíž opět vychází příliš vysoká teplota, která nemůže být brána v úvahu, už kvůli tomu, že rozšíření čáry O I je založené na více čarách. Teplota zjištěná pouze z čáry S II je (58900 ± 5500) K, což je opět vysoká teplota. Čára může být rozšířena i turbulentně, ale pro ověření by bylo potřeba dalších dat.

5) $v_{rad} = (23,6 \pm 0,8)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1355,594	23,9
Mg II	1239,925	23,7
Si II	1260,422	23,1
Si II	1194,500	23,3
Si II	1264,738	23,2
Ni II	1317,220	24,4

Tabulka 4.41: Skupina hodnot $v_{rad} = (23,6 \pm 0,8)$ km/s.

Čára Si II 1260,422 Å je velmi saturovaná. Je zřejmě rozšířena dalšími čarami a proto její rozšíření je mnohem větší než rozšíření ostatních čar této skupiny. Podíváme-li se na data zbylých čar, zjistíme, že se téměř nacházejí na horizontální spojnici, na první pohled tedy není patrný průběh typický pro tepelné rozšíření. Avšak při fitování dat lze vypočítat teplotu po čistě tepelné rozšíření odpovídající (17000 ± 7000) K, což je teplota blízká hodnotám pro mezihvězdné prostředí. Zajímavější výsledek dostaneme při započtení turbulence, $(3, 1 \pm 1, 1)$ km/s, (9300 ± 2100) K, což je teplota typická pro H II oblast (Osterbrock, 1989).

6) $v_{rad} = (26, 4 \pm 0, 5)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Mg II	1240,395	26,1
S II	1259,519	26,9
S II	1253,811	226,3

Tabulka 4.42: Skupina hodnot $v_{rad} = (26, 4 \pm 0, 5)$ km/s.

Obě dvě čáry S II jsou saturovány, tudíž je zbytečné počítat teplotu prostředí se započtením těchto hodnot. Zajímavější je teplota vypočtená z čáry Mg II, která vychází (12000 ± 1100) K. O něco vyšší hodnota teploty může být způsobena turbulencí, kterou ale bohužel nelze zjistit bez dalších použitelných dat.

4.12 HD 37903

Ve spektru hvězdy HD 37903 jsem identifikovala následující čáry, z toho pro některé laboratorní délky jsem našla dvě nebo více čar, uvedené v následující tabulce 4.43. Radiální rychlosti, koeficient Dopplerova rozšíření a další vypočtené hodnoty se nacházejí v tabulkách 4.44 a 4.45.

Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]	Iont	λ [Å]
C I	1277,245	Mg II	1240,395	S II	1259,519
C II	1334,532	Si II	1304,370	S II	1253,811
C II	1335,708	Si II	1260,422	S II	1250,584
N I	1199,549	Si II	1193,290	Ni II	1317,220
O I	1302,168	Si II	1190,416	P II	1301,874
Mg II	1239,925	Si II	1264,738		

Tabulka 4.43: Identifikované mezihvězdné absorpční čáry ve spektru HD 37903.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
C I	1277,245	0,111	0,0011	26,05	0,26	0,012	0,001
C I	1277,245	0,157	0,0013	36,85	0,31	0,007	0,001
C II	1334,532	0,030	0,0026	6,74	0,58	0,076	0,003
C II	1335,708	0,044	0,0017	9,88	0,38	0,057	0,002
N I	1199,549	0,534	0,0015	133,46	0,37	0,006	0,001
O I	1302,168	0,072	0,0019	16,58	0,44	0,056	0,002
Mg II	1239,925	0,103	0,002	24,9	0,5	0,011	0,001
Mg II	1240,395	0,113	0,0011	27,3	0,3	0,012	0,001
Si II	1304,370	0,064	0,0018	14,7	0,4	0,035	0,001
Si II	1260,422	0,079	0,0021	18,8	0,5	0,057	0,002
Si II	1193,290	0,067	0,0021	16,8	0,5	0,043	0,002
Si II	1190,416	0,059	0,002	14,9	0,5	0,038	0,002
Si II	1264,738	0,068	0,0011	16,1	0,3	0,014	0,001
Si II	1264,738	0,12	0,0009	28,4	0,2	0,009	0,001
S II	1259,519	0,054	0,0024	12,3	0,6	0,037	0,002

Tabulka 4.44: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů. První část tabulky.

Iont	λ_0 [Å]	$\Delta\lambda$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda}$ [Å]	v_{rad} [km/s]	$\delta_{v_{rad}}$ [km/s]	$\Delta\lambda_D$ [Å]	$\delta_{\Delta\lambda_D}$ [Å]
S II	1259,519	0,11	0,0013	26,2	0,3	0,026	0,001
S II	1253,811	0,051	0,0011	12,2	0,3	0,022	0,001
S II	1253,811	0,108	0,0019	25,8	0,5	0,018	0,001
S II	1250,584	0,024	0,0021	5,8	0,5	0,015	0,001
S II	1250,584	0,086	0,0028	20,6	0,7	0,019	0,001
Ni II	1317,220	0,115	0,0012	26,2	0,3	0,012	0,001
P II	1301,874	0,085	0,0016	19,6	0,4	0,011	0,001

Tabulka 4.45: Odvozené parametry identifikovaných spektrálních čar. $\delta_{\Delta\lambda}$, δ_A a δ_w jsou nejistoty příslušných parametrů. Pokračování předchozí tabulky.

1) $v_{rad} = (6,3 \pm 0,5)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1334,532	6,7
S II	1250,584	5,8

Tabulka 4.46: Skupina hodnot $v_{rad} = (6,3 \pm 0,5)$ km/s.

Čára C II je příliš saturovaná, proto je zbytečné započítávat hodnotu jejího rozšíření do výsledné teploty. Počítáme-li teplotu pouze u čáry S II, vychází (30000 ± 2000) K, což je vysoká hodnota. Čára je tudíž zřejmě rozšířená dalšími mechanismy.

2) $v_{rad} = (12,5 \pm 0,3)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
S II	1259,519	12,9
S II	1253,811	12,2

Tabulka 4.47: Skupina hodnot $v_{rad} = (12,5 \pm 0,3)$ km/s.

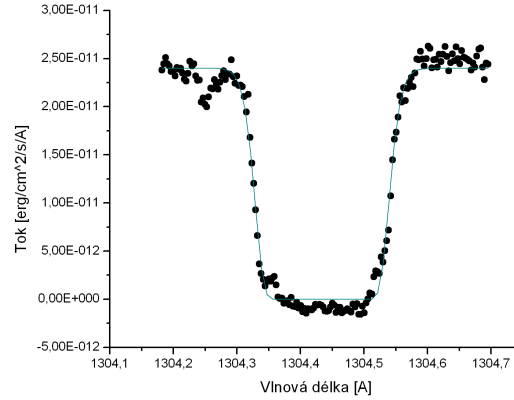
Teplota prostředí vychází (115000 ± 58000) K. Čára S II 1259,519 Å je více rozšířena než čára S II 1253,811 Å, což může být dáno vyšší pravděpodobností daného přechodu. Čáry jsou pravděpodobně rozšířeny ještě jinými

mechanismy, je možné turbulentní rozšíření, ale k potvrzení by bylo nutné mít i další data jiných čar.

3) $v_{rad} = (14,8 \pm 0,1) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1304,370	14,7
Si II	1190,416	14,9

Tabulka 4.48: Skupina hodnot $v_{rad} = (14,8 \pm 0,1) \text{ km/s}$.



Obrázek 4.18: Saturovaná čára Si II 1304,370 Å.

Teplota prostředí vychází $(158000 \pm 27000) \text{ K}$, což je příliš vysoká teplota. Čáry jsou zřejmě rozšířeny i dalšími mechanismy. Např. čára Si II 1334,370 Å je opět saturovaná, je zřejmě opticky rozšířena drobnějšími čarami (viz. obrázek 4.18).

4) $v_{rad} = (16,5 \pm 0,4) \text{ km/s}$

Čáry O I a Si II 1193,290 Å jsou příliš saturované na to, aby se jejich rozšíření bralo za čistě tepelné, příp. rozšířené turbulencí. Zajímavý výsledek vychází u čáry Si II 1264,738 Å, kde teplota vychází $(22400 \pm 2500) \text{ K}$, což

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
O I	1302,168	16,6
Si II	1193,290	16,8
Si II	1264,738	16,1

Tabulka 4.49: Skupina hodnot $v_{rad} = (16,5 \pm 0,4)$ km/s.

je sice stále vysoká teplota, ale alespoň se blíží (oproti teplotám, které by vyšly u zbylých čar) teplotám typickým pro mezihvězdné prostředí. Čára je tedy zřejmě rozšířena i dalšími mechanismy.

5) $v_{rad} = (19,7 \pm 1,0)$ km/s

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Si II	1260,422	18,8
S II	1250,584	20,7
P II	1301,874	19,6

Tabulka 4.50: Skupina hodnot $v_{rad} = (19,7 \pm 1,0)$ km/s.

Čára Si II je velmi saturovaná, proto jsem ji v dalších výpočtech neuvažovala. Vyneseme-li do grafu závislost hmotnosti na příslušné tepelné rychlosti u zbylých dvou čar, nedostáváme závislost typickou pro tepelné rozšíření. Tepelná rychlost pro čáru S II vychází vyšší než pro P II. Může to být dáno i tím, že v dané oblasti se nachází více iontů ve stavu odpovídající přechodu pro čáru S II než u čáry P II. Dalším důvodem může být to, že atomové hmotnosti daných iontů jsou velmi blízko sebe a že se nemusí zde projevit závislost klesající hodnoty tepelné rychlosti na rostoucí hmotnosti. Nebo se může jednat o dvě různé oblasti s podobnou radiální rychlostí. Každopádně za zdůraznění stojí teplota, která vychází pro čáru P II (14400 ± 1300) K, která odpovídá teplotám H II oblastí.

6) $v_{rad} = (25,8 \pm 0,9) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
C II	1277,245	26,1
Mg II	1239,925	24,9
S II	1259,519	26,2
S II	1253,811	25,8
Ni II	1317,220	26,2

Tabulka 4.51: Skupina hodnot $v_{rad} = (25,8 \pm 0,9) \text{ km/s}$.

Radiální rychlost pro čáru Mg II se nejvíce odchyluje od ostatních radiálních rychlostí ve skupině. Vychází i jiná teplota pro tuto čáru (12500 ± 1100) K, což je teplota velmi blízká teplotě typické H II oblasti. Zajímavé je, že teplota pouze pro čáru C II vychází (6900 ± 600) K, což je v podstatě předpokládaná hodnota pro H II oblast. Stejně jako Mg II nezapadá s ostatními daty do závislosti poklesu vypočtené tepelné rychlosti na rostoucí hmotnosti. Může se jednat o čáru z jiného prostředí o podobné radiální rychlosti. Fitujeme-li ostatní data, s vynecháním S II 1259,519 Å, jelikož je rozšířená drobnými čarami uvnitř, vychází teplota prostředí (39000 ± 5500) K při započtení pouze tepelného rozšíření. Při započtení turbulence, ($3,9 \pm 0,7$) km/s, vychází teplota (18000 ± 2800) K, což je blízko typické teplotě pro H II oblast. Čáry jsou zřejmě rozšířeny i dalšími mechanismy.

7) $v_{rad} = (27,9 \pm 0,6) \text{ km/s}$

Iont	λ_0 [Å]	v_{rad} [km/s]
Mg II	1240,395	27,3
Si II	1264,738	28,4

Tabulka 4.52: Skupina hodnot $v_{rad} = (27,9 \pm 0,6) \text{ km/s}$.

Pokud bereme v úvahu pouze tepelné rozšíření, vychází teplota prostředí (12000 ± 2800) K, což je teplota velmi blízko typické teploty H II oblasti. Započítáme-li i turbulenci (v tomto případě $(2,0 \pm 0,6)$ km/s), vychází teplota přesně jako udávaná typická teplota H II oblasti (8300 ± 300) K. Můžeme tedy říci, že čáry tohoto prostředí jsou především rozšířeny tepelně a turbulentně.

4.13 Srovnání výsledků jednotlivých hvězd

4.13.1 Srovnání identifikace čar

Na následujícím obrázku 4.19 je shrnutá identifikace pro jednotlivá spektra, kde tečka znamená, že daná čára byla ve spektru identifikována:

Ion	λ [nm]	HD36841	HD36959	HD36960	HD37061	HD36512	HD37021	HD37043	HD37903
C I	1277,245	•	•		•		•		•
C I	1656,928	•							
C I	1560,310	•							
C II	1334,532	•	•	•	•		•		•
C II	1335,708	•	•	•	•		•		•
C II	2325,400			•					
C IV	1548,187	•	•						
C IV	1550,772	•	•						
N I	1199,549		•	•					•
O I	1302,168	•	•	•	•		•	•	•
O I	1355,598				•			•	
Mg I	2026,477			•		•			
Al II	1670,787	•	•	•		•			
Mg II	1239,925	•	•		•		•		•
Mg II	1240,395	•	•		•		•		•
Si II	1533,431	•		•					
Si II	1526,707	•	•	•					
Si II	1304,370	•	•	•	•		•		•
Si II	1260,422	•	•	•	•		•		•
Si II	1193,290	•	•	•	•		•		•
Si II	1190,416	•	•	•	•		•		•
Si II	1194,500	•	•	•	•		•		•
Si II	1264,738	•	•		•		•		•
Si II	1808,013			•		•			
Si III	1206,510		•	•					
Si IV	1393,755	•							
S II	1259,519	•	•	•	•		•		•
S II	1253,811	•	•	•	•		•		•
S II	1250,584	•	•	•	•		•		•
Fe II	1608,460	•	•	•					
Ni II	1317,220				•		•		•
Ni II	1370,140	•							
P II	1301,874	•			•		•		•

Obrázek 4.19: Identifikace ve srovnání jednotlivých spekter.

Zajímavé je porovnání spekter hvězd HD 36959 a HD 36960, které leží od sebe na obloze jen v úhlové vzdálenosti $36,11''$ [5], ale liší se ve své vzdálenosti. Jak by se dalo čekat, identifikace čar je podobná, ale zcela se neshoduje. Jak jsem již předpokládala v kapitole o hvězdě HD 36512, ve spektru této hvězdy se nenachází mnoho mezihvězdných čar, jelikož se nachází v oblasti, která není bohatá na mezihvězdnou látku, tak jako u jiných hvězd. Stejně tak u hvězdy HD 37043 jsem předpokládala, že její spektrum nebude příliš ovlivněno mezihvězdnou látkou, jelikož se hvězda nachází před oblastí OMC 5. Výsledky tedy potvrzují původní domněnky.

4.13.2 Srovnání radiálních rychlostí

	HD 36512	HD 36841	HD 36959	HD 36960	HD 37061	HD 37021	HD 37903
1)						$6,3 \pm 0,4$	$6,3 \pm 0,5$
2)			$9,4 \pm 1,9$			$8,5 \pm 1,1$	$9,9 \pm 0,4$
3)				$11,6 \pm 0,1$	$11,0 \pm 0,7$		
4)		$13,9 \pm 0,9$	$13,3 \pm 0,7$				$12,5 \pm 0,3$
5)				$15,6 \pm 0,6$	$15,0 \pm 0,5$		$14,8 \pm 0,1$
6)						$16,2 \pm 0,9$	$16,5 \pm 0,4$
7)		$18,4 \pm 1,4$	$17,4 \pm 0,8$	$18,9 \pm 0,8$	$18,0 \pm 0,8$	$18,7 \pm 0,7$	
8)			$19,3 \pm 0,9$				$19,7 \pm 1,0$
9)		$20,8 \pm 0,3$			$20,7 \pm 0,1$	$20,9 \pm 0,4$	
10)	$22,9 \pm 0,8$	$22,3 \pm 0,4$		$22,7 \pm 0,9$			
11)		$23,6 \pm 0,7$			$23,6 \pm 0,8$		
12)	$26,1 \pm 0,3$	$26,9 \pm 0,5$			$26,4 \pm 0,5$		$25,8 \pm 0,9$
13)			$27,8 \pm 0,7$	$27,8 \pm 0,6$			$27,9 \pm 0,6$
14)		$29,9 \pm 0,5$	$30,3 \pm 0,3$				
15)			$33,3 \pm 0,7$		$32,9 \pm 0,9$	$33,1 \pm 0,3$	
16)					$36,6 \pm 0,5$		$36,9 \pm 0,3$

Hodnoty jsou uvedeny v km/s. Hodnoty označené patří příslušným skupinám, hodnoty označené patří jednotlivým čarám, které nepřísluší k žádné skupině daného spektra.

Obrázek 4.20: Porovnání radiálních rychlostí.

Na obrázku (4.20) je graficky vynesena shoda nalezených radiálních rychlostí jednotlivých komponentů pro jednotlivá spektra. Do obrázku jsem zahrnu-la i čáry, pro které u konkrétních spekter nebyla nalezena skupina stejné radiální rychlosti. V obrázku nejsou zaneseny skupiny, u kterých nebyla zjištěna podobnost radiální rychlostí s jinou skupinou jiného spektra.

Skupiny radiálních rychlostí se shodují celkem v 16 případech, průměrné hodnoty radiálních rychlostí jsou v tabulce 4.53:

$6,3 \pm 0,6$	$9,3 \pm 2,2$	$11,3 \pm 0,7$	$13,2 \pm 1,2$
$15,1 \pm 0,8$	$16,4 \pm 1,0$	$18,3 \pm 2,0$	$19,5 \pm 1,3$
$20,8 \pm 0,7$	$22,6 \pm 1,3$	$23,6 \pm 1,0$	$26,3 \pm 1,2$
$27,9 \pm 0,9$	$30,1 \pm 0,6$	$33,1 \pm 1,2$	$34,5 \pm 1,0$

Tabulka 4.53: Průměrné hodnoty radiálních rychlostí shodujících se skupin, udávané v km/s.

Identifikované čáry jednotlivých skupin podobných radiálních rychlostí se v mnoha případech shodují. Zajímavější jsou ale skupiny, kdy se nejen shoduje identifikace některých čar, ale i hodnoty jejich koeficientu rozšíření $\Delta\lambda_D$. Jedná se o skupinu $9,3 \pm 2,2$ km/s, u které se shoda nejen identifikace ale také podobnost koeficientu rozšíření týká čar C II 1334,532 Å a C II 1335,708 Å. Další shoda se nachází u skupiny $11,3 \pm 0,7$ km/s na čáře C II 1334,532 Å. Může se jednat o stejný oblak, jelikož intervaly nejistot se u těchto dvou skupin prolínají a navíc, jak je patrné z obrázku 4.20, jedná se o skupiny nalezené ve spektrech jiných hvězd než u skupiny $9,3 \pm 2,2$ km/s. Porovnáme-li koeficient rozšíření čáry C II 1334,532 Å u obou skupin, leží jeho hodnota v intervalu $0,077 \pm 0,002$ Å.

Shoda identifikovaných čar a podobnost koeficientu rozšíření je i u skupiny $20,8 \pm 0,7$ km/s pro čáru O I 1302,168 Å a u skupiny $26,3 \pm 1,2$ km/s pro čáry S II 1253,811 Å a S II 1259,519 Å.

4.14 Diskuze výsledků

Z identifikace čar lze usoudit několik závěrů. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.13.1 potvrdily se předchozí domněnky. U hvězd, které se nacházely před oblastí komplexu OMC nebo se nacházely v oblasti, do kterých nezasahoval mezihvězdný materiál tolik, jako u ostatních hvězd, se našlo jen malé množství mezihvězdných čar. Při srovnání jednotlivých skupin radiálních rychlostí si lze všimnout, že se shoduje jedna skupina radiálních rychlostí u všech spekter (s výjimkou spekter hvězd HD 36512 a HD 37043)– $18,3 \pm 2,0$ km/s. Na druhou stranu bychom zřejmě čekali, že se radiální rychlosti budou nejvíce shodovat u hvězd HD 36959 a HD 36960, které na obloze leží velmi blízko sebe, ale shodují se jen v jednom případě.

Zajímavé je srovnání identifikovaných čar mezihvězdného prostředí v rámci skupin o podobných radiálních rychlostí. Ve čtyřech případech (skupiny radiálních rychlostí $9,3 \pm 2,2$ km/s, $11,3 \pm 0,7$ km/s, $20,8 \pm 0,7$ km/s a $26,3 \pm 1,2$ km/s) byla nalezena shodná identifikace čar, které navíc vykazovaly podobnou ne-li shodnou hodnotu koeficientu rozšíření.

Při zjišťování teplot jednotlivých prostředí je patrné, že mnoho čar bylo rozšířeno i dalšími mechanismy než jen tepelným nebo turbulentním rozšířením. Mnoho čar bylo saturovaných, rozšiřovaly je drobné čáry uvnitř. V některých případech se ale zřejmě jednalo i o jiný typ rozšíření, jelikož čáry nejevily saturaci a při fitování se započtením tepelného a turbulentního rozšíření, stále vycházela vysoká teplota prostředí. Je tedy možné, že některé čáry byly rozšířeny tlakem nebo jiným mechanismem.

Na druhou stranu v mnoha případech vycházely i teploty, které by bylo možné očekávat v H II oblastech. Nejvíce případů bylo nalezeno u hvězd HD 37021 ((5800 ± 2300) K, (9600 ± 900) K a (17500 ± 200) K), HD 37061 ((9300 ± 2100) K, (9600 ± 1100) K, (12000 ± 1100) K) a HD 37903 ((6900 ± 600) K, (8300 ± 300) K, (12500 ± 1100) K, (14400 ± 1300) K a (18000 ± 2800) K). Ve srovnání s kapitolou 3 je zřetelně vidět, že právě tyto tři hvězdy se, oproti zbylým hvězdám, nacházejí v rozsáhlých H II oblastech. To, že právě u těchto hvězd bylo nalezeno nejvíce hodnot odpovídajících teplotám

H II oblastí, potvrzuje, že typické teploty H II oblastí se pohybují okolo 8000 K (Osterbrock, 1989).

Zajímavé je, že vychází podobná turbulentní rychlost okolo 13 km/s u dvou skupin hvězd HD 36959 a HD 36960, které se nacházejí velmi blízko sebe na obloze (pouze $36,11''$), ale ve skutečnosti je hvězda HD 36959 asi o 1000 pc dál než hvězda HD 36960. Zajímavé tedy je, že tato podobná turbulentní rychlost (pro HD 36959 $(13,7 \pm 0,9)$ km/s a pro HD 36960 $(13,3 \pm 0,7)$ km/s) vychází u hvězdy HD 36959 (tedy té vzdálenější) pro radiální rychlost skupiny $(24,7 \pm 1,4)$ km/s a vypočtenou teplotu (12900 ± 600) K a u hvězdy HD 36960 pro skupinu o radiální rychlosti $(18,9 \pm 0,8)$ km/s a pro vypočtenou teplotu (700 ± 70) K. Z těchto výsledků je možné usoudit, že se do obou spekter mohl promítnout stejný oblak mezihvězdného prostředí. Ve spektru hvězdy HD 36960 se mohla promítnout část oblaku o nižší teplotě, zatímco ve spektru hvězdy HD 36959 se mohla promítnout část oblaku o vyšší teplotě. Vzhledem k tomu, že se hvězdy, resp. hvězda HD 36960, nachází uvnitř velmi dynamicky bohaté oblasti, je možné, že se do spekter obou hvězd promítl výron látky nebo rozpínající se obálka. Oblast okolo těchto dvou hvězd je totiž plná protohvězd a nově vznikajících hvězd.

Velmi často vycházela turbulentní rychlost kolem 3 km/s: $(2,9 \pm 0,7)$ km/s (HD 37021), $(3,1 \pm 1,1)$ km/s (HD 37061), $(2,0 \pm 0,6)$ km/s a $(3,9 \pm 0,7)$ km/s (HD 37903). Bohužel nemohu potvrdit, že se jedná o typickou hodnotu turbulentní rychlosti. Osterbrock (1989) udává, že se turbulence pohybuje okolo 10 km/s. Jiné publikace se konkrétní hodnotou turbulentní rychlosti mezihvězdné látky nezabývají.

Při porovnání výsledků od Cartledge (2004) a Savage (2001), nacházím shodu u hvězdy HD 36841 (která byla nalezena v mé bakalářské práci, Zychová, 2008) pro skupiny radiálních rychlostí $(29,9 \pm 0,4)$ km/s, $(14,0 \pm 1,6)$ km/s a $(-10,9 \pm 0,5)$ km/s, u hvězdy HD 379061 uvádí Savage hodnotu $(28,8 \pm 4,1)$ km/s, kterou potvrzují svou nalezenou hodnotou: $(26,4 \pm 0,5)$ km/s. U hvězdy HD 37903 nepotvrzují žádnou z hodnot uvedených Savagem (2001). U ostatních hvězd se už žádná práce nezabývala zjišťováním radiálních rychlostí z UV spektra daných hvězd.

Závěr

V této práci zabývající se zpracováním spekter hvězd HD 36512, HD 36841, HD 36595, HD 36960, HD 37021, HD 37043, HD 37061 a HD 37903 bylo identifikováno celkem 124 čar mezihvězdného prostředí. Jednotlivé čáry byly fitovány zvoleným absorpčním profilem. Byly vypočteny radiální rychlosti jednotlivých komponent a bylo nalezeno celkem 35 hodnot radiálních rychlostí jednotlivých komponent mezihvězdných oblaků, z toho 4 hodnoty potvrdily hodnoty uvedené v odborné literatuře (Cartledge a kol, 2004, Savage a kol, 2001). Výsledky dosažené v této práci rozšířily hodnoty radiálních rychlostí o 16 nových hodnot radiálních rychlostí komponent mezihvězdných oblaků pro hvězdy HD 36841, HD 37061 a HD 37903, u kterých již tato problematika byla studována. Navíc bylo nalezeno 15 hodnot radiálních rychlostí komponent mezihvězdných oblaků u hvězd, u kterých tato problematika nebyla zatím studována.

Tato práce zahrnuje i výsledky vypočtených teplot při započtení tepelného a turbulentního rozšíření čar. Bylo zjištěno, že ne u všech čar lze považovat tepelné a turbulentní rozšíření za jediné mechanismy rozšíření, ke kterým dochází. U hvězd HD 37021, HD 37061 a HD 37903 odpovídá většina vypočtených teplot teplotám H II oblastí, což potvrzuje fakt, že se právě tyto tři hvězdy nacházejí uvnitř rozsáhlých H II oblastí.

Výsledky této práce poukazují na zajímavou problematiku turbulence v mezihvězdném prostředí, byly nalezeny podobné hodnoty turbulentních rychlostí kolem hodnoty 3 km/s. Zde je zapotřebí podrobnějšího zkoumání turbulentního rozšíření čar mezihvězdného prostředí u více hvězd. Dále byla nalezena shoda turbulentních rychlostí u komponentů mezihvězdného oblaku

ve spektrech hvězd HD 36959 a HD 36960, z jejichž dalších parametrů může vyplývat, že se do obou spekter promítl výron látky nebo rozpínající se materiál vzniklý v důsledku tvorby hvězd, na kterou je toto prostředí bohaté.

Studiem UV spekter hvězd spektrálních typů O a B lze zjistit mnoho informací o mezihvězdném prostředí, teplotách, turbulentních pohybech daného prostředí nebo nalézt zajímavé souvislosti či shody mezi výsledky pro studovaná spektra jednotlivých hvězd.

Literatura

Beals C.S.:*On the Interpretation of Interstellar Lines*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, **96**, 661, 1936.

Blaauw A.:*The O Associations in the Stellar Neighborhood*, Annual Review of Astron. Astrophyscs, **2**, 213, 1964.

Brown A.G.A, de Geus E.J., Zeeuw P.T.:*The Orion OB1 Association*, Astron. Astrophysics, **284**, 101, 1994.

Cartledge S. I. B., Lauroesch J. T., Mayer D. M., Sofia U. J.:*The Homogeneity of Interstellar Oxygen in the Galactic Disk*, ApJ, **613**, 1037, 2004.

Cowie L.L., Songaila A., York D.G.:*Orion's Cloak - A rapidly expanding shell of gas centered on the Orion OB1 association*, ApJ, **230**, 469, 1979.

Cox A. N.: *Astrophysical quantities*, Springer - Verlag, New York, 2000.

Doi T., O'Dell C. R., Hartigan P.:*Internal Velocities in the Orion Nebula: Large Radial Velocity Features*, ApJ, **127**, 2456, 2004.

Dyson J. E., Williams D. A.: *The Physics of The Interstellar Medium*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1997.

Hartmann J.: *Investigations on the Spectrum and Orbi of Delta Orionis*, ApJ, **19**, 268, 1904.

Heger M.L.: *Stationary Sodium Lines in Spectroscopic Binaries*, PASP, **31**, 304, 1919.

Ikeda N., Sunary K., Kitamura J.: *A survey of dense cores in the Orion A cloud*, ApJ, **665**, 1194, 2007.

Johnstone D., Bally J.: *Large area mapping at 850 μm . V. analysis of the lump distrubution in the Orion and South molecular Cloud*, ApJ, **653**, 383, 2006.

Kleczek J.: *Velká Encyklopedie Vesmíru*, Academia, Praha, 2002.

Li D., Goldsmith P.F., Menten K.: *Masive quiescent cores in Orion. I. Temperature structure*, ApJ, **587**, 262, 2003.

Malin D.F., Ogura K. and Walsh J.R.: *Herbih Haro objects in the vicinity of NGC 2023*, Mon. Not. R. Astron. Soc., **227**, 361, 1987.

Mikulášek Z., Krtička J.: *Fyzika hvězd a hvězdných soustav*, MU, Brno, 2005.

O´Dell C.R.: *New proplyds, outflows, shock and reflection nebula in M42 and outer parts of the Orion nebula*, The Astronomical Journal, **122**, 2662, 2001.

Osterbrock D. E.: *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, University Science Books, Sausalito, California, 1989.

Rutten R. J.: *Radiative Transfer in Stellar Atmospheres*, Institute of Theoretical Astrophysics, Oslo, 2003.

Savage B. F., Meade M. R., Sembach K. R.: *IUE absorption - line observations of the moderately and highly ionized interstellar medium toward 164 early-type stars*, ApJ, **136**, 631, 2001.

Simón-Díaz S. et col : *Masive stras and their surrounding nebulae: a combined approach*, RevMexAA, **33**, 137, 2008.

Spitzer L. Jr.,: *Physical Processes in the Interstellar Medium*, JohnWiley and Sons, Canada, 1978.

Stanke T. et col.: *An unbiased H₂ survey for protostellar jets in Orion A*, AaA, **392**, 239, 2002.

Taylor J. H., Cordes J. M.: *Pulsar Distances and the Galactic distribution of Free Electrons*, ApJ, **411**, 674, 1993.

Trümpler R. J.: *Absorption of Light in the Galactic Systems*, PASP, **42**, 214, 1930.

Yu K., Bally J., Devine D.,: *Shock-excited H₂ flows in OMC 2 and OMC 3*, ApJ, **485**, L45, 1997.

Zychová L.: *Studium mezihvězdného prostředí směrem k hvězdě HD 36841*, Brno, 2008.

Katalogy

Catalogue of Stellar Diameters (CADARS)

Rotational Velocities of Stars, Glebocki, 2000

Rotational Velocities of B stars from BSC, Abt, 2002

Vsini of Orion low-mass stars, Wolff, 2004

Hipparcos, the New Reduction, van Leeuwen, 2007

Rotational Velocities of early-type binaries, Howe, 2009

Elektronické zdroje

[1] <http://www.hubblesite.com>

[2] <http://archive.stsci.edu/scrapbook.php>

[3] <http://www.astro.pef.zcu.cz>

[4] <http://archive.stsci.edu/instruments/stis/>

[5] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

[6] <http://webviz.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

[7] <http://www.nist.gov/physlab/data.asd.cfm>