

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2008

Eva Arazimová

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Eva Arazimová

Spektroskopické studium bílých trpaslíků

Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce:
Dr. Adéla Kawka, Ph.D.

Studijní program: Fyzika
Studijní obor: Astronomie a astrofyzika

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi pomáhali při psaní této práce. Především doktorce Adéle Kawce, mé vedoucí diplomové práce, za velmi pečlivé vedení, poskytování literatury, obětavou pomoc se všemi problémy a podporu. Dále doktoru Stéphane Vennesovi za poskytnutá pozorování a mnohé programy a výpočty. V neposlední řadě také doktoru Jiřímu Kubátovi za četné připomínky a rady. Práci bych chtěla věnovat Ing. Tomáši Krajíčkovi.

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

V Praze dne 16. března 2008

Eva Arazimová

Obsah

Abstrakt	5
1 Úvod	6
1.1 Historie objevu	6
1.2 Vlastní pohyb	8
1.3 Vývoj k bílému trpaslíkovi	10
1.4 Vlastnosti bílých trpaslíků	11
1.5 Struktura bílého trpaslíka	15
1.6 Chladnutí bílého trpaslíka	18
1.7 Model atmosféry	23
1.7.1 Profily spektrálních čar	26
1.8 Pulzující bílí trpaslíci	28
1.9 Bílí trpaslíci jako složky dvojhvězd	30
1.10 Bílí trpaslíci v Galaxii	31
1.11 Cíle diplomové práce	33
2 Pozorování	35
2.1 CTIO	35
2.2 SDSS	38
3 Analýza spekter	41
3.1 Bílí trpaslíci typu DA	41
3.2 Bílí trpaslíci typu DC a DZ	44
3.3 Bílí trpaslíci typu DQ	45
3.4 Bílí trpaslíci typu DB	47
3.5 Zajímaví bílí trpaslíci	49
3.6 Teplotní rozdělení	52
4 Další vlastnosti bílých trpaslíků	55
4.1 Hmotnost a stáří	55
4.2 Absolutní hvězdná velikost	55
4.3 Vzdálenost	56
4.4 Hmotnostní rozdělení	59

5	Kinematika	63
5.1	Složky rychlosti U , V a W	63
5.2	Závislost složek rychlosti U a V	63
5.3	Diskuse příslušnosti bílých trpaslíků ke složkám Galaxie	69
6	Luminozitní funkce	70
6.1	Postup výpočtu	70
6.2	Luminozitní funkce pro bílé trpaslíky typu DA	70
6.3	Diskuse průběhu luminozitní funkce	72
7	Závěr	73
7.1	Hlavní výsledky	73
7.2	Úkoly do budoucna	76
8	Dodatky	78
8.1	Analýza spekter bílých trpaslíků typu DA	79
8.2	Znamé teploty a povrchová gravitační zrychlení bílých trpaslíků	106
8.3	Hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří známých bílých trpaslíků	111
8.4	Kinematika známých bílých trpaslíků	115
	Literatura	119

Název práce: Spektroskopické studium bílých trpaslíků

Autor: Eva Arazimová

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: Dr. Adéla Kawka, Ph.D., Astronomický ústav AV ČR

e-mail vedoucího: kawka@sunstel.asu.cas.cz

Abstrakt: Studovali jsme celkem 76 spekter bílých trpaslíků vybraných z rNLTT katalogu, z nichž u 64 objektů dosud nebyly známy žádné fyzikální vlastnosti. Studovaná spektra byla z části napozorována na CTIO, zbylá data jsme získali z SDSS. Spektra bílých trpaslíků jsme analyzovali a získali hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení. U bílých trpaslíků typu DA jsme fitovali čáry Balmerovy série vodíku, průběhy spekter bílých trpaslíků typu DC a DZ jsme porovnávali s průběhem spektra absolutně černého tělesa. Efektivní teploty bílých trpaslíků typu DQ a DB jsme odhadovali za pomoci dostupné literatury. Porovnali jsme teplotní rozdělení námi studovaných bílých trpaslíků s teplotním rozdělením 120 bílých trpaslíků vybraných z katalogu rNLTT, u kterých již byla teplota známa. Z hodnot teploty a povrchového gravitačního zrychlení jsme vypočítali hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří všech 196 objektů a vykreslili jsme jejich hmotnostní rozdělení. Určili jsme složky rychlosti U , V a W vzhledem k LSR pro všech 196 bílých trpaslíků. Vynesli jsme závislost rychlosti U na rychlosti V a diskutovali jsme příslušnost objektů k jednotlivým složkám Galaxie. Také jsme vypočítali luminozitní funkci pro bílé trpaslíky typu DA a porovnali jsme její průběh s výsledky jiných autorů.

Klíčová slova: bílý trpaslík, spektrální analýza, kinematika, luminozitní funkce

Title: Spectroscopic studies of white dwarf stars

Author: Eva Arazimová

Department: Astronomical Institute of Charles University

Supervisor: Dr. Adéla Kawka, Ph.D., Astronomical Institute AV CR

Supervisor's e-mail address: kawka@sunstel.asu.cas.cz

Abstract: We studied the spectra of 76 white dwarfs selected from the rNLTT catalogue, for which the physical properties of 64 of these objects were not known. Spectra were obtained at CTIO, and the remainder were taken from the SDSS. The white dwarf spectra were analyzed for their temperature and surface gravity. For DA white dwarfs we fitted the Balmer lines, the spectra of DC and DZ white dwarfs were compared to a black body spectrum to estimate their temperature. The effective temperatures of DQ and DB white dwarfs were estimated using the available literature. We compared the temperature distribution of the group of white dwarfs that we have studied to the temperature distribution of the 120 rNLTT white dwarfs which had their temperature already known. From their temperature and surface gravity we have calculated masses, absolute magnitudes, distances and ages of all 196 objects and we drawn their mass distribution. We have determined the velocity components U , V and W with regard to the LSR for all 196 white dwarfs. Using the velocity components U and V we found that most of our objects belong to the thin-disk. We also calculated the DA luminosity function and we compared it to the results of other authors.

Keywords: white dwarf, spectral analysis, kinematics, luminosity function

Kapitola 1

Úvod

1.1 Historie objevu

Existenci hvězd svými vlastnostmi zcela odlišných od objektů tehdy známých si lidé poprvé uvědomili v roce 1910. Henry Norris Russell vykreslil závislost spektrálního typu na absolutní hvězdné velikosti a zaznamenal bod stojící v diagramu osamoceně. Obrázek 1.1 ukazuje původní diagram H. N. Russella. Bylo zřejmé, že hvězda v levé dolní části diagramu je horká (bílá) a má malý poloměr. Objekt dnes známý pod jménem 40 Eridani B se tak stal prvním zástupcem nové skupiny hvězd nazvané bílí trpaslíci.

Podobnou záhadu představovala také hvězda van Maanen 2, u níž Adriaan van Maanen (1917) určením spektrálního typu zjistil, že je vzhledem ke své nízké svítivosti příliš horká. Bylo zřejmé, že tyto nové objekty mají velikosti planet, ale jejich hmotnosti nebyly dosud známy. Další poznatky byly získány studiem třetího tak zvaného ‘klasického bílého trpaslíka’, Siria B.

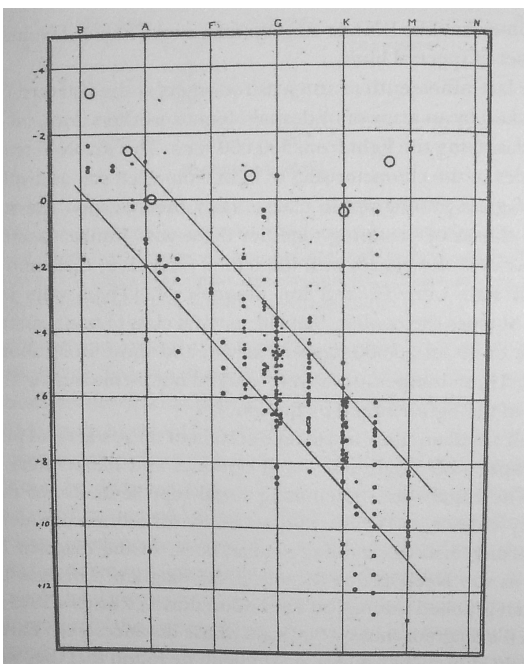
Friedrich W. Bessel pozoroval Siria v letech 1834 až 1844 a ve svých pozorováních zkombinovaných s předchozími pozorováními sahajícími až do roku 1755 si všiml, že Sirius při pohybu po obloze osciluje okolo své zdánlivé dráhy. Z toho usoudil, že Sirius musí mít průvodce (Bessel, 1844). Průvodce Siria, Sirius B, byl vizuálně zaznamenán až Alvanem Clarkem v roce 1862 (Bond, 1862). V roce 1910 byla stanovena jeho hmotnost na $0.94 M_{\odot}$ (Boss, 1910). Ze spektrálního typu (Adams, 1915) byla Siriu B přiřazena efektivní teplota 8000 K, která spolu s již známou svítivostí poskytla první odhad poloměru tělesa podle Stefanova zákona

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4, \quad (1.1)$$

kde L je svítivost, R poloměr, σ Stefanova–Boltzmannova konstanta a T_{eff} efektivní teplota. Získaná hodnota hustoty hvězdy pro určený poloměr $5 \cdot 10^4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ se zdála být absurdní.

Nezávislý test vysoké hustoty objektu byl možný kolem roku 1920, kdy se od sebe Sirius A a Sirius B ve své dráze nejvíce vzdálili. Einstein (1907) předpověděl gravitační rudý posuv v silném gravitačním poli podle vztahu

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{Rc^2}, \quad (1.2)$$

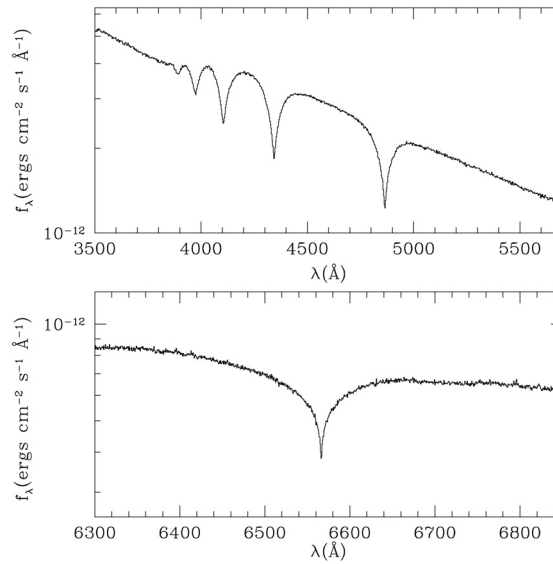


Obrázek 1.1: Absolutní hvězdná velikost v závislosti na spektrálním typu hvězd. Uveřejněno v Russell (1914).

kde λ je vlnová délka, G gravitační konstanta, c rychlost světla a R a M jsou poloměr a hmotnost hvězdy, ze které záření vychází. Eddington (1924) na základě gravitačního rudého posuvu určil hodnotu rychlosti vzdalování na $\sim 20 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Když Adams (1925) oznámil naměření gravitačního rudého posuvu odpovídajícího $\sim 21 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, znamenalo to potvrzení obecné teorie relativity stejně jako vysoké hustoty bílých trpaslíků.

V roce 1971 získal Greenstein a kol. hodnotu posuvu $89 \pm 16 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, což je způsobeno tím, že Adamsovo spektrum Siria B bylo silně kontaminováno Sirem A. Doposud nejčistší spektrum Siria B bylo získáno pomocí Hubbleova dalekohledu (Barstow a kol., 2005). Toto spektrum je ukázáno na obrázku 1.2. Gravitační rudý posuv získaný z tohoto spektra je $80 \pm 5 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

V roce 1920 byli tedy známi pouze tři bílí trpaslíci, ale bylo již zřejmé (Eddington, 1926), že se pravděpodobně jedná o jedny z nejhojnějších objektů v naší galaxii. Všechny tři objekty se nacházejí velmi blízko Slunci, nejsou od něj vzdáleny více než 5 pc, a jen jejich nízká jasnost omezovala další pozorování. V roce 1939 již bylo známo 18 bílých trpaslíků, v roce 1950 jejich počet vzrostl na 111 (Schatzman, 1958) a v současné době je katalogizováno přibližně 10 000 bílých trpaslíků (Eisenstein a kol., 2006).



Obrázek 1.2: HST spektrum Siria B (Barstow a kol., 2005).

1.2 Vlastní pohyb

Protože jsou bílí trpaslíci velmi málo jasní, jsou objevováni v blízkosti Slunce a mají proto poměrně velký vlastní pohyb. Hvězda van Maanen 2 byla objevena A. van Maanenem právě při hledání hvězd s velkým vlastním pohybem. Její vlastní pohyb μ činí $3''$ za rok. Hledání objektů s velkým vlastním pohybem inicioval především W. J. Luyten.

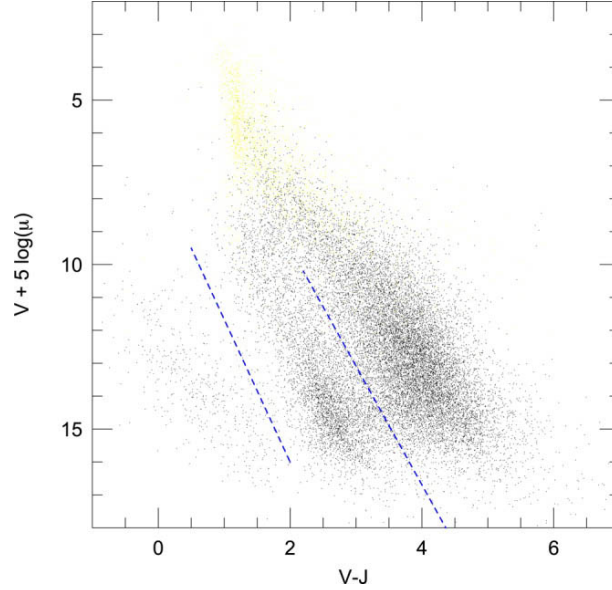
Tabulka 1.1: Přehledky oblohy vedené W. J. Luytenem.

přehledka	poznámka
Bruce Proper Motion Survey (1963)	
Luyten Five-Tenths Catalog (1955)	$\mu \geq 0.5'' \text{ yr}^{-1}$
Luyten Half-Second Survey (1979)	$\mu \geq 0.5'' \text{ yr}^{-1}$
Luyten Two-Tenths Catalog (1957)	$\mu \geq 0.2'' \text{ yr}^{-1}$
New Luyten Two-Tenths Catalog (1979)	$\mu \geq 0.2'' \text{ yr}^{-1}$

Kromě měření vlastního pohybu hvězd Luyten také pozoroval hvězdy ve dvou fotometrických pásmech, v červené a modré oblasti (Luyten, 1950). Celkem napozoroval více než 500 000 hvězd. Díky znalosti fotometrie i vlastních pohybů poté Luyten mohl použít ke klasifikaci hvězd zjednodušený diagram vlastních pohybů. Diagram je založen na předpokladu, že hvězdy s větším vlastním pohybem jsou blíže ke Slunci než hvězdy s menším vlastním pohybem. Absolutní hvězdná velikost M_V hvězdy se známou vzdáleností d v parsecích a zdánlivou hvězdnou velikostí V je dána vztahem

$$M_V = 5 - 5 \log d + V. \quad (1.3)$$

Na základě předcházející úvahy pak můžeme zaměnit vzdálenost za vlastní pohyb a zjednodušit na $V + \log \mu$, kde μ je vlastní pohyb. Moderní zjednodušený diagram vlastních pohybů je vykreslen na obrázku 1.3 (Salim & Gould, 2002).



Obrázek 1.3: Zjednodušený diagram vlastních pohybů hvězd z NLTT katalogu s $\delta > -17^\circ$ (Salim & Gould, 2002). V diagramu je patrné seskupování hvězd do hlavní posloupnosti (nahore), podtrpaslíků (střed) a bílých trpaslíků (dole).

Dalším projektem, který objevil velké množství bílých trpaslíků, byl Lowell Proper Motion Survey (Giclas a kol., 1971, 1978). Velké množství bílých trpaslíků bylo také nalezeno při přehlídkách oblohy, které se zaměřovaly na identifikaci objektů s velkými emisemi v modré oblasti (tj. hvězdy, které září více v modré části spektra než v červené).

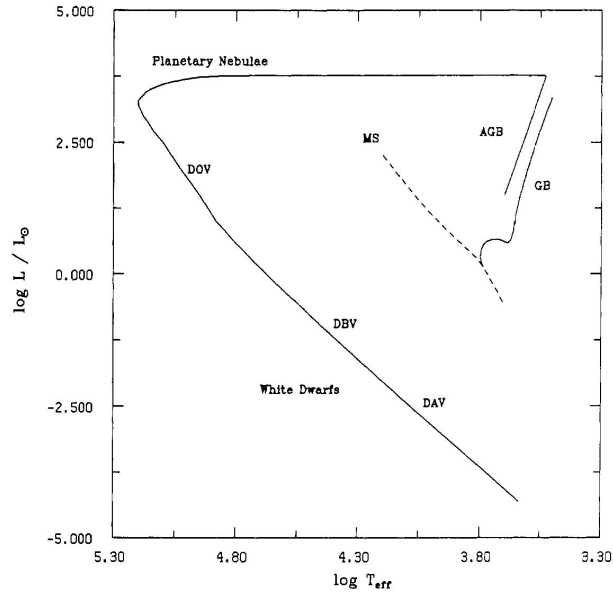
Tabulka 1.2: Přehlídky oblohy zaměřené na objekty s emisemi v modré oblasti.

přehlídka	citace
Palomar-Green Survey	Green a kol. (1986)
Edinburgh-Cape Survey	Kilkenny a kol. (1997)
Montreal-Cambridge-Tololo Survey	Lamontagne a kol. (2000)
Hamburg/ESO Survey	Christlieb a kol. (2001)

Velký počet horkých bílých trpaslíků byl objeven díky družicím International Ultraviolet Explorer (např. Holberg a kol., 2003), Röntgen Satellite (např. Wolff a kol., 1996; Marsh a kol., 1997) a Extreme Ultraviolet Explorer (Vennes a kol., 1996, 1997).

1.3 Vývoj k bílému trpaslíkovi

Do stádia bílého trpaslíka dospěje asi 90% všech hvězd. Tyto hvězdy mají na počátku svého života hmotnost nejvýše $\sim 8 M_{\odot}$, hvězdy s větší počáteční hmotností se vyvinou v neutronovou hvězdu anebo černou díru. Hlavní fáze ve vývoji do stádia typického bílého trpaslíka jsou ukázány na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Hertzsprungův-Russelův diagram zobrazující vývoj typického bílého trpaslíka (Koester & Chanmugam, 1990).

Hvězda zůstává na hlavní posloupnosti (main-sequence), kde dochází ke spalování vodíku v jádře, po dobu přibližně 10 miliard let. Jakmile je vodík v jádře vyčerpán, hvězda hlavní posloupnost opouští a prochází následujícími stádii:

1. Podobr (subgiant): heliové jádro se smrští a dochází k hoření vodíku ve slupkách, které jádro obklopují.
2. Červený obr (red giant): heliové jádro se smršťuje, dokud nedojde k degeneraci materiálu, a v tak zvaném heliovém vzplanutí je v něm prudce zapáleno helium.
3. Horizontální větev (horizontal branch): v této fázi je v jádru spalováno helium a ve slupkách vodík.
4. Asymptotická větev obrů (asymptotic giant branch): v jádru vznikl hořením helia uhlík a kyslík, ve slupkách pokračuje spalování vodíku a také helia.
5. Planetární mlhovina (planetary nebula): odvržením obálek hvězdy tlakem záření degenerovaného jádra vzniká emisní mlhovina.

6. Bílý trpaslík (white dwarf): degenerované jádro červeného obra se po rozepnutí a zprůhlednění planetární mlhoviny objeví jako bílý trpaslík.

Přesné množství látky, které je hvězdou odvrženo při fázi planetární mlhoviny, není známo, ale předpokládá se, že hvězdy o hmotnosti přibližně $8 M_{\odot}$ ztrácejí více než 80% ze své celkové hmoty. K určení vztahu mezi počáteční a koncovou hmotností se často používají mladé hvězdokupy, u kterých se sleduje tzv. bod obratu na hlavní posloupnosti Hertzsprungova–Russelova diagramu (tj. místo, kde se nejhmotnější hvězdy kupy už vyvinuly a přecházejí do oblasti obrů). Jinou možností jak tento vztah určit je použít vizuální dvojhvězdy.

1.4 Vlastnosti bílých trpaslíků

Bílí trpaslíci jsou velmi kompaktní objekty s velmi vysokými hustotami pohybujícími se v rozmezí $10^6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ až $10^9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. V důsledku své kompaktnosti mají malé poloměry $\sim 1\%$ poloměru Slunce, tedy přibližně poloměr Země, a proto mají také velmi nízké svítivosti.

Atmosféra bílého trpaslíka představuje přibližně $\frac{1}{1000}$ poloměru hvězdy a tvoří se v ní spektrální čáry, které pozorujeme. Spektra bílých trpaslíků jsou typická velkým rozšířením spektrálních čar v důsledku silného gravitačního pole a s tím souvisejícího velkého tlaku v atmosféře. Na základě vzhledu spektra lze objekty rozdělit do několika spektrálních typů. Dnes používaná spektrální klasifikace, která vychází z práce Siona a kol. (1983), je uvedena níže. Písmeno D u každého typu značí, že se jedná o degenerovanou hvězdu.

DA hvězdy jsou bohaté na vodík a vykazují pouze Balmerovy čáry.

DO hvězdy jsou bohaté na helium a vykazují čáry He II.

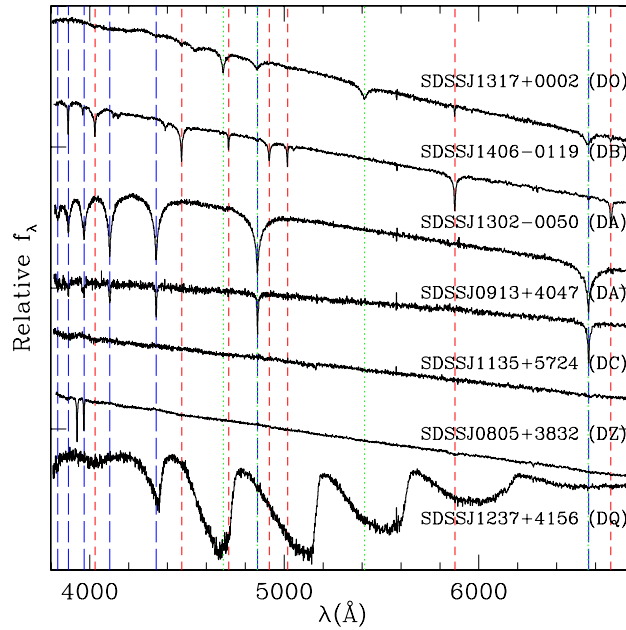
DB hvězdy jsou bohaté na helium a v jejich spektrech se vyskytují pouze čáry He I.

DC hvězdy jsou bohaté na helium a mají spojitě spektrum.

DQ hvězdy jsou bohaté na helium a kdekoli ve spektru vykazují stopy uhlíku, který může být atomární nebo molekulární.

DZ hvězdy jsou bohaté na helium a v jejich spektrech nalezneme čáry kovů, nejčastěji detekovanými kovy jsou například Ca, Na, Mg nebo Fe.

Ve spektrech některých bílých trpaslíků lze nalézt kombinaci výše zmíněných spektrálních rysů, potom je třeba hvězdu označit jedním symbolem, který charakterizuje dominantní spektroskopický typ ve viditelném oboru, ale také symbolem druhým, který charakterizuje druhotné rysy přítomné v jakékoli části spektra. Například bílého trpaslíka vykazujícího ve spektru Balmerovy čáry a čáry Ca II označíme jako typ DAZ. Příklady spekter typických zastupců jednotlivých spektrálních typů jsou ukázány na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Příklady spekter bílých trpaslíků různých spektrálních typů ze Sloan Digital Sky Survey. Modré čáry s dlouhými úsečkami vyznačují pozici Balmerových spektrálních čar, červené čáry s krátkými úsečkami pozici spektrálních čar He I a zelené tečkované čáry pozici spektrálních čar He II. Dvě úzké čáry ve spektru bílého trpaslíka typu DZ (SDSSJ0805+3832) jsou čáry Ca II a hluboké a široké pásy v SDSSJ1237+4156 jsou molekulární pásy uhlíku.

Další druhotné rysy ve spektrech bílých trpaslíků lze charakterizovat následujícími symboly:

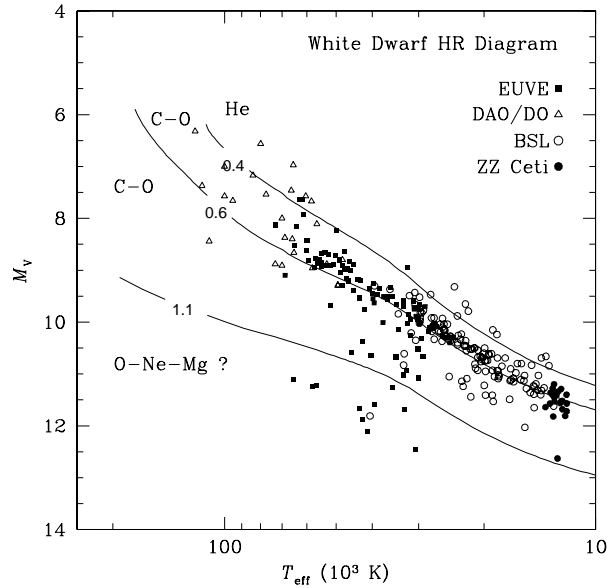
H pro bílé trpaslíky s magnetickým polem.

P pro bílé trpaslíky s magnetickým polem, kteří jeví polarizaci.

V pro proměnné bílé trpaslíky.

Při úplné klasifikaci hvězdy dále může následovat teplotní index, který je definován vztahem $\theta = \frac{50400}{T_{\text{eff}}}$. Například bílý trpaslík s efektivní teplotou 20 000 K vykazující ve spektru Balmerovy čáry bude označen DA2.5.

Teploty bílých trpaslíků se pohybují v rozmezí od $\sim 100\,000$ K do přibližně 3000 K. Postupné chladnutí hvězdy až na dolní teplotní mez trvá asi 10^{10} let. Doba chladnutí bílého trpaslíka je tedy funkcí teploty a závisí také na hmotnosti hvězdy. Na obrázku 1.6 je vyneseno Hertzsprungův-Russellův diagram pro bílé trpaslíky, ve kterém jsou porovnány teploty a absolutní hvězdné velikosti různých skupin bílých trpaslíků s křivkami chladnutí (Wood, 1995) pro různé hmotnosti.

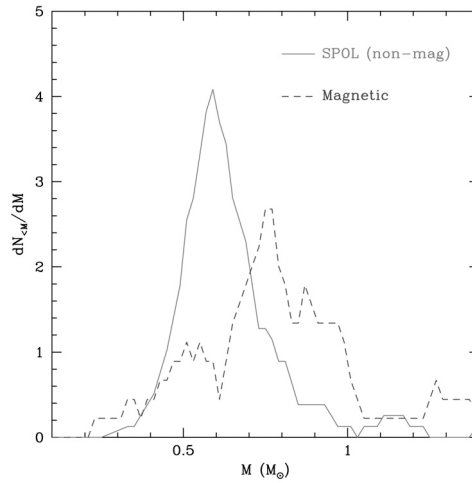


Obrázek 1.6: H-R diagram ukazující různé skupiny bílých trpaslíků v porovnání s různými křivkami chladnutí (Wood, 1995) pro $0.4 M_{\odot}$, $0.6 M_{\odot}$ a $1.1 M_{\odot}$. EUVE jsou bílí trpaslíci s vysokou teplotou, kteří byli objeveni Extreme Ultraviolet Explorerem, DAO/DO jsou bílí trpaslíci s vysokou teplotou, u kterých ve spektru pozorujeme čáry He II, a BSL jsou chladnější bílí trpaslíci pozorovaní Bergeronem a kol. (1992). ZZ Ceti jsou proměnní bílí trpaslíci spektrálního typu DA. Obrázek vykreslil S. Vennes.

Hmotnost většiny bílých trpaslíků se pohybuje v rozmezí od $0.4 M_{\odot}$ do $1.2 M_{\odot}$, průměrná hmotnost je $0.6 M_{\odot}$. Na obrázku 1.7 je vyneseno rozložení hmotností typického vzorku bílých trpaslíků bez magnetického pole (Kawka a kol., 2007) v porovnání s rozložením hmotností vzorku s magnetickým polem. Z grafu je patrné, že hmotnosti bílých trpaslíků s magnetickým polem jsou systematicky vyšší než hmotnosti nemagnetických bílých trpaslíků. To může být způsobeno buď tím, že bílí trpaslíci s magnetickým polem vznikají z hmotnějších hvězd, anebo tím, že magnetické pole, pokud je fosilní, způsobuje menší ztráty hmoty v průběhu fáze planetární mlhoviny. Bílí trpaslíci s hmotností menší než $0.4 M_{\odot}$ jsou ve většině případů složkami těsných dvojhvězd, ve kterých v minulosti pravděpodobně docházelo ke vzájemné interakci mezi oběma tělesy. Stáří Galaxie totiž není dostatečné k tomu, aby se tyto objekty vyvinuly samostatně.

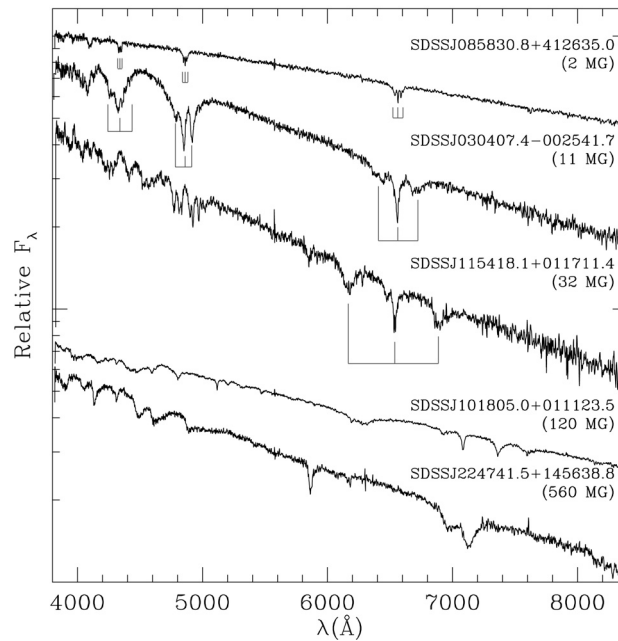
Magnetické pole má přibližně 20% všech bílých trpaslíků v okolí Slunce (Kawka a kol., 2007). Intenzity polí magnetických bílých trpaslíků se pohybují v rozmezí ~ 1 kG až 1000 MG, jsou tedy poměrně silná ve srovnání s globálním magnetickým polem Slunce, jehož intenzita má přibližně hodnotu 1 G.

Předpokládá se, že se magnetičtí bílí trpaslíci vyvinuli z chemicky pekulárních hvězd typu Ap a Bp, jejichž magnetická pole mají intenzitu v rozmezí ~ 1 kG a ~ 10 kG.



Obrázek 1.7: Rozložení hmotností vzorku bílých trpaslíků bez magnetického pole (Kawka a kol., 2007) v porovnání s rozložením hmotností magnetických bílých trpaslíků.

Obyčejné hvězdy typu A a B mají příliš malá magnetická pole ($B < 1$ G). Pokud budeme předpokládat, že se magnetický tok v průběhu koncových fází života hvězdy zachovává, potom rozmezí intenzit magnetického pole 1 - 10 kG pro Ap a Bp hvězdy může odpovídat intenzitě pole $\sim 10 - 100$ MG pro bílé trpaslíky (Kawka & Vennes, 2004). Tím by bylo



Obrázek 1.8: SDSS spektra magnetických bílých trpaslíků, na kterých je patrný efekt rozštěpení spektrálních čar (Kawka & Vennes, 2004).

možné vysvětlit silná pole magnetických bílých trpaslíků. Bílí trpaslíci s intenzitou pole okolo 1 MG se mohli vyvinout z méně hmotných hvězd podobných Slunci.

Bílí trpaslíci rotují poměrně pomalu, jejich rotační rychlosti nepřesahují $40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Projekce rotačních rychlostí ($v \sin i$) nemohou být určeny ze širokých Balmerových čar, lze je však změřit z tvaru jader úzkých čar vodíku. Dalším možným postupem vedoucím ke zjištění rychlosti rotace je použití magnetických bílých trpaslíků, kteří jeví polarizaci. Polarizace bude totiž při rotaci bílého trpaslíka kolísat (s výjimkou případů, kdy má bílý trpaslík sklon buď $i = 0^\circ$ nebo 90°). Jinou možností, jak změřit rychlost rotace, je použití astroseismologie. To je možné jen u speciálních tříd proměnných bílých trpaslíků, jako jsou například hvězdy ZZ Ceti.

1.5 Struktura bílého trpaslíka

V roce 1926 Fermi a Dirac (Fermi, 1926; Dirac, 1926) ukázali, že elektrony podléhají tak zvané Fermiho-Diracově statistice. Platí Pauliho vylučovací princip, který říká, že v daném kvantovém stavu se může nacházet nejvýše jeden fermion, protože žádné dva fermiony nemohou mít stejná všechna kvantová čísla. Ralph Howard Fowler (1926) aplikoval Pauliho vylučovací princip na elektrony v bílém trpaslíkovi a ukázal, že proti síle přitažlivosti bílého trpaslíka působí gradient tlaku degenerovaného elektronového plynu. V případě nerelativistického degenerovaného elektronového plynu je tlak dán vztahem

$$P_e = \frac{h^2}{5m} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho}{\mu_e M_\mu} \right)^{\frac{5}{3}}, \quad (1.4)$$

kde h je Planckova konstanta, m hmotnost elektronu, ρ hustota, μ_e střední molekulová hmotnost elektronu (tj. počet nukleonů na elektron) a M_μ atomová hmotnostní jednotka ($1.66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$). Tlak jako funkce hustoty je tedy polytropa s indexem $n = \frac{3}{2}$, neboť obecná rovnice pro polytropní děj má tvar

$$P = K \rho^{\frac{n+1}{n}}, \quad (1.5)$$

kde K je konstanta. Pro plně relativistický a plně degenerovaný elektronový plyn rovnice přechází na tvar

$$P_e = \frac{ch}{8} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho}{\mu_e M_\mu} \right)^{\frac{4}{3}}, \quad (1.6)$$

kde c je rychlost světla. Tato rovnice odpovídá polytropě o indexu 3.

Vztah hmotnost-poloměr bílého trpaslíka lze získat z předpokladu jednotné hustoty v celé hvězdě, dané vztahem $\rho = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$, kde M je hmotnost hvězdy a R je její poloměr. V rovnovážném stavu musí být tlak v centru hvězdy roven tlaku degenerovaného elektronového plynu. Pokud budeme uvažovat nerelativistický elektronový plyn (tj. $P_e \propto \rho^{\frac{5}{3}}$), dostáváme

$$R \propto M^{-\frac{1}{3}}.$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že poloměr klesá jako funkce rostoucí hmotnosti. Vztah hmotnost-poloměr je ale poněkud složitější. Hustota bílého trpaslíka není v celém jeho objemu stejná a také především u hmotnějších hvězd je třeba uvažovat rovnici pro plně relativistický a plně degenerovaný elektronový plyn ($P_e \propto \rho^{\frac{4}{3}}$).

Aby bylo možné určit strukturu hvězdy, předpokládáme, že se nachází ve stavu hydrostatické rovnováhy

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g = -\rho \frac{GM(r)}{r^2}, \quad (1.7)$$

kde $M(r)$ je hmotnost hvězdy o poloměru r . Požadujeme také rovnici zachování hmoty.

$$\frac{M(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (1.8)$$

Při řešení struktury bílého trpaslíka je nejdříve potřeba zkombinovat rovnici zachování hmoty (1.8) s rovnicí hydrostatické rovnováhy (1.7). Úpravou rovnice hydrostatické rovnováhy, diferencováním obou stran rovnice vzhledem k r a dosazením rovnice zachování hmoty dospějeme k vyjádření

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho} \frac{dP}{dr} \right) = -4\pi G \rho. \quad (1.9)$$

Lane a Emden (Chandrasekhar, 1967) navrhli, že řešení mohou být získána, pokud předpokládáme, že tlak jako funkce hustoty je polytropní funkce (1.5).

Pro vyřešení Laneovy-Emdenovy (1.9) rovnice nejprve zavedeme substituci

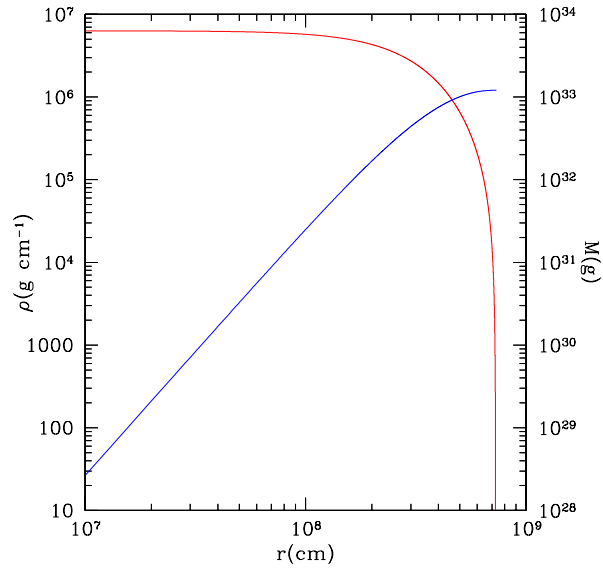
$$\rho = \lambda \Phi^n, \quad (1.10)$$

kde λ je škálovací faktor. Tlak je tedy po dosazení do rovnice 1.5 dán vztahem

$$P = K (\lambda \Phi^n)^{\frac{n+1}{n}} = K \lambda^{\frac{n+1}{n}} \Phi^{n+1},$$

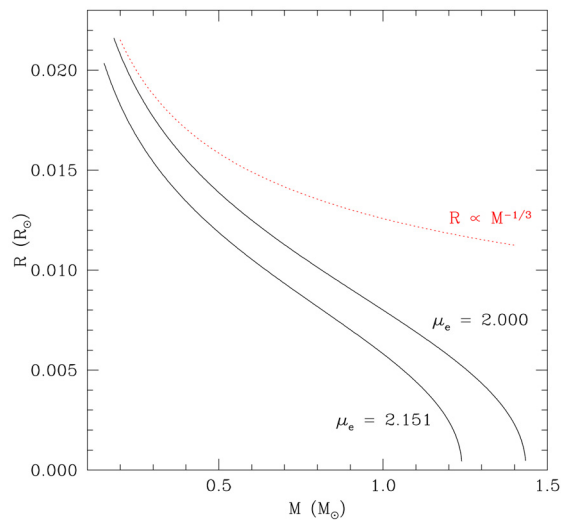
který dosadíme do Laneovy-Emdenovy rovnice. Laneovu-Emdenovu rovnici dále upravujeme, definujeme okrajové podmínky a integrujeme, čímž získáme vztah pro poloměr hvězdy. Hmotnost hvězdy získáme integrováním rovnice zachování hmoty (1.8), do které dosadíme upravenou Laneovu-Emdenovu rovnici. Analytická řešení existují pouze pro $n = 0, 1, 5$, řešení pro $n = \frac{3}{2}, 3$ jsou numerická.

Obrázek 1.9 ukazuje vypočítanou strukturu bílého trpaslíka s hmotností $0.6 M_{\odot}$, kde jsou hustota a hmotnost vyneseny jako funkce poloměru. K výpočtu struktury byla použita Rungeova-Kuttova metoda 4. stupně s hodnotami centrální hustoty $\rho_c = 3.39 \cdot 10^6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a střední molekulové hmotnosti elektronů $\mu_e = 2.0$. Získaný poloměr bílého trpaslíka je $R = 7.28 \cdot 10^8 \text{ cm} = 0.0105 R_{\odot}$.



Obrázek 1.9: Hustota a hmotnost jako funkce poloměru bílého trpaslíka s hmotností $0.6 M_{\odot}$. Výpočet provedl S. Vennes.

Pokud budeme integraci opakovat pro různé centrální hustoty, budeme získávat různé hodnoty hmotností, a můžeme tak vypočítat vztah hmotnost-poloměr pro bílé trpaslíky (Chandrasekhar, 1935). Na obrázku 1.10 je vyneseno vztah hmotnost-poloměr pro bílé trpaslíky, kde jsme uvažovali $\mu = 2.0$ (plně ionizovaný uhlík) a $\mu = 2.151$ (plně ionizované železo). Tyto dva průběhy jsou porovnány s jednoduchým vztahem $R \propto M^{-1/3}$.



Obrázek 1.10: Vztah hmotnost-poloměr pro bílé trpaslíky. Výpočet provedl S. Vennes.

V případě bílého trpaslíka, který je tvořen plně relativistickým a degenerovaným elektronovým plynem, je tlak dán vztahem 1.6. Po dosazení tohoto tlaku do výsledného tvaru řešení proto získáme vztah pro hmotnost hvězdy

$$M = \frac{5.83}{\mu_e^2} M_\odot. \quad (1.11)$$

Proto pokud jsou všechny elektrony relativistické, dostáváme jediné maximum hmotnosti, nazvané Chandrasekharova mez. A protože je většina bílých trpaslíků tvořena především plně ionizovaným heliem, uhlíkem a kyslíkem, je jejich střední molekulová elektronová hmotnost $\mu_e = 2$ a rovnice 1.11 se redukuje na vztah

$$M = 1.4 M_\odot. \quad (1.12)$$

Vztahy hmotnost-poloměr uvažované výše jsou modely nulové teploty, jsou tedy na teplotě nezávislé. Tlak plně degenerovaného elektronového plynu byl nezávislý na jeho teplotě. Pozorujeme povrchové teploty, které ukazují, že bílí trpaslíci ztrácejí energii a ve hvězdě existuje teplotní gradient. Teplota tedy v modelu bílého trpaslíka musí být zahrnuta.

1.6 Chladnutí bílého trpaslíka

Jakmile v bílém trpaslíkovi dohoří jaderné reakce, hvězda pomalu chladne a uvolňuje nashromážděnou energii. Je důležité porozumět tempu, jakým chladnutí probíhá, protože z něj můžeme určit stáří hvězdy.

Ve hvězdách hlavní posloupnosti je střední volná dráha fotonů mnohem delší než střední volná dráha atomů, a proto fotony uvnitř hvězdy přenášejí většinu energie. Bílí trpaslíci jsou naopak velmi hustí a fotony urazí jen malou vzdálenost, než dojde ke srážce a ztratí svou energii. Delší vzdálenosti před srážkou ale urazí degenerované elektrony, jelikož je velká většina stavů s nižší energií již obsazena. Proto je v bílém trpaslíkovi energie přenášena elektrony, což je efektivnější než záření.

V současné době přijímaná teorie chladnutí bílých trpaslíků pochází od Mestela (1952), který ukázal, že bílý trpaslík ztrácí svou tepelnou energii skrze tenkou vrstvu nedegenerované atmosféry.

Jestliže v bílém trpaslíkovi přestane vznikat energie jadernými reakcemi, je jeho další vývoj řízen pouze tempem, jakým je vnitřní energie vyzařována jako teplo do okolí. Vnitřní energie u a entropie s systému jsou svázány vztahem $du = Tds$ (za konstantního objemu a počtu částic). Proto je tempo uvolňování energie ve formě tepla dáno jako

$$\frac{du}{dt} = T \frac{ds}{dt} = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial T}{\partial t} + T \left(\frac{\partial s}{\partial \rho} \right)_T \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (1.13)$$

Měrné teplo při konstantním objemu je $c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V$ a pokud předpokládáme, že nedochází ke gravitačnímu smršťování (tj. $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$), pak se vztah výše zjednoduší na tvar

$$\frac{du}{dt} = c_V \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1.14)$$

V nitru bílého trpaslíka jsou elektrony degenerované, ale ionty degenerované nejsou. Měrné teplo při konstantním objemu plynu c_V , který je tvořen nedegenerovanými ionty a nerelativistickými elektrony, je dána vztahem

$$c_V = \frac{3}{2}n_i k + \frac{\pi^2}{2}n_e k \left(\frac{kT}{E_F} \right), \quad (1.15)$$

kde E_F je Fermiho energie, n_i a n_e číselná hustota iontů a elektronů, k je Boltzmanova konstanta a T je teplota plynu. Elektrony významně nepřispívají k tepelné kapacitě bílého trpaslíka, protože jsou silně degenerované ($E_F \gg kT$). Jejich příspěvek lze tedy zanedbat.

Pokud je svítivost bílého trpaslíka udržována tepelnou energií iontů, lze ji vyjádřit jako

$$L = -\frac{dU}{dt} = -\frac{d}{dt} \iiint c_V dT dV. \quad (1.16)$$

Abychom spočítali vývoj bílého trpaslíka, potřebujeme znát také vztah mezi teplotou nitra a povrchovou teplotou. Nitro bílého trpaslíka je v důsledku velké tepelné vodivosti elektronů izotermální. Změna teploty směrem od nitra k povrchu hvězdy nastává uvnitř tenké vrstvy tvořené nedegenerovaným plynem. Přenos energie skrze tuto vrstvu nastává zářivou difuzí. Opacita plynu κ v této vrstvě je důsledkem volně-volných a vázaně-volných přechodů a lze ji vyjádřit Kramerovým zákonem (např. Rose, 1998)

$$\kappa = \kappa_0 \rho T^{-3.5}, \quad (1.17)$$

kde κ_0 je konstanta závisající na chemickém složení.

K odvození tlaku jako funkce teploty v těchto vrstvách použijeme rovnici hydrostatické rovnováhy (1.7) a rovnici zářivého přenosu energie. Budeme předpokládat, že střední volná dráha fotonu v těchto vrstvách je mnohem menší než charakteristická vzdálenost, na které dochází ke změně teploty, a proto je záření velmi blízké záření černého tělesa. Rovnici zářivého přenosu energie v těchto vrstvách můžeme tedy psát jako

$$\frac{L}{4\pi r^2} = -\frac{4ac}{3\rho\kappa} T^3 \frac{dT}{dr}, \quad (1.18)$$

kde $a = 7.564 \cdot 10^{-15} \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{K}^{-4}$. Tuto rovnici můžeme dosadit do rovnice hydrostatické rovnováhy (1.7) a využít Kramerova zákona pro opacitu (1.17). Blízko povrchu bílého trpaslíka je plyn nedegenerovaný a tlak lze aproximovat tlakem ideálního plynu. Předpokládáme zde, že plyn je plně ionizovaný a že energie coulombovské interakce je mnohem menší než energie kinetická.

$$P_i = \frac{\rho k T}{\mu m_p}, \quad (1.19)$$

kde m_p je hmotnost protonu a μ je střední molekulová hmotnost plynu (tj. počet nukleonů na částici). Užitím tohoto vztahu a integrací upravené rovnice hydrostatické rovnováhy

s okrajovou podmínkou $T = 0$ pro $P = 0$ za předpokladu, že fotosférická teplota je nízká ve srovnání s teplotou nitra bílého trpaslíka, dospějeme ke vztahu pro hustotu ve tvaru

$$\rho = K_1 \left(\frac{M}{L} \right)^{\frac{1}{2}} T^{3.25}, \quad (1.20)$$

kde

$$K_1 = \left(\frac{2}{8.5} \frac{4ac}{3} \frac{4\pi G}{\kappa_0} \frac{\mu m_p}{k} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1.21)$$

Při odvozování této rovnice jsme použili předpoklad nedegenerovaného plynu, takže rovnice přestává platit při hustotách, při kterých začíná být elektronová degenerace podstatná. Na hranici mezi izotermálním jádrem a vnější nedegenerovanou obálkou musí být tlak nedegenerovaného elektronového plynu roven tlaku plně degenerovaného elektronového plynu (1.4) o teplotě izotermálního jádra T_c , z čehož vyplývá vztah pro hustotu plynu na hranici jádra hvězdy

$$\rho_c = K_2 T_c^{\frac{3}{2}}, \quad (1.22)$$

kde

$$K_2 = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{5mk}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \mu_e M_\mu. \quad (1.23)$$

Pokud předpokládáme, že rovnice 1.20 platí na hranici jádra hvězdy, tj. $\rho = \rho_c$ a $T = T_c$, můžeme vyjádřit svítivost jako

$$L = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 M T_c^{3.5}. \quad (1.24)$$

Volná tepelná energie izotermálního bílého trpaslíka o teplotě T_c je uložena především v nedegenerovaných iontech a je dána vztahem

$$U = \int c_V T dV = \int \frac{c_V}{\rho} T dM \simeq \frac{\bar{c}_V}{\bar{\rho}} T_c M,$$

kde \bar{c}_V a $\bar{\rho}$ jsou střední hodnoty měrného tepla při konstantním objemu c_V a hustoty ρ . Rychlost, jakou bílý trpaslík ztrácí tepelnou energii, je dána jeho svítivostí (1.16). Porovnáním této svítivosti, do které dosadíme výraz pro volnou tepelnou energii, a svítivosti dané vztahem 1.24 dostáváme

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{\bar{c}_V}{\bar{\rho}} T_c \right) = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 T_c^{3.5}.$$

Pokud budeme předpokládat, že střední měrné teplo při konstantním objemu \bar{c}_V je na čase nezávislé, potom integrál rovnice výše, kde teplota T nabývá počáteční hodnoty T_0 v čase t_0 , je

$$\frac{2\bar{c}_V}{5\bar{\rho}} \left(\frac{1}{T^{2.5}} - \frac{1}{T_0^{2.5}} \right) = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 (t - t_0) = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^2 \tau. \quad (1.25)$$

Předpokládáme $T \ll T_0$ a dosazením z rovnice 1.24 získáme vztah

$$\tau = \frac{2\bar{c}_V T_c M}{5\bar{\rho} L}. \quad (1.26)$$

Pokud opět dosadíme z rovnice 1.24, můžeme vyloučit T_c a získat vztah

$$\tau = \frac{2\bar{c}_V}{5\bar{\rho}} \left(\frac{K_2}{K_1} \right)^{\frac{4}{7}} \left(\frac{M}{L} \right)^{\frac{5}{7}}. \quad (1.27)$$

Veličina τ je tak zvaná doba chladnutí, tedy doba, za kterou svítivost bílého trpaslíka klesne z hodnoty L_0 na L , přičemž L_0 jsme považovali ve srovnání s L za velmi velké při splnění předpokladu $T \ll T_0$. Úpravou rovnice 1.27 a provedením odpovídajících dosazení za střední hustotu, střední měrné teplo, opacitu a za konstanty dospějeme k vyjádření svítivosti jako funkce doby chladnutí

$$L \approx 8.4 \cdot 10^{-4} L_\odot \frac{M}{M_\odot} \tau_9^{-\frac{7}{5}}, \quad (1.28)$$

kde τ_9 je doba chladnutí v jednotkách 10^9 let.

Tato jednoduchá mocinná závislost ukazuje základní vlastnosti procesu chladnutí bílého trpaslíka a je dobrou aproximací podrobnějších modelů chladnutí. Model ale zahrnuje pouze uvolňování tepelné energie a při chladnutí bílého trpaslíka existují ještě další zdroje energie, které je třeba započítat. Jsou to především:

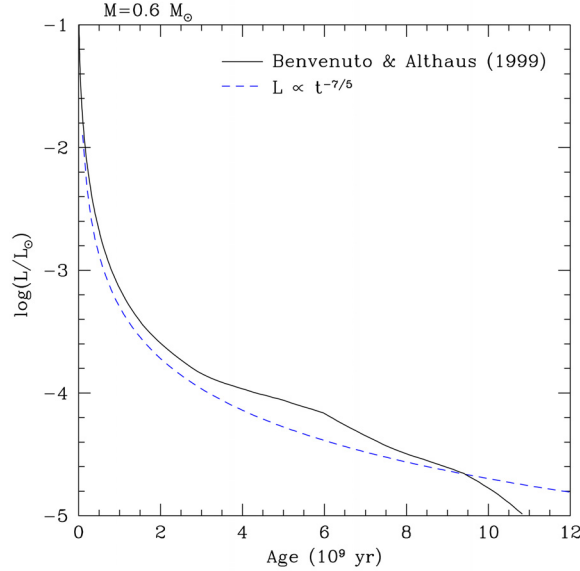
Gravitační energie V našem modelu jsme předpokládali, že nedochází ke gravitačnímu smršťování, a proto se nevyvíjí hydrostatická struktura. Bílý trpaslík ale ztrácí tepelnou energii a ve skutečnosti se smršťuje, a proto k uvolněné energii přispívá také energie gravitační.

Jaderná energie Doba chladnutí může být také ovlivněna zbytkovým hořením vodíku na povrchu bílého trpaslíka. Když ve hvězdě dohoří jaderné reakce, dojde k rychlému zhroucení v bílého trpaslíka. V důsledku velké gravitace nastane difuze prvků, těžší prvky tedy budou klesat k centru a lehčí stoupat k povrchu hvězdy. To může vést k nahromadění uhlíku, dusíku a kyslíku a opětovnému zažehnutí CNO cyklu. Tento mechanismus by mohl vysvětlit existenci bílých trpaslíků, kteří mají v atmosférách málo vodíku.

U méně hmotných hvězd nedochází k heliovému vzplanutí, a proto jim na konci života zůstávají atmosféry s větším množstvím vodíku. V takovéto atmosféře může dojít k opětovnému hoření vodíku v proton-protonovém řetězci a tím k prodloužení doby chladnutí bílého trpaslíka.

Krystalizace V bílém trpaslíkovi je množství tepelné energie regulováno ionty. Dokud je bílý trpaslík velmi horký, lze ionty považovat za ideální plyn, chladnutím ale bílý trpaslík začíná směrem z nitra k povrchu krystalizovat. V průběhu krystalizace ionty mění fázi, a tedy uvolňují skupenské teplo, což zpomalí chladnutí bílého trpaslíka. Tento efekt

se projeví jako hrbol na křivce chladnutí. Na obrázku 1.11 je porovnána křivka chladnutí odvozená výše (1.27) s modelovou křivkou chladnutí, která zachycuje krystalizaci a některé další efekty (Benvenuto & Althaus, 1999). Jakmile nitro bílého trpaslíka zkrystalizuje a teplota začíná opět klesat, krystalická struktura chladnutí naopak urychlí. Toho si lze všimnout na obrázku 1.11 jako rychlého poklesu na křivce chladnutí.



Obrázek 1.11: Teoretické křivky chladnutí spočítané pro bílého trpaslíka o hmotnosti $0.6 M_{\odot}$. Plnou čarou je vynesena modelová křivka chladnutí (Benvenuto & Althaus, 1999), čárkovaně křivka chladnutí daná rovnicí 1.27.

Vývoj bílého trpaslíka není určen jen zdroji volné energie, ale také procesy přenosu energie k povrchu hvězdy. Přestože je nedegenerovaná obálka bílého trpaslíka velmi tenká a představuje jen velmi nepatrnou část celkové hmoty hvězdy, určuje právě ona průběh chladnutí, protože je zde přenos energie nejpomalejší.

V horkých počátečních stádiích vývoje bílého trpaslíka dominují ztrátám energie ztráty způsobené neutriny. Když se bílý trpaslík po ukončení pobytu na asymptotické větvi obrů začíná smršťovat, svítivost způsobená fotony začíná klesat, ale svítivost způsobená neutriny nikoli, a proto se stává dominantní. Svítivost způsobená neutriny je řízena centrální teplotou bílého trpaslíka.

K přenosu energie v tenké nedegenerované obálce bílého trpaslíka dochází buď zářením a/nebo prouděním v případě chladnějších bílých trpaslíků. Teplota, při níž se vyvine konvektivní zóna, závisí na chemickém složení této tenké atmosféry (např. u bílých trpaslíků typu DA dochází k proudění při $\sim 12\,000$ K). Právě atmosféra je tou částí bílého trpaslíka, kterou pozorujeme.

1.7 Model atmosféry

Tloušťka atmosféry bílého trpaslíka nepřesahuje $\frac{1}{1000}$ poloměru hvězdy ($\frac{h_{\text{atm}}}{R_{\text{hvězdy}}} < 10^{-3}$). Atmosféru můžeme modelovat řešením sady rovnic, které nám poskytnou fyzikální popis pozorovatelné oblasti hvězdy. Vzhledem k malé tloušťce atmosféry v porovnání s poloměrem bílého trpaslíka můžeme předpokládat planparalelní geometrii, tedy geometrii jednorozměrnou parametrizovanou výškou z , a atmosféru považujeme za horizontálně homogenní.

Tok záření emitovaný povrchem hvězdy je Eddingtonův tok a závisí na frekvenci, $H_\nu(z = z_0)$, kde z_0 značí povrch hvězdy. Celkový tok záření emitovaný hvězdou získáme integrací přes frekvence

$$\mathcal{F}_{\text{celkový}} = 4\pi H_{\text{celkový}} = 4\pi \int_0^\infty H_\nu d\nu = \sigma_R T_{\text{eff}}^4, \quad (1.29)$$

kde $\sigma_R = 5.67 \cdot 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefanova-Boltzmanova konstanta a T_{eff} je efektivní teplota, která je touto rovnicí definována.

Sadu nelineárních rovnic, jejichž řešením můžeme modelovat atmosféru bílého trpaslíka, tvoří následující rovnice:

- Rovnice přenosu záření.
- Rovnice zářivé rovnováhy, která vyjadřuje zachování energie uvnitř atmosféry.
- Rovnice hydrostatické rovnováhy, která udává, kdy změna tlaku od místa k místu právě vyrovnává váhu vrstev nad oním místem.
- Stavová rovnice popisující obsazení energetických hladin.
- Rovnice zachování počtu částic a náboje, která zajišťuje zachování celkového počtu částic a nulovost celkového elektrického náboje.

Problém řešíme numericky, a proto potřebujeme nejprve zvolit nezávislou proměnnou. V tomto případě je lepší použít sloupcovou (Lagrangeovu) hmotu m , tedy hmotu sloupce materiálu nad 1 cm^2 v daném místě atmosféry, spíše než optickou hloubku. Optická hloubka je definována tím způsobem, že z intenzity I_0 v optické hloubce τ pronikne ven intenzita $I = I_0 e^{-\tau}$. Proto optická hloubka roste od povrchu směrem do centra hvězdy. Sloupcová hmotnost je nejvhodnější, protože zjednodušuje rovnici hydrostatické rovnováhy. Optická hloubka je s tloušťkou dz v hloubce z svázána vztahem

$$d\tau = -\chi dz,$$

kde χ je opacita. Pro zvolenou proměnnou m platí

$$dm = -\rho dz,$$

kde ρ je hustota atmosféry. Sloučením těchto dvou rovnic získáme vztah mezi hmotností a optickou tloušťkou.

Protože řešíme problém numericky, musíme použít nespojitě proměnné. Potřebujeme proto atmosféru rozdělit na jednotlivé slupky a spektrum na nespojitě frekvence.

Nyní můžeme definovat rovnice, které budeme používat. Přenos energie je v bílém trpaslíkovi realizován především zářením

$$\frac{\partial H_\nu}{\partial z} = \chi_\nu(S_\nu - J_\nu), \quad (1.30)$$

kde J_ν je střední intenzita záření a S_ν zdrojová funkce definovaná vztahem

$$S_\nu = \frac{\eta_\nu}{\chi_\nu},$$

tedy jako poměr emisního koeficientu a koeficientu absorpce. Rovnice popisuje přenos záření ve vrstvě atmosféry o tloušťce dz se započtením emise a absorpce na jakékoli dané frekvenci. Integrovaní rovnice přenosu záření přes všechny frekvence vede k rovnici zářivé rovnováhy. Pro počítání toku atmosférou je zapotřebí definovat okrajovou podmínku. Celkový tok z povrchu hvězdy proto musí být

$$\mathcal{F} = 4\pi H = 4\pi \int_0^\infty H_\nu d\nu = \sigma_R T_{\text{eff}}^4. \quad (1.31)$$

Požadujeme také, aby byla atmosféra ve stavu hydrostatické rovnováhy.

$$\frac{dP}{dm} = -g. \quad (1.32)$$

Můžeme předpokládat, že v atmosféře bílého trpaslíka platí vztah pro ideální plyn

$$P = nkT, \quad (1.33)$$

kde $n = \frac{N}{V}$ je hustota počtu částic.

Předpokládáme také, že atmosféra je v tepelné rovnováze, ve které je stupeň ionizace dán Sahovou rovnicí

$$\frac{n_i}{n_{i+1}} = \frac{u_i}{u_{i+1}} N_e \Phi(T), \quad (1.34)$$

kde n_i a n_{i+1} jsou číselné hustoty neutrálních a ionizovaných atomů, u je partiční funkce a $\Phi(T)$ je

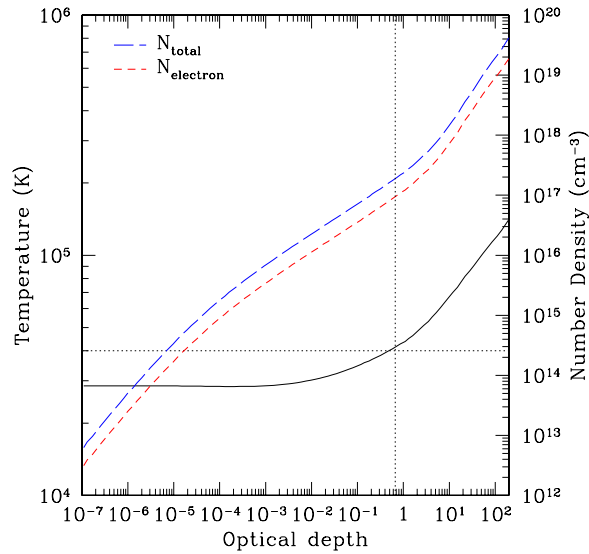
$$\Phi(T) = \left(\frac{h^2}{2\pi m k T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{\chi}{kT}}, \quad (1.35)$$

kde m je hmotnost elektronu a χ je ionizační potenciál. Obsazení energetických stavů je popsáno Boltzmannovou rovnicí. Poměr atomů v excitační hladině j k celkovému počtu atomů bude

$$\frac{N_j}{N} = \frac{g_j e^{-\frac{\epsilon_j}{kT}}}{u_j}, \quad (1.36)$$

kde u_j je partiční funkce ($u_j = \sum_j g_j e^{\frac{\epsilon_j}{kT}}$), g_j statistická váha a ϵ_j je excitační energie. Využitím Sahovy a Boltzmanovy rovnice lze získat poměr atomů v daném ionizačním nebo excitačním stavu.

Řešením sady nelineárních rovnic diskutovaných výše lze dospět k modelu atmosféry bílého trpaslíka. Příklad takového modelu je vyneseno na obrázku 1.12. Jedná se o závislost teploty a hustoty počtu částic na optické hloubce pro bílého trpaslíka o $T_{\text{eff}} = 40\,000$ K a $\log g = 8.0$. Teplota pro $\tau = \frac{2}{3}$ je definována jako teplota efektivní.



Obrázek 1.12: Model atmosféry bílého trpaslíka o $T_{\text{eff}} = 40\,000$ K a $\log g = 8.0$. Výpočet provedl s použitím modelů, které jsou použity v této práci, S. Vennes.

Při analýze spekter budou použity upravené modely atmosfér z práce Kawka (2004) a Kawka & Vennes (2006). Jedná se o síť čistě vodíkových LTE planparalelních modelů atmosfér o teplotách $T_{\text{eff}} = 4\,500, 5\,000$ K pro $\log g = 7.0, 8.0$ a 9.0 , $T_{\text{eff}} = 5\,500$ až $7\,000$ K (s krokem 500 K), $T_{\text{eff}} = 7\,000$ až $16\,000$ K (s krokem 1000 K), $T_{\text{eff}} = 18\,000$ až $32\,000$ K (s krokem 2000 K) a $T_{\text{eff}} = 36\,000$ až $100\,000$ K (s krokem $4\,000$ K) pro $\log g = 7.0$ až 9.5 (s krokem 0.25). Přenos energie konvekcí v chladnějších atmosférách je zahrnut použitím ‘mixing-length’ formalismu, který byl popsán Mihalasem (1978), a stabilita atomu je testována Schwarzschildovým kritériem stability. Byla zde použita ML2 parametrizace konvektivního toku (Fontaine a kol., 1981) a položeno $\alpha = 0.6$ (Bergeron a kol., 1992). Rovnice konvektivního přenosu energie byla plně linearizována při splnění podmínky $\mathcal{F}_{\text{celkový}} = \sigma_R T_{\text{eff}}^4 = \mathcal{F}_{\text{konv}} + \mathcal{F}_{\text{zář}}$, přičemž $\mathcal{F}_{\text{konv}}$ je konvektivní tok a $\mathcal{F}_{\text{zář}}$ tok zářivý.

1.7.1 Profily spektrálních čar

Opacitu plynu v atmosféře bílého trpaslíka určuje několik absorpčních procesů, které musíme zahrnout do řešení rovnice zářivého přenosu energie. Protože je většina bílých trpaslíků bohatá na vodík, budeme uvažovat absorpční procesy, ke kterým dochází ve vodíkovém plynu.

- Absorpce neutrálním vodíkem mezi vázanými hladinami (vázaně-vázaný přechod), tedy mezi hlavními kvantovými čísly $n = l$ (nižší hladina) a $n = u$ (vyšší hladina), přičemž energie hladiny je dána vztahem $E_n = \frac{13.595eV}{n^2}$.
- Absorpce neutrálním vodíkem mezi vázanou hladinou a kontinuem (vázaně-volný přechod) a mezi dvěma volnými stavy (volně-volný přechod).
- Vázaně-volná a volně-volná absorpce záporným vodíkovým iontem.
- Rozptyl světla na neutrálním vodíku (Rayleighův rozptyl) a na volných elektronech (Thomsonův rozptyl).

V důsledku zářivého útlumu mají hladiny energie v atomech konečnou dobu života, a tedy také konečnou energetickou šířku $\Gamma_{\text{přir}} = \frac{\Delta E_l}{h}$ (přirozená šířka čáry). Další mechanismy přispívající k rozšíření spektrálních čar:

Teplotní rozšíření Atomy vysílající spektrální čáru jsou v tepelném pohybu tím rychlejším, čím je teplota vyšší. Vyslané čáry od různých atomů budou proto navzájem posunuty podle směru a rychlosti atomů.

Tlakové rozšíření Vzniká v hustém prostředí, ve kterém dochází často ke srážkám mezi atomy pohlcujícími světlo a dalšími částicemi. Srážky způsobují změny hladin energie v atomech a tím zvyšují jejich neostrost.

Rozšíření rotací Jestliže hvězda rotuje, posouvá se v důsledku Dopplerova posuvu každá spektrální čára ze vzdalujícího se okraje k červené barvě a z přibližujícího se okraje k modré. Protože u hvězd pozorujeme současně záření z celého disku, projeví se rotace rozšířením čar v jejich spektru.

V atmosférách bílých trpaslíků dominuje kvůli obrovské hustotě prostředí tlakové rozšíření nad rozšířením teplotním. Míra neostrosti hladiny energie závisí na interagujících částicích a na vzdálenosti R mezi absorbátorem a částicí způsobující změny hladin energie. Vyšší hladina bude blízkými částicemi mnohem více ovlivněna, a proto bude méně ostrá. Změna energie způsobená interakcemi mezi částicemi může být vyjádřena jako

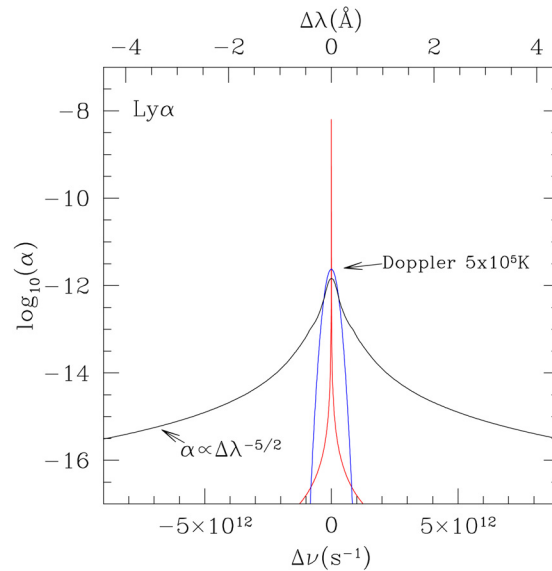
$$\frac{\Delta E}{h} = \Delta\nu = \frac{C_n}{R^n}, \quad (1.37)$$

kde C_n je konstanta interakce a R^n popisuje typ potenciálu, kterému podléhají částice v průběhu interakce. Příklady interakcí mezi částicemi jsou:

- $n = 2$ Lineární Starkův jev pro vodíkové atomy, jejichž hladiny energie jsou pozměněny protony a elektrony.

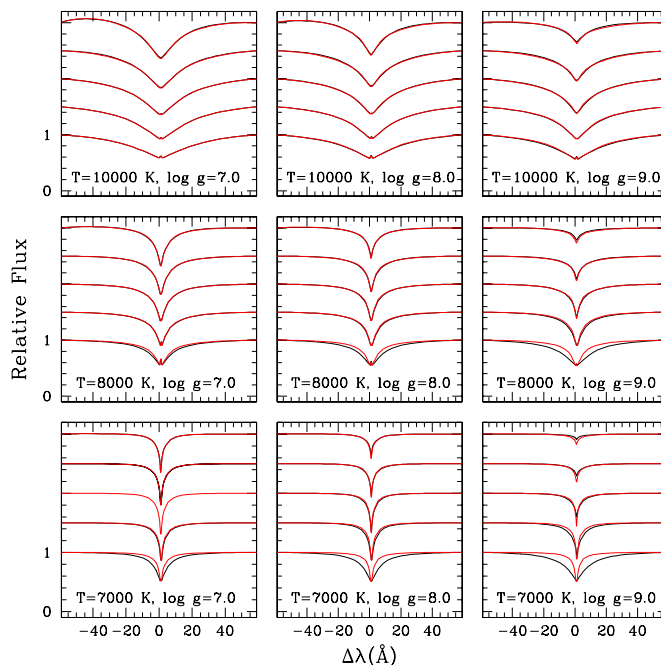
- $n = 3$ Rezonanční rozšíření, tedy dipól-dipólová interakce pokud jsou neutrální částice stejného druhu.
- $n = 4$ Kvadratický Starkův jev pro většinu atomů, jejichž hladiny energie jsou pozměněny elektrony.
- $n = 6$ Van der Waalsovo rozšíření, tedy dipól-dipólová interakce v případě různého druhu neutrálních částic.

Lineární Starkův jev u bílých trpaslíků ovlivňuje vodíkové čáry a je dominantní u bílých trpaslíků s $T_{\text{eff}} \gtrsim 10\,000$ K, protože je zde vodík téměř ionizován. Na obrázku 1.13 je ukázáno srovnání lineárního Starkova rozšíření s Dopplerovým rozšířením a přirozeným rozšířením čáry L_α pro bílého trpaslíka o efektivné teplotě $50\,000$ K. Z obrázku je patrné, že lineární Starkův jev je dominantním druhem rozšíření. Časticová hustota elektronů a protonů v atmosféře, která může vést k takovémuto rozšíření, je $n_e = n_p = 10^7 \text{ cm}^{-3}$.



Obrázek 1.13: Lineární Starkovo rozšíření ve srovnání s teplotním rozšířením a přirozeným rozšířením L_α pro $T_{\text{eff}} = 50\,000$ K. Výpočet provedl S. Vennes.

V chladnějších bílých trpaslících ($T_{\text{eff}} \lesssim 10\,000$ K), ve kterých je vodík převážně neutrální, musíme uvažovat rezonanční rozšíření spektrálních čar (Ali& Griem, 1965, 1966). V atmosférách, které obsahují také jiné druhy atomů, například helium, nabývá na důležitosti i van der Waalsovo rozšíření. Na obrázku 1.14 jsou vyneseny profily Balmerových čar pro různé hodnoty teploty a povrchové gravitace. Jsou zde porovnány profily spektrálních čar, které zahrnují rezonanční rozšíření, s těmi, u kterých rezonanční rozšíření nebylo uvažováno. Rezonanční rozšíření začíná být nápadné při nižších teplotách ($T_{\text{eff}} \leq 8000$ K), při kterých jsou neutrální vodíkové atomy četnější a mnohem častěji interagují se zářením.



Obrázek 1.14: Profily čar H_α až H_ϵ (zespodu směrem nahoru) pro dané hodnoty teploty a povrchové gravitace (Kawka, 2004). Do profilů čar vynesných černě bylo na rozdíl od červených profilů zahrnuto rezonanční rozšíření.

Postup při analýze profilů spektrálních čar je podrobněji popsán v Kawka & Vennes (2006). Pravděpodobnosti obsazení energetických hladin vodíkových atomů v hustých atmosférách bílých trpaslíků jsou počítány za použití formalismu Hummera & Mihalase (1988) a jeho pozdější úpravy provedené Hubeným a kol. (1994). Takto spočítané pravděpodobnosti obsazení hladin jsou poté zahrnuty do výpočtu opacit spektrálních čar a kontinua. Profily Balmerových čar jsou počítány pomocí tabulek profilů spektrálních čar HI rozšířených Starkovým jevem (Lemke, 1997), konvolvovaných s normalizovanými rezonančními profily čar. Profily čar těžších prvků jsou modelovány pomocí Voigtova profilu (Gray, 1992), který zahrnuje parametry Starkova a van der Waalsova rozšíření.

1.8 Pulzující bílí trpaslíci

Bílí trpaslíci byli v minulosti používáni jako standardní hvězdy, protože podle tehdejších pozorování byla jejich jasnost s časem konstantní. V roce 1968 si ale Arlo U. Landolt (Landolt, 1968) všiml, že jedna z těchto standardních hvězd, HL Tau 76, mění svou jasnost s periodou 12.5 minuty. Druhým bílým trpaslíkem, u něhož byla zpozorována proměnnost v jasnosti, a to s periodou 212.864 s, byla ZZ Ceti (Lasker & Hesser, 1971), která se stala

prototypem pro proměnné bílé trpaslíky spektrálního typu DA. Dnes lze shrnout, že bílí trpaslíci s teplotou okolo 12 000 K jeví proměnnost v jasnosti ($\lesssim 0.2$ mag) s periodami v rozmezí ~ 100 až ~ 1000 s.

Arthur Eddington v roce 1918 navrhl, že oscilace hvězd mohou být řízeny tzv. opacitním mechanismem. Vrstva hvězdy se při stlačení stává méně průhlednou, proto fotony nemohou z vrstvy uniknout a ve vrstvě vzrůstá teplota a tlak. Plyn pod takto velkým tlakem expanduje, stává se průhlednějším a fotony nyní mohou z vrstvy uniknout, proto dochází k poklesu teploty a tlaku ve vrstvě. Vrstva plynu se poté působením gravitace opět smrští. Pozorované změny v jasnosti tedy podle tohoto modelu odpovídají změnám teploty.

Ve většině hvězd opacita vzrůstá se vzrůstající hustotou a s klesající teplotou (1.17). Pokud je hvězda stlačena, teplota i hustota vzrůstají. Protože opacita závisí strměji na teplotě ($\kappa \propto T^{-3.5}$) než na hustotě ($\kappa \propto \rho$), opacita při stlačení klesá. To může utlumit jakékoli oscilace, a tedy vysvětlit, proč je většina hvězd neproměnná.

Opacitní mechanismus může pracovat pouze ve hvězdách, které mají zóny částečné ionizace. Ve vrstvách hvězdy, ve kterých je plyn částečně ionizován, je totiž část práce vykonané při stlačování plynu spotřebována na další ionizaci plynu namísto na vzrůst jeho teploty. S menším přírůstkem teploty může hustota v Kramerově zákoně (1.17) pro opacitu převážit, a opacita tak bude vzrůstat. Podobně, když se plyn rozpíná, teplota klesá pomaleji, protože ionty rekombinují s elektrony a tím uvolňují energii. Opět převáží hustotní člen a opacita v průběhu rozpínání plynu klesá. Tento proces se nazývá κ mechanismus.

Winget a kol. (1982a) ukázali, že u proměnných bílých trpaslíků typu DA je za změny jasnosti odpovědná zóna částečně ionizovaného vodíku. Předpověděli, že teplejší bílí trpaslíci spektrálního typu DB by mohli také pulzovat, a to v důsledku přítomnosti zóny částečně ionizovaného helia. Ještě téhož roku Winget a kol. (1982b) oznámili nalezení pulzujícího bílého trpaslíka spektrálního typu DB, GD 358. Po tomto objevu bylo nalezeno ještě několik zástupců této skupiny a také velmi malý počet proměnných bílých trpaslíků spektrálního typu DO (známé také jako hvězdy typu PG1159). Vlastnosti těchto tří skupin pulzujících bílých trpaslíků jsou shrnuty v tabulce 1.3.

Tabulka 1.3: Pulzující bílí trpaslíci.

skupina	teplota [K]	řídící mechanismus
hvězdy typu ZZ Ceti (DAV)	$\sim 10\,500 - 13\,000$	zóna částečně ionizovaného vodíku
DBV	$\sim 22\,000 - 27\,000$	zóna částečně ionizovaného helia
hvězdy typu PG1159 (DOV)	$\sim 80\,000 - 140\,000$	

U pulzujících bílých trpaslíků pozorujeme neradiální oscilace, které můžeme rozdělit do tří skupin:

p-módy Oscilace jsou způsobeny změnami tlaku, mohou být radiální i neradiální.

g-módy Oscilace jsou vytvářeny změnami gravitace a mohou být jen neradiální.

f-módy Přechod mezi p-módy a g-módy, jeví pouze neradiální oscilace.

Sférická symetrie bílých trpaslíků umožňuje použít k popisu pulzací sférické harmonické funkce. Každý mód lze popsat třemi celými čísly k , l a m .

Více o pulzacích lze nalézt např. v Ostlie & Carroll (1996).

1.9 Bílí trpaslíci jako složky dvojhvězd

Přibližně 25% všech bílých trpaslíků v okolí Slunce je složkou vícenásobného hvězdného systému (Holberg a kol., 2002). Bílé trpaslíky nacházíme ve vizuálních dvojhvězdách, těsných dvojhvězdách i ve skupině kataklyzmických proměnných hvězd.

Vizuální dvojhvězdy je možno použít k určení vztahu mezi počáteční a koncovou hmotností. Z pozorování těchto objektů lze také stanovit hmotnost bílého trpaslíka, a to pomocí 3. Keplerova zákona, poloměr bílého trpaslíka použitím kombinace spektrálního modelu a známé vzdálenosti a ze spektrálního modelu zjistíme rovněž efektivní teplotu hvězdy. Do této skupiny dvojhvězd patří například Sirius A a B nebo Procyon A a B.

Pokud jsou složky dvojhvězdy dostatečně blízko, může po opuštění hlavní posloupnosti hmotnější hvězda vyplnit Rocheův lalok a dojde k přenosu hmoty mezi hvězdami. Přenos hmoty může být dynamicky nestabilní a vznikne společná atmosféra obou hvězd. V průběhu dalšího vývoje hvězdy o společnou atmosféru přijdou kvůli ztrátě momentu hybnosti do atmosféry hvězd způsobené třením. Těsné dvojhvězdy nám pomáhají lépe pochopit vývoj dvojhvězd před dotykem a v některých případech můžeme z jejich pozorování také určit vlastnosti obou složek.

Do skupiny kataklyzmických proměnných patří klasické novy, trpasličí novy, novám podobné hvězdy, magnetické kataklyzmické proměnné a supernovy typu Ia. Magnetické kataklyzmické proměnné můžeme dále rozlišit na AM Her hvězdy a DQ Her hvězdy. AM Her hvězdy mají silná magnetická pole ($B \sim 10^7 - 10^8$ G), jsou silně polarizované a nemají akreční disk, zatímco DQ Her hvězdy mají slabší magnetická pole ($B < 10^7$ G), delší oběžnou dobu a akreční disk se zde vytváří. Exploze supernovy typu Ia je způsobena uvolněním energie nahromaděné při gravitačním kolapsu bílého trpaslíka. Spektra supernov typu Ia jsou bez vodíku, vykazují ale silné čáry Si II. Supernovy typu Ia se vyskytují ve všech typech galaxií, jejich světelné křivky jsou si navzájem podobné a rychlosti exploze se pohybují okolo $11\,000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Byly navrženy dva možné procesy vedoucí ke vzplanutí tohoto typu supernovy. Složkami dvojhvězdy mohou být hvězda hlavní posloupnosti a bílý trpaslík s hmotností blízkou Chandrasekharově mezi. Bílý trpaslík zvětšuje svou hmotnost přenosem hmoty z hvězdy hlavní posloupnosti, dokud Chandrasekharovu mez nepřekročí a nevzplane jako supernova. Druhou možností je dvojhvězda složená ze dvou bílých trpaslíků, jejichž celková společná hmotnost přesahuje Chandrasekharovu mez. Pokud jsou bílí trpaslíci dostatečně blízko, budou vysílat gravitační vlny a díky tomuto úbytku energie nakonec splynou. Supernovy typu Ia jsou používány k určování vzdáleností, protože jsou velmi jasné a mají malou disperzi ($\sigma < 0.3$ mag) mezi maximy jasnosti.

1.10 Bílí trpaslíci v Galaxii

Z pozorování bílých trpaslíků je možno určit vzdálenost a stáří hvězdokup, barvy a jasnosti bílých trpaslíků jsou totiž nezávislé na metalicitě. Spodní hranici stáří hvězdokupy lze určit z měření vlastností nejméně jasných bílých trpaslíků. Pokud pozorujeme populaci bílých trpaslíků, můžeme k určení stáří hvězdokupy použít luminozitní funkci.

Schmidt v roce 1959 (Schmidt, 1959) navrhl, že by bílí trpaslíci mohli být použiti ke stanovení stáří galaktického disku. Až v nedávné době ale byli ve větším množství pozorováni velmi staří, chladní, a tedy málo jasní bílí trpaslíci ($T_{\text{eff}} \sim 4000$ K: doba chladnutí > 10 miliard let), na jejichž počtu je stáří galaktického disku závislé. K získání vývojových modelů Galaxie lze použít luminozitní funkci. Luminozitní funkce je definována jako počet hvězd o určité zářivosti v objemové jednotce. K jejímu sestrojení musíme uvážit:

- funkci počáteční hmotnosti
- tempo vzniku hvězd
- dobu života hvězdy před stádiem bílého trpaslíka
- vztah mezi počáteční a koncovou hmotností
- tempo chladnutí bílého trpaslíka

Nejčastěji se uvažuje Salpeterova (1955) funkce počáteční hmotnosti

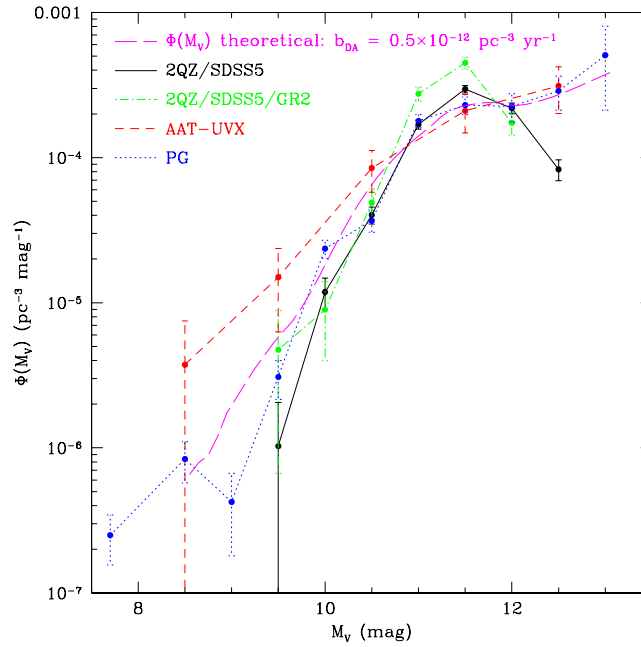
$$\phi(M) = \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.35}.$$

Scalo (1986) a Kroupa a kol. (1993) navrhli funkci počáteční hmotnosti, která je strmější v oblasti velkých hmotností. Tempo vzniku hvězd je prozatím zatíženo poměrně velkou nejistotou. Doba života hvězdy před stádiem bílého trpaslíka lze aproximovat vztahem

$$\tau_{\text{MS}} = 10 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5} \text{ Gyrs.}$$

Na obrázku 1.15 je vykreslena luminozitní funkce pro bílé trpaslíky typu DA (Kawka & Vennes, 2007). V grafu jsou porovnány luminozitní funkce sestrojené na základě přehledů 2QZ/SDSS5, 2QZ/SDSS5/GR2, AAT-UVX a PG (Palomar-Green) s teoretickou luminozitní funkcí, která uvažuje tempo vzniku bílých trpaslíků typu DA $0.5 \cdot 10^{-12} \text{ pc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$. Obě luminozitní funkce 2QZ/SDSS5 i 2QZ/SDSS5/GR2 jsou neúplné pro $M_V \geq 12.0$ mag.

Naše Galaxie vznikla pravděpodobně před ~ 10 miliardami let. Jakmile došlo k ochlazení mezihvězdného plynu v oblaku na teplotu $\lesssim 10^4$ K, začal plyn v potenciálu Galaxie klesat a klesal tak dlouho, dokud nevytvořil odstředivě vázaný disk. Srážky mezi částicemi oblaků byly nepružné, a proto plyn klesal dokud srážky nepřestaly být podstatné, což je možné pouze pokud se všechny oblaky pohybují po podobných kruhových drahách téměř



Obrázek 1.15: Srovnání různých luminozitivních funkcí pro bílé trpaslíky typu DA (Kawka & Vennes, 2007).

v jedné rovině. Jak se plyn kumuloval v disku, stával se náchylným ke gravitační nestabilitě a v nejhustších oblacích se začaly tvořit první hvězdy, z nichž ty nejméně hmotné následným vývojem vytvořily nejstarší populaci bílých trpaslíků. Přibližně 1 miliardu let po svém vzniku se podle jedné z teorií naše Galaxie srazila s méně hmotnou satelitní galaxií (Walker a kol., 1996), což pravděpodobně napomohlo k vytvoření tzv. tlustého disku narušením již vzniklého tenkého disku. Následně se uvnitř tlustého disku opět zformoval tenký disk z plynu, který se usadil zpět v rovině. Z pozorování je dnes zřejmé, že centrální výduť Galaxie nevznikla jen spojením tlustého disku a nejnvnitřnějšího hala, protože obsahuje hvězdy s větším zastoupením těžkých prvků, než je tomu u hvězd tlustého disku. Zdá se být pravděpodobné, že těžší prvky vznikly ve hvězdách nepatřících k výduti, ale k halu nebo diskům. Plyn obohacený o těžké prvky vyvržený těmito hvězdami pak mohl být v určitém stadiu vývoje akreován hvězdami výdutě. Výduť Galaxie mohla patrně vzniknout z centrální části tenkého disku, ve které docházelo ke zvětšování disperze radiálních rychlostí, a v důsledku toho k jeho vyboulení a zahuštění. Jedním z důvodů zvětšování disperze rychlostí mohl být vznik příčky v disku Galaxie, která způsobila zvětšení excentricit drah hvězd v disku.

Hvězdy v Galaxii lze tedy obecně rozdělit do tří skupin:

- tenký disk
- tlustý disk

- galaktické halo.

Pro příslušníky diskových populací je typický vyšší obsah těžkých prvků a zjevná koncentrace k rovině Galaxie. Nejplošší je tenký disk s přibližnou tloušťkou 300 pc, který obsahuje mladé hvězdy a ke kterému počítáme také hvězdy nacházející se ve spirálních ramenech. Spirální ramena obsahují extrémně mladé objekty, jakými jsou asociace typu O a T Tauri, mladé otevřené hvězdokupy, dlouhoperiodické cefeidy, oblasti H II, molekulová oblaka a oblaka neutrálního vodíku. Tlustý disk, ve kterém se nacházejí především starší hvězdy a jehož tloušťka je odhadována na 1350 pc, postupně přechází ve sféroidální galaktické halo s výraznou koncentrací hvězd k centru Galaxie. Galaktické halo obsahuje nejstarší hvězdy II. populace, tedy nejstarší pozorované hvězdy v Galaxii, které jsou složeny z prvotního vodíku a helia s jen nepatrnou příměsí těžších prvků. Nejzářivějšími hvězdami jsou zde červení obři a obři asymptotické větve o hmotnostech menších než hmotnost Slunce. Výraznými objekty hala jsou kulové hvězdokupy.

Většina bílých trpaslíků ve slunečním okolí patří k populaci hvězd tenkého disku. Tlustý disk pravděpodobně také významně přispívá k místní populaci bílých trpaslíků, předpokládá se rozmezí 5% (Hansen & Liebert, 2003) až 25% (Reid, 2005) hvězd. V galaktickém halo byli nalezeni nejstarší bílí trpaslíci. Typickým zástupcem galaktického hala je například WD 0346+286 (Reid, 2005).

Pohyby hvězd uvnitř Galaxie lze popsat pomocí rychlostí ve třech směrech:

U - ke galaktickému centru

V - ve směru galaktické rotace

W - k severnímu galaktickému pólu.

Při rozborech kinematických vlastností určitých skupin hvězd se často tyto relativní rychlosti vztahují nikoli ke Slunci samotnému, ale ke Slunci idealizovanému, které se pohybuje kolem centra Galaxie rovnoměrně po přesně kruhové dráze. Tato neinerciální vztažná soustava se nazývá místní standard klidu (Local Standard of Rest). Slunce se pohybuje vzhledem k LSR rychlostmi $U_{\odot} = 10.0 \pm 0.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_{\odot} = 5.2 \pm 0.6 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ a $W_{\odot} = 7.2 \pm 0.4 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.11 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je rozšířit současné znalosti o populaci bílých trpaslíků ve slunečním okolí. V současné době je vzorek bílých trpaslíků ve slunečním okolí kompletní do vzdálenosti přibližně 13 pc. Naší snahou je doplnit tento lokální vzorek bílých trpaslíků do vzdálenosti přibližně 20 pc od Slunce a získat o těchto objektech co možná nejvíce informací. Pokud získáme kompletní vzorek bílých trpaslíků do vzdálenosti přibližně 20 pc bez výběrových efektů, budeme moci podrobně zkoumat vlastnosti místní populace těchto objektů.

Abychom mohli studovat vlastnosti populace bílých trpaslíků ve slunečním okolí, zaměřili jsme se na objekty s velkým vlastním pohybem. Vycházeli jsme z rNLTT katalogu (Salim & Gould, 2003), ze kterého jsme na základě zjednodušeného diagramu vlastních pohybů hvězd (Salim & Gould, 2002; Kawka a kol., 2004) a za použití opticko-infračerveného diagramu (Kawka a kol., 2004) vybrali kandidáty na bílé trpaslíky.

Vzorek studovaných bílých trpaslíků pochází ze dvou zdrojů. Část studovaných dat byla napozorována v období od 11. 7. 2007 do 16. 7. 2007 na Cerro Tololo Inter-American Observatory S. Vennešem a A. Kawkou. Tato spektra byla následně A. Kawkou redukována. Další spektra jsme získali z databáze Sloan Digital Sky Survey. Přehled všech zkoumaných objektů včetně jejich zdroje je obsahem kapitoly číslo 2.

Hlavní náplní diplomové práce je zpracovat shromážděná spektra bílých trpaslíků a porovnat je s modely, které vytvořil S. Venneš spolu s A. Kawkou. Z tohoto porovnání lze získat atmosférické vlastnosti bílých trpaslíků, tedy teplotu a povrchové gravitační zrychlení. Postup zpracování i výpočtu spolu s dosaženými výsledky jsou uvedeny v kapitole číslo 3.

Na základě známé teploty a povrchového gravitačního zrychlení jsme v kapitole číslo 4 stanovili užitím teoretických modelů další vlastnosti těchto bílých trpaslíků. Konkrétně jsme se zabývali jejich hmotností, absolutní hvězdnou velikostí, vzdáleností od Slunce a jejich stářím.

V kapitole číslo 5 zkoumáme kinematiku vybraných hvězd. Z již známých a také námi zjištěných vlastností bílých trpaslíků jsme vypočítali složky rychlosti U , V a W vzhledem k LSR. Program, který výpočet provedl, byl napsán S. Vennešem.

Použitím programu, který vytvořil S. Venneš a dále upravila A. Kawka, jsme v kapitole číslo 6 vykreslili luminozitní funkci.

V kapitole číslo 7 jsme shrnuli dosažené výsledky.

Teoretická část diplomové práce byla zpracována převážně na základě textu *Notes on White Dwarfs*, který je dostupný na adrese <http://sunstel.asu.cas.cz/kawka/whitedwarf.pdf>. A dále s využitím článků Koester & Chanmugam (1990), Sion a kol. (1983), Kawka & Venneš (2006) a Kawka a kol. (2007) a knih Ostlie & Carroll (1996) a Binney & Merrifield (1998).

Kapitola 2

Pozorování

Spektra zpracovávaná v této práci pocházejí ze dvou zdrojů. Část z nich je původní a byla napozorována na Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO). Druhá část dat byla převzata ze Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Kandidáti na bílé trpaslíky byli vybráni z rNLTT katalogu pomocí zjednodušeného diagramu vlastních pohybů hvězd (Salim & Gould, 2002; Kawka a kol., 2004) a také za použití opticko-infračerveného diagramu (Kawka a kol., 2004).

2.1 CTIO

Pozorování na Cerro Tololo Inter-American Observatory probíhalo v období od 11. 7. 2007 do 16. 7. 2007 (s výjimkou 12. 7., kdy bylo zataženo) a bylo provedeno S. Vennešem a A. Kawkou.

Spektra byla získána 4m dalekohledem Blanco za použití 4M R-C (Cassegrain) spektrografu. Byla použita mřížka KPGL2 s hodnotou 316 vrypů na milimetr a maximem účinnosti na vlnové délce (blaze wavelength) 4400 Å a filtr WG360. Spektra byla pořízena v rozmezí vlnových délek 3700 Å a 7480 Å, centrální vlnová délka činila 5109 Å. Hodnota disperze byla 1.9942 Å/pixel a rozlišení ~ 8 Å. Úhel mřížky činil 61.868°. Byl použit modrý kolimátor s ohniskem 515 mm. Šířka štěrbin byla po celou dobu pozorování 1.50". Seeing představoval v průměru 1". Vše bylo pozorováno v paralaktickém úhlu.

Jako srovnávací spektrum bylo použito spektrum HeNeAr výbojky, které se vždy exponovalo po dobu 10 s po každém napozorovaném objektu. První pozorovací noc, tedy 11. 7. 2007, byl ke kalibraci toku použit objekt EG131, zbylé noci potom objekt Feige 110.

V tabulkách číslo 2.1 až 2.5 jsou shrnuta všechna pozorování po jednotlivých pozorovacích nocích. Je zde uvedeno jméno objektu, expoziční čas, čas začátku pozorování v UT, vzdušná hmota, úhel a případně údaj upřesňující podmínky pozorování. Velikost úhlu byla počítána pomocí programu J. Thorstensa Skycalc (<http://www.dartmouth.edu/~physics/faculty/skycalc/flyer.html>) tak, aby se co nejvíce blížila velikosti paralaktického úhlu.

Tabulka 2.1: Pozorovací noc 11. 7. 2007.

NLTT	expoziční čas [s]	čas začátku pozorování [h:min]	vzdušná hmota	úhel [°]	poznámka
33669	1200	23:53	1.048	120.0	seeing $\sim 0.7''$
33669	1200	0:15	1.079	120.0	
42995	2400	0:49	1.058	224.0	
42995	2400	1:31	1.025	224.0	
48777	1800	2:24	1.420	63.0	seeing $\sim 1.0''$
48777	1800	2:56	1.276	63.0	
53210	2400	5:21	1.237	52.0	
53210	2400	6:04	1.133	52.0	
56493	1500	6:53	1.269	43.9	
56493	1500	7:20	1.205	43.9	
2886	1200	8:26	1.091	95.0	
2886	1200	8:48	1.055	95.0	
6794	1500	9:14	1.141	76.4	
6794	1500	9:41	1.086	76.4	

Tabulka 2.2: Pozorovací noc 13. 7. 2007.

NLTT	expoziční čas [s]	čas začátku pozorování [h:min]	vzdušná hmota	úhel [°]	poznámka
35570	1200	0:49	1.076	103.0	
35570	1200	1:11	1.117	103.0	
44269	1800	1:42	1.467	126.1	seeing $\sim 1.5''$
44269	1800	2:14	1.437	126.1	
49170	2400	4:37	1.031	173.1	seeing $\sim 2.0''$
49170	2400	5:19	1.004	173.1	seeing $\sim 1.0''$
56045	1800	6:09	1.150	81.0	seeing $\sim 0.8''$
347	2400	6:47	1.290	86.1	seeing $\sim 0.7''$
5503	2400	7:47	1.597	52.0	
5943	2400	8:36	1.367	42.0	
5943	2400	9:18	1.229	42.0	

Tabulka 2.3: Pozorovací noc 14. 7. 2007.

NLTT	expoziční čas [s]	čas začátku pozorování [h:min]	vzdušná hmota	úhel [°]	poznámka
33462	2400	23:13	1.083	162.0	
38183	2400	0:02	1.038	162.0	seeing $\sim 0.8''$
49007	2400	3:33	1.181	43.0	
49007	2400	4:15	1.099	43.0	
50161	1800	5:04	1.032	68.0	
50161	1800	5:36	1.009	68.0	
53302	2400	6:14	1.095	14.0	
53302	2400	6:56	1.055	14.0	
82	2400	7:54	1.189	18.0	seeing $\sim 0.8''$
6876	2400	8:42	1.386	48.0	
10358	2400	9:31	1.449	48.0	

Tabulka 2.4: Pozorovací noc 15. 7. 2007.

NLTT	expoziční čas [s]	čas začátku pozorování [h:min]	vzdušná hmota	úhel [°]	poznámka
32785	2400	23:36	1.172	83.0	
32785	2400	0:19	1.276	83.0	
33797	3000	1:05	1.278	118.0	
49165	2400	2:05	1.540	117.0	seeing $\sim 1.2''$
49165	2400	2:47	1.315	117.0	slabé mraky
49165	2400	3:39	1.171	53.8	mraky
56257	1200	5:03	1.509	57.0	
56257	1200	5:25	1.384	57.0	
7051	1800	8:08	1.306	105.1	mraky
7051	1800	8:44	1.184	105.1	mraky
7051	1500	9:16	1.107	95.9	
8432	2400	9:49	1.116	67.0	

Tabulka 2.5: Pozorovací noc 16. 7. 2007.

NLTT	expoziční čas [s]	čas začátku pozorování [h:min]	vzdušná hmota	úhel [°]	poznámka
33503	1200	22:43	1.037	156.9	
36245	1800	23:11	1.141	175.0	
49165	2400	2:57	1.261	59.1	
49165	2400	3:41	1.139	50.9	
51252	1800	4:28	1.137	67.0	
57760	2400	5:07	1.607	64.0	
57760	1800	5:50	1.354	64.0	
10072	2400	8:11	1.615	70.1	seeing $\sim 1.3''$
10072	800	8:54	1.360	70.1	slabé mraky
4872	1800	9:15	1.052	60.1	
3080	1800	9:58	1.065	28.1	

2.2 SDSS

Převzatá spektra pocházejí ze Sloan Digital Sky Survey (<http://www.sdss.org/>), konkrétně z Data Release Six. Spektra jsou pořizována 2.5m upraveným Ritcheyovým-Chretienovým dalekohledem umístěným na Apache Point Observatory. Jsou používány dva spektrografy, jeden s vlnovou délkou v rozmezí od 3800 Å do 6100 Å, druhý od 5900 Å do 9100 Å. Hodnota rozlišení činí ~ 3 Å. Pro fotometrii jsou používány filtry s průměrnými vlnovými délkami 3551 Å pro filtr *u*, 4686 Å pro filtr *g*, 6165 Å pro filtr *r*, 7481 Å pro filtr *i* a 8931 Å pro filtr *z*.

V tabulce číslo 2.6 je shrnuto jméno, číslo z SDSS katalogu a SDSS fotometrie zároveň s chybami pro všechny bílé trpaslíky, jejichž převzatá spektra dále v práci zkoumáme.

Tabulka 2.6: SDSS objekty.

NLTT	SDSS	u [mag]	g [mag]	r [mag]	i [mag]	z [mag]
659	J001339.19+001924.3	15.774±0.005	15.336±0.4	15.405±0.004	15.504±0.005	15.671±0.007
1374	J002602.29-103751.8	16.741±0.007	16.179±0.004	16.267±0.004	16.346±0.004	16.512±0.009
1849	J003426.92+151801.7	17.555±0.009	16.988±0.004	16.808±0.004	16.745±0.005	16.796±0.013
3022	J005438.84-095219.8	17.221±0.009	16.818±0.004	16.763±0.004	16.834±0.005	16.968±0.014
10358	J031455.94-081518.5	16.956±0.008	16.777±0.004	16.875±0.005	17.020±0.006	17.181±0.016
18623	J075525.96+362154.6	16.578±0.006	16.157±0.004	16.051±0.004	16.051±0.004	16.155±0.020
18746	J075959.56+433521.2	16.774±0.007	16.205±0.003	16.232±0.004	16.206±0.004	16.087±0.007
19019	J080946.19+292032.1	16.810±0.007	16.277±0.003	16.107±0.004	16.060±0.004	16.061±0.007
19311	J082001.30+383434.9	17.037±0.008	16.584±0.005	16.488±0.005	16.459±0.006	16.531±0.009
19653	J083039.43+324146.1	16.211±0.006	15.788±0.004	15.665±0.005	15.671±0.005	15.674±0.007
20145	J084457.80+453632.7	16.404±0.006	15.950±0.003	15.950±0.004	16.005±0.004	16.136±0.007
20165	J084524.62+380156.0	16.499±0.006	16.031±0.004	15.987±0.005	16.007±0.005	16.113±0.008
20629	J085830.85+412635.0	17.631±0.012	17.038±0.004	16.886±0.005	16.835±0.005	16.887±0.011
20852	J090318.54+201245.7	17.593±0.011	17.081±0.005	16.929±0.005	16.899±0.005	16.977±0.010
21241	J091356.83+404734.6	17.950±0.011	17.389±0.005	17.181±0.005	17.134±0.006	17.167±0.012
21338	J091640.75+435941.0	15.761±0.005	15.365±0.003	15.362±0.003	15.421±0.003	15.569±0.006
21339	J091621.35+254028.4	21.275±0.109	18.360±0.007	17.472±0.006	17.388±0.007	17.536±0.018
21660	J092430.80+312032.3	20.558±0.008	18.746±0.009	17.952±0.007	17.639±0.007	17.546±0.017
21844	J092840.28+184113.7	17.141±0.008	16.678±0.004	16.585±0.005	16.562±0.005	16.664±0.009
22043	J093341.00+291122.5	16.419±0.007	16.013±0.004	15.982±0.004	16.012±0.005	16.138±0.007
22620	J094806.09+202315.3	20.346±0.055	18.553±0.007	17.789±0.006	17.477±0.007	17.347±0.014
23036	J095748.25+243253.9	15.380±0.004	15.101±0.004	15.089±0.004	15.138±0.004	15.263±0.005

Tabulka 2.6: – pokračování

NLTT	SDSS	u [mag]	g [mag]	r [mag]	i [mag]	z [mag]
24406	J102747.64+192824.1	17.894±0.013	17.392±0.005	17.232±0.005	17.172±0.005	17.260±0.011
24727	J103443.35+224548.8	17.418±0.010	16.718±0.005	16.572±0.005	16.649±0.006	16.799±0.010
24770	J103532.53+212603.5	18.017±0.013	17.409±0.005	17.228±0.005	17.177±0.006	17.205±0.012
25908	J105925.46+341451.4	15.433±0.005	15.432±0.004	15.637±0.004	15.817±0.004	16.052±0.007
26653	J111316.48+285905.6	20.213±0.049	18.510±0.007	17.738±0.006	17.444±0.007	17.294±0.015
26706	J111424.65+334123.7	18.233±0.015	17.847±0.006	17.807±0.006	17.757±0.007	17.608±0.017
27781	J113347.15+330123.3	16.992±0.008	16.647±0.004	16.680±0.004	16.745±0.005	16.839±0.011
28712	J115020.05+251832.1	16.078±0.006	15.628±0.004	15.726±0.004	15.857±0.005	16.049±0.007
28772	J115123.93+541147.7	17.156±0.009	16.711±0.004	16.786±0.005	16.891±0.005	17.040±0.011
29233	J120003.28+433541.5	16.285±0.006	15.816±0.004	15.745±0.004	15.758±0.004	15.848±0.006
30781	J122724.30+315023.2	17.467±0.011	16.821±0.004	16.560±0.004	16.492±0.004	16.507±0.009
32695	J130247.97−005002.7	17.009±0.008	16.555±0.005	16.691±0.006	16.833±0.07	17.023±0.012
33108	J130957.59+350947.2	15.703±0.005	15.312±0.003	15.400±0.003	15.607±0.004	15.858±0.006
34206	J132742.07+575506.4	17.411±0.009	16.812±0.04	16.581±0.004	16.535±0.005	16.540±0.009
34264	J132937.15−013430.5	17.726±0.012	17.200±0.005	17.052±0.005	17.012±0.005	17.055±0.012
34623	J133630.52+362347.9	17.080±0.008	16.484±0.004	16.268±0.004	16.225±0.005	16.222±0.007
36245	J140619.96−011932.4	15.504±0.005	15.561±0.003	15.863±0.004	16.080±0.004	16.309±0.008
39605	J151151.36+562450.5	16.717±0.006	16.301±0.004	16.325±0.004	16.404±0.004	16.547±0.008
41800	J160112.70+531700.0	17.292±0.009	16.679±0.004	16.478±0.004	16.423±0.005	16.398±0.009
42265	J161302.25+163154.4	15.882±0.005	15.572±0.004	15.851±0.004	16.108±0.005	16.395±0.009
43827	J165538.92+253345.9	17.176±0.009	16.951±0.005	17.057±0.005	17.216±0.006	17.405±0.016

Kapitola 3

Analýza spekter

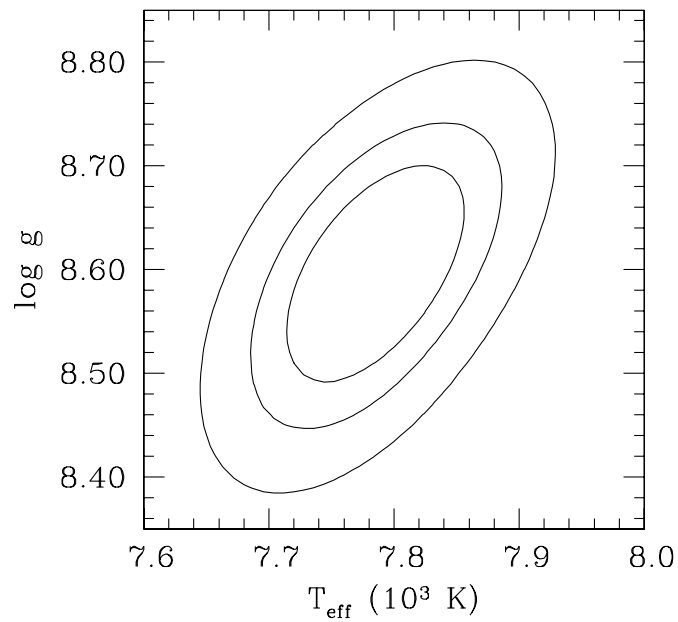
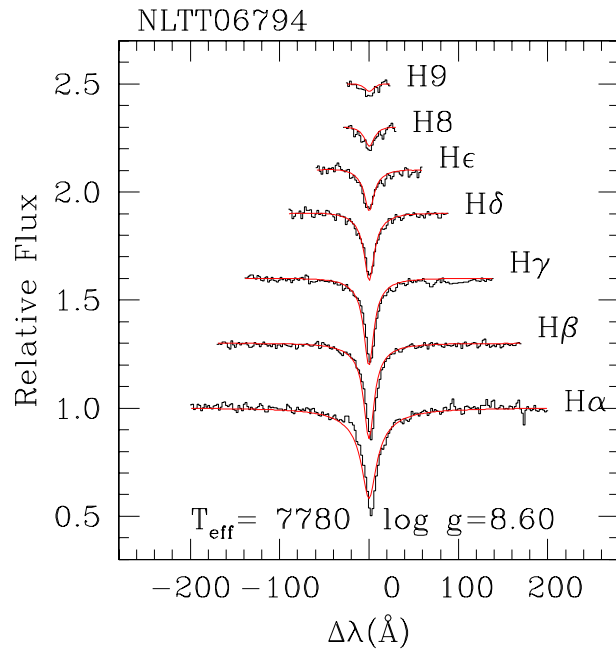
Původní spektra pořízená na CTIO byla A. Kawkou redukována standardními procedurami programu IRAF. Následně jsme všechna spektra převedli z formátu FITS do ASCII pomocí procedury `wspec` programu IRAF.

3.1 Bílí trpaslíci typu DA

Fitování spekter bílých trpaslíků typu DA jsme prováděli pomocí programu S. Vennese, který později upravila A. Kawka. Analyzovali jsme spektra ze CTIO i SDSS, fitování spekter ze CTIO provedla A. Kawka. Na síti čistě vodíkových LTE planparalelních modelů, která je spočítána pro teploty $T_{\text{eff}} = 4\,500, 5\,000$ K pro $\log g = 7.0, 8.0$ a 9.0 , $T_{\text{eff}} = 5\,500$ až $7\,000$ K (s krokem 500 K), $T_{\text{eff}} = 7\,000$ až $16\,000$ K (s krokem 1000 K), $T_{\text{eff}} = 18\,000$ až $32\,000$ K (s krokem 2000 K) a $T_{\text{eff}} = 36\,000$ až $100\,000$ K (s krokem $4\,000$ K) pro $\log g = 7.0$ až 9.5 (s krokem 0.25), je pro každý bod stanovena hodnota funkce χ^2 a hodnota vyhodnocená programem jako nejmenší je pokládána za výsledek. Získáme tak hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení daného bílého trpaslíka. Tímto způsobem byly fitovány čáry Balmerovy série vodíku $H\alpha$ až $H9$. Pokud v některých případech nebyly slabší čáry dostatečně patrné nebo zde byla příliš vysoká hladina šumu, pak jsme tyto čáry při výpočtu vynechali. Uváděné chyby jsou pouze chyby statistické. Nejsou do nich zahrnuty chyby systematické způsobené například redukcí spekter nebo podmínkami pozorování.

Na obrázku 3.1 je ukázán příklad fitovaného spektra. Ve vrchní části obrázku jsou proložené Balmerovské čáry, v dolní části obrázku je vykreslena funkce χ^2 . Jednotlivé kontury představují chyby σ (68%), 2σ (95%) a 3σ (99%). Kompletní sada fitovaných spekter je vykreslena v první části dodatku.

Výsledky fitování teploty a povrchového gravitačního zrychlení bílých trpaslíků typu DA jsou shrnuty v tabulce číslo 3.1. Je zde uvedeno NLTT i WD jméno každého objektu, získané hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení spolu s chybami, zdánlivá hvězdná velikost objektu, jejíž chyba je pro všechny hodnoty 0.25 mag (Salim & Gould, 2003), a zdroj, ze kterého bylo spektrum získáno. Pokud je hodnota povrchového gravitačního zrychlení v závorce, jedná se o předpoklad, nikoli o spočítanou hodnotu.



Obrázek 3.1: Fitované spektrum bílého trpaslíka NLTT 6794. V horní části obrázku jsou proloženy jednotlivé čáry Balmerovy série vodíku, v dolní části obrázku je vykreslena funkce χ^2 , kde kontury představují popořadě chyby σ , 2σ a 3σ .

Tabulka 3.1: Hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení bílých trpaslíků typu DA.

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
82	0001-039	7210±50	8.08±0.10	16.73	CTIO
347	0005-148	6560±70	8.19±0.13	16.86	CTIO
659	0011+000	9640±40	8.18±0.04	15.23	SDSS
1374	0023-109	16070±180	7.22±0.05	16.29	SDSS
1849	0031+150	7020±85	8.24±0.12	16.70	SDSS
2886	0049-308	6490±70	7.65±0.14	16.48	CTIO
3022	0052-101	8860±50	8.08±0.06	16.67	SDSS
3080	0053-117	7150±50	8.14±0.10	15.36	CTIO
5503	0136-042	10100±60	8.14±0.05	16.43	CTIO
5943 ^a	0144-046	~15000	(8.0)	18.11	CTIO
6794	0159-270	7780±70	8.60±0.10	16.87	CTIO
6876	0201-052	23460±290	7.71±0.04	16.33	CTIO
7051	0204-306	5620±130	8.33±0.38	16.18	CTIO
8432	0233-230	6520±90	7.93±0.16	17.02	CTIO
18623	0752+365	7900±55	8.40±0.08	15.66	SDSS
19019	0806+294	7100±55	8.23±0.09	16.09	SDSS
19311	0816+387	7720±55	8.30±0.08	16.72	SDSS
19653	0827+328	7400±50	8.68±0.07	15.70	SDSS
20145	0841+457	9120±60	8.27±0.06	16.16	SDSS
20165	0842+382	8150±60	8.15±0.08	16.03	SDSS
20629 ^b	0855+416	6550±20	(8.0)	16.89	SDSS
20852	0900+204	7320±60	8.15±0.09	16.97	SDSS
21241	0910+410	6910±80	7.98±0.16	17.27	SDSS
21338	0913+442	8710±50	8.24±0.06	15.67	SDSS
21844	0925+189	7820±60	8.61±0.08	16.60	SDSS
22043	0930+294	8520±60	8.78±0.07	15.83	SDSS
23036	0955+247	8580±50	8.28±0.06	15.06	SDSS
24406	1025+197	7300±90	8.48±0.15	17.10	SDSS
24770 ^b	1032+216	7150±20	(8.0)	17.39	SDSS
26706	1111+339	8380±85	8.26±0.11	17.53	SDSS
27781	1131+332	9220±55	8.89±0.06	16.57	SDSS
28712	1147+256	9980±60	7.99±0.06	15.93	SDSS
28772	1148+544	9800±55	8.08±0.06	16.67	SDSS
29233	1157+438	7980±55	8.16±0.07	16.00	SDSS
30781	1224+321	6540±105	8.08±0.17	16.77	SDSS
32695	1300-005	10620±65	8.19±0.05	16.84	SDSS
32785	1302-052	5150±220	7.95±0.54	17.12	CTIO

Tabulka 3.1: – pokračování

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
33108	1307+354	11000±65	8.19±0.04	15.66	SDSS
33503	1314–153	14860±140	7.79±0.04	15.07	CTIO
33669	1316–215	5880±80	8.83±0.16	16.35	CTIO
34206	1325+581	6800±80	8.12±0.13	16.63	SDSS
34264	1327–013	7410±90	8.23±0.14	16.46	SDSS
34623	1334+366	6850±60	7.98±0.11	16.35	SDSS
35570	1350–274	7790±60	8.17±0.10	16.75	CTIO
38183	1440–144	6740±70	8.15±0.12	16.37	CTIO
39605	1510+566	9180±60	8.08±0.05	16.40	SDSS
41800	1559+534	6880±80	8.34±0.14	16.49	SDSS
42265	1610+166	14670±110	7.80±0.03	15.74	SDSS
43827	1653+256	11400±140	9.35±0.05	16.90	SDSS
44269	1707+157	6420±140	8.30±0.33	17.33	CTIO
49165	2020–157	6130±80	8.62±0.16	17.36	CTIO
50161	2053–274	9160±50	8.23±0.07	17.19	CTIO
51252	2123–229	14200±150	8.01±0.03	15.59	CTIO
56045	2308–300	7780±60	8.05±0.09	16.52	CTIO
56257	2312–149	9080±70	8.72±0.08	15.13	CTIO
56493	2317–027	5000±190	7.44±0.44	16.89	CTIO

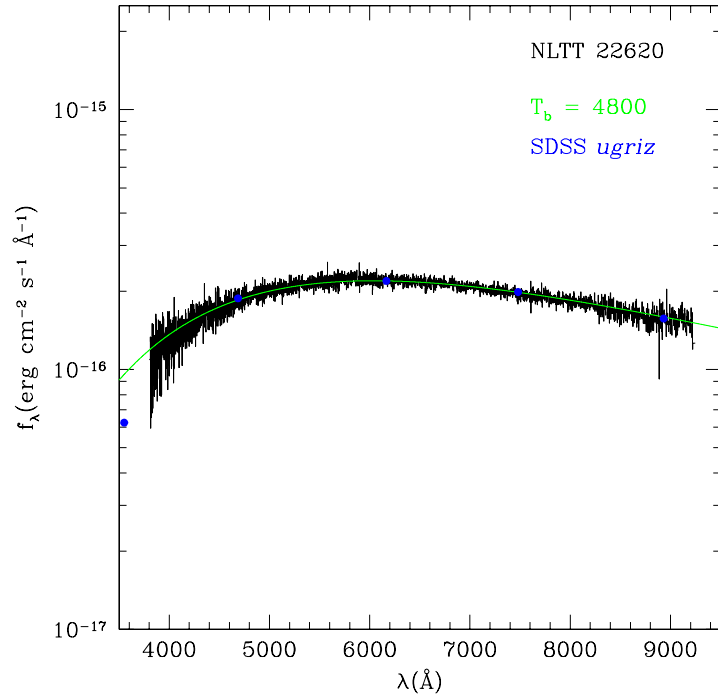
^aDQA^bmagnetičtí bílí trpaslíci

3.2 Bílí trpaslíci typu DC a DZ

Spektra bílých trpaslíků typu DC a DZ musíme analyzovat jiným způsobem, protože v nich nejsou přítomny čáry Balmerovy série. Spektra jsou porovnávána s průběhem spektra absolutně černého tělesa za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$, což je průměrná hodnota povrchového gravitačního zrychlení bílých trpaslíků. Protože jsou čáry kovů ve spektrech všech bílých trpaslíků typu DZ z našeho vzorku dostatečně slabé, lze porovnání spekter s průběhem spektra absolutně černého tělesa použít i pro tento typ objektů. Existují ale bílí trpaslíci, například NLTT 34344 (G 165–7) nebo NLTT 40607, u kterých bychom tento postup využít nemohli. Chybu zjištěné teploty vzniklou porovnáváním dvou křivek jsme odhadli na ± 300 K. V některých případech jsme měli k dispozici také SDSS fotometrii, která pomohla ke zpřesnění porovnávání. Konkrétně jsme SDSS fotometrii využili u objektů NLTT 18746, NLTT 21660, NLTT 22620, NLTT 24727 a NLTT 26653. Příklad postupu je vykreslen na obrázku 3.2.

Tento postup bylo možno použít, protože jsou analyzované hvězdy poměrně chladné. Pro bílé trpaslíky s teplotou $T \gtrsim 10\,000$ K je již potřeba postupovat jiným způsobem, spek-

tra hvězd je zapotřebí analyzovat pomocí heliových modelů. Spektra všech bílých trpaslíků typu DZ jsou vykreslena na obrázku 3.3, bílých trpaslíků typu DC na obrázku 3.4.



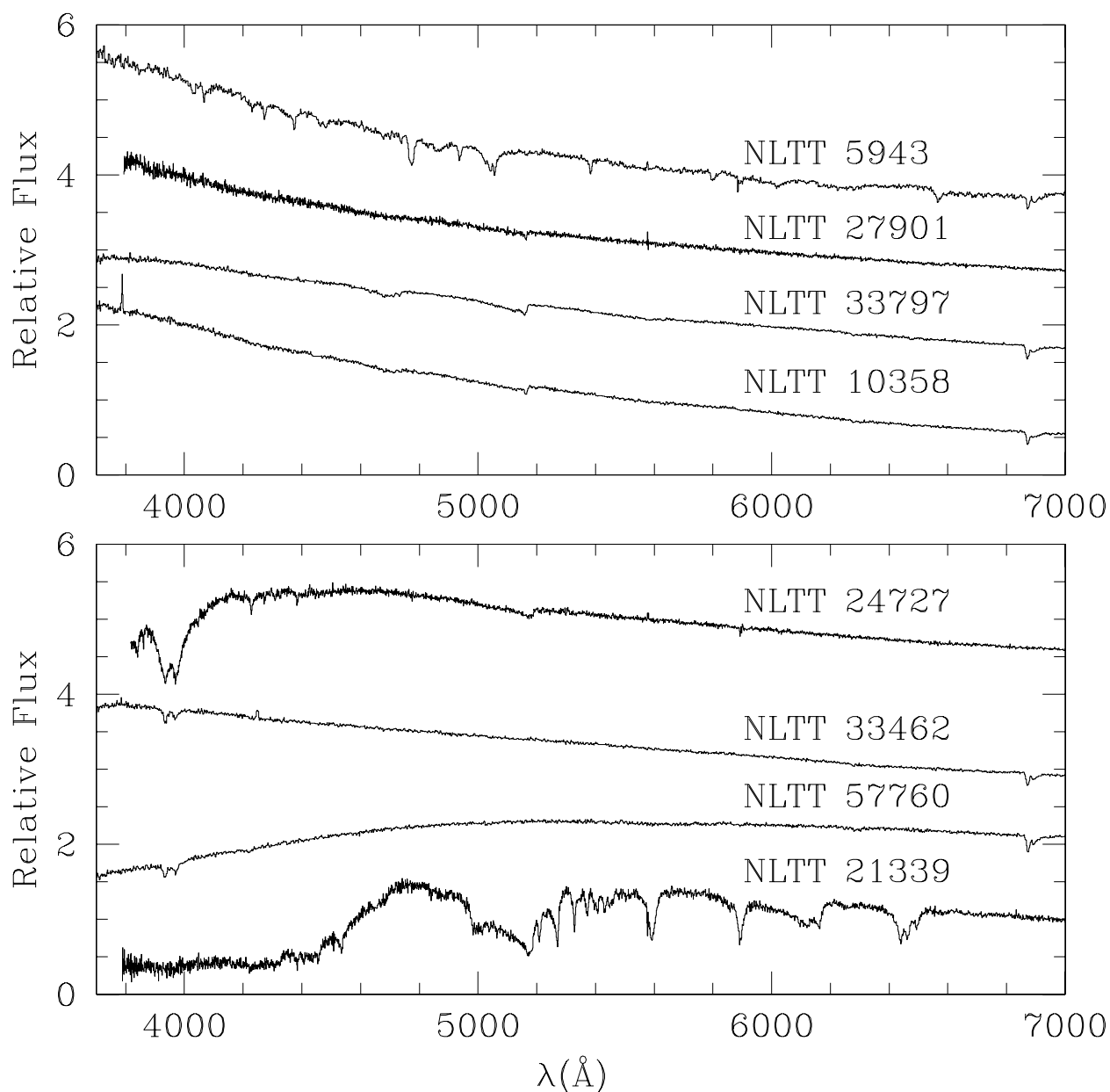
Obrázek 3.2: Porovnávání spektra bílého trpaslíka NLTT 22620 s průběhem spektra absolutně černého tělesa. Černě je vyneseno spektrum bílého trpaslíka, modré tečky představují SDSS fotometrii a zelená je křivka absolutně černého tělesa o teplotě 4800 K.

3.3 Bílí trpaslíci typu DQ

K určení teplot většiny bílých trpaslíků typu DQ jsme použili práci Dufour a kol. (2005). Spektra bílých trpaslíků jsou zde analyzována pomocí LTE modelu atmosféry, který lze použít pro čistě vodíkovou a čistě heliovou atmosféru, stejně jako pro atmosféru složenou z vodíku i helia. Přenos energie konvekcí je zde zahrnut použitím ‘mixing-length’ formalismu. Ve stavové rovnici a ve výpočtech opacity je uvažován atomární a molekulární uhlík. Sít modelů byla spočítána pro rozmezí $T_{\text{eff}} = 5\,000$ až $12\,000$ K (s krokem 500 K) pro $\log g = 7.5$ až 9.5 (s krokem 0.5).

Ze známé SDSS fotometrie bílého trpaslíka NLTT 10358 jsme vypočítali rozdíly $u - g = 0.179$ a $g - r = -0.098$ a v obrázku číslo 14 z práce Dufour a kol. (2005) jsme odečetli teplotu odpovídající povrchovému gravitačnímu zrychlení $\log(g) \sim 8.0$. Zastoupení uhlíku v atmosféře bílého trpaslíka nebylo z obrázku možno určit, protože je hvězda horká a hodnoty v diagramu splývají. Spektra vykreslená ve stejné práci na obrázku číslo 2 jsme

porovnávali se spektrem bílého trpaslíka NLTT 33797 a dospěli tak k odhadu jeho teploty. Předpokládáme opět $\log(g) \sim 8.0$. Teplotu bílého trpaslíka NLTT 27901 jsme převzali z práce Koester & Knist (2006). Spektra všech bílých trpaslíků typu DQ jsou vykreslena na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Spektra heliových bílých trpaslíků. V horním obrázku jsou vynesena spektra bílých trpaslíků typu DQ (NLTT 5943 je bílý trpaslík typu DQA), v dolním obrázku jsou vyneseni bílí trpaslíci typu DZ. Čáry vyskytující se u CTIO objektů kolem ~ 6800 Å jsou neodstraněné spektrální čáry vody.

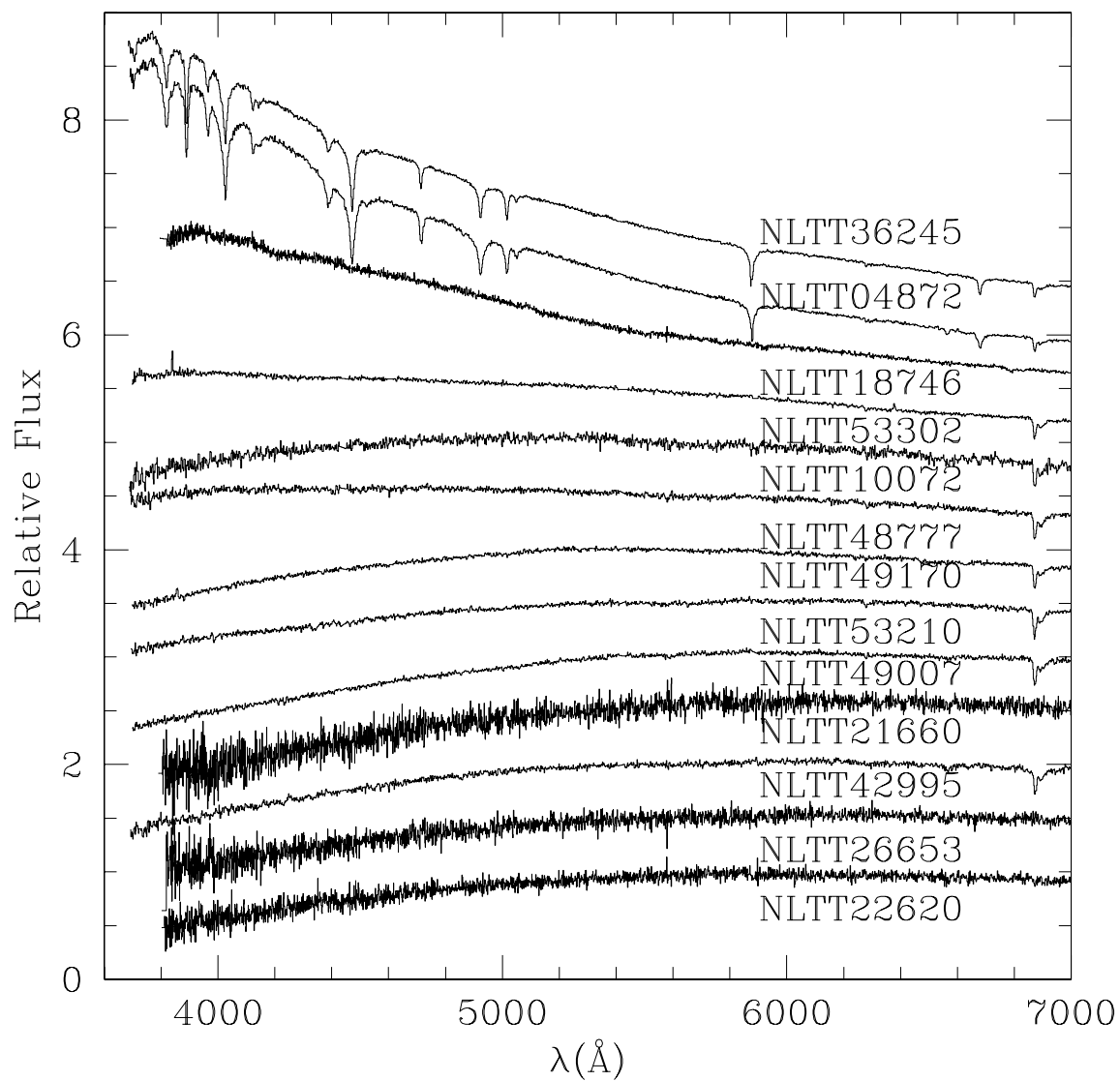
3.4 Bílí trpaslíci typu DB

Bílí trpaslíci typu DB jsou v našem vzorku pouze dva. U NLTT 4872 i NLTT 36245 jsou patrné stopy vodíku v atmosféře a lze je tedy klasifikovat jako DBA. Oba bílí trpaslíci byli zkoumáni v práci Voss a kol. (2007), ze které jsme převzali hodnoty jejich efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení. V uváděných chybách jsou již zahrnuty chyby systematické. Spektra obou bílých trpaslíků typu DB jsou vykreslena na obrázku 3.4.

V tabulce číslo 3.2 jsou shrnuty získané hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení pro bílé trpaslíky bohaté na helium. Je zde uvedeno NLTT i WD jméno objektu, efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení spolu s chybami, zdánlivá hvězdná velikost objektu, jejíž chyba je pro všechny hodnoty 0.25 mag (Salim & Gould, 2003), spektrální typ bílého trpaslíka a zdroj, ze kterého spektrum pochází. Pokud je hodnota povrchového gravitačního zrychlení v závorce, jedná se opět o předpoklad, nikoli o spočítanou hodnotu.

Tabulka 3.2: Hodnoty efektivní teploty pro bílé trpaslíky bohaté na helium.

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	typ	zdroj
4872	0125–236	16757±540	8.07±0.07	15.29	DB	CTIO
10072	0307–296	5900±300	(8.0)	17.66	DC	CTIO
10358	0312–084	~9000	(8.0)	16.74	DQ	CTIO
18746	0756+437	8100±300	(8.0)	16.33	DC	SDSS
21339	0913+258	~7500	(8.0)	17.88	DZ	SDSS
21660	0921+315	4900±300	(8.0)	18.15	DC	SDSS
22620	0945+206	4800±300	(8.0)	17.80	DC	SDSS
24727	1031+230	9000±300	(8.0)	16.86	DZ	SDSS
26653	1110+292	4800±300	(8.0)	17.85	DC	SDSS
27901	1132+576	7385±190	(8.0)	16.66	DQ	SDSS
33462	1313–097	8500±300	(8.0)	16.59	DZ	CTIO
33797	1318–148	~9000	(8.0)	16.41	DQ	CTIO
36245	1403–010	15784±510	(8.0)	15.90	DB	CTIO
42995	1629–187	4800±300	(8.0)	18.39	DC	CTIO
48777	2006–164	5700±300	(8.0)	17.75	DC	CTIO
49007	2015–129	4900±300	(8.0)	17.61	DC	CTIO
49170	2021–275	5600±300	(8.0)	17.86	DC	CTIO
53210	2210–124	5000±300	(8.0)	18.15	DC	CTIO
53302	2212–132	6900±300	(8.0)	17.66	DC	CTIO
57760	2340–172	5800±300	(8.0)	17.01	DZ	CTIO



Obrázek 3.4: Spektra bílých trpaslíků typu DC vykreslená směrem nahoru podle rostoucí efektivní teploty. Dvě spektra nejvýše v obrázku jsou spektra bílých trpaslíků typu DB. Čáry vyskytující se u CTIO objektů kolem $\sim 6800 \text{ \AA}$ jsou neodstraněné spektrální čáry vody.

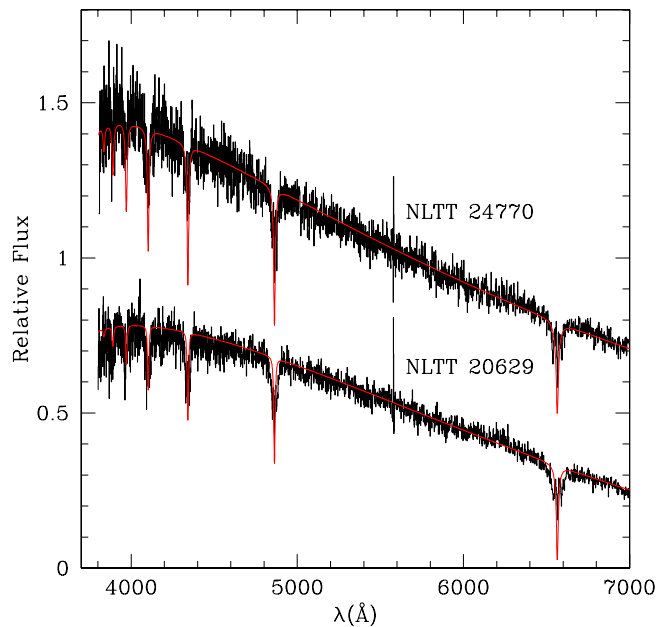
3.5 Zajímaví bílí trpaslíci

Pozoruhodnou skupinou bílých trpaslíků jsou bílí trpaslíci typu DA, kteří mají povrchové magnetické pole. U těchto objektů je ze Zeemanova rozštěpu spektrálních čar možno určit velikost magnetického pole pomocí přibližného vztahu (Kawka, 2004)

$$\Delta\lambda \approx \pm 4.67 \cdot 10^{-7} \lambda^2 B, \quad (3.1)$$

kde $\Delta\lambda$ je vzdálenost komponent čáry v \AA , λ je vlnová délka dané čáry bez přítomnosti magnetického pole, opět v \AA , a B je magnetické pole v MG. Tento vztah je možno použít jen pro hodnoty magnetického pole přibližně do 10 MG, protože nad touto hodnotou začíná být závislost nelineární. Magnetické pole jsme určovali z dostatečně silných spektrálních čar, konkrétně z čar $H\alpha$, $H\beta$ a $H\gamma$. Výsledek jsme pak z těchto hodnot získali aritmetickým průměrem.

V našem vzorku jsou celkem dva bílí trpaslíci typu DAP. U objektu NLTT 20629 jsme magnetické pole určili na hodnotu 1.2 MG a za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ jsme fitováním spektrálních čar i kontinua dospěli k efektivní teplotě 6550 K. Díky fitování celého spektra jsou chyby určení efektivní teploty těchto objektů poměrně malé, avšak systematické chyby budou pravděpodobně mnohem vyšší. Bílý trpaslík NLTT 24770 má podle našich výpočtů magnetické pole 1.3 MG a opět za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ jsme dospěli k efektivní teplotě 7150 K. Spektra obou bílých trpaslíků spolu s proloženým modelovým spektrem jsou vykreslena na obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Spektra bílých trpaslíků typu DA s magnetických polem. Spektra jsou vykreslena směrem nahoru podle rostoucí teploty. Červená křivka znázorňuje proložené modelové spektrum.

Nejchladnějšími bílými trpaslíky typu DA, jejichž spektra jsme fitovali, jsou NLTT 7051 s teplotou 5620 K, NLTT 32785 s teplotou 5150 K a NLTT 56493 s teplotou 5000 K. Naopak objekty s nejvyššími hodnotami efektivní teploty jsou NLTT 6876 s teplotou 23 460 K, NLTT 1374 s teplotou 16 070 K a NLTT 5943 s teplotou přibližně 15 000 K.

Na základě největší hodnoty povrchového gravitačního zrychlení určené na $\log(g) = 9.35$ lze usoudit, že bílý trpaslík NLTT 43827 je nehmotnějším objektem v našem vzorku. Kawka & Vennes (2006) určili hmotnost bílého trpaslíka na hodnotu $1.31 M_{\odot}$. Podle jedné z teorií mohl objekt o takovéto hmotnosti vzniknout vývojem dvojhvězdy složené ze dvou bílých trpaslíků, kteří nakonec splynuli (např. Iben & Tutukov, 1986; Benvenuto & Althaus, 1998). Může se ale také jednat o produkt vývoje osamocené hvězdy.

U některých bílých trpaslíků typu DA, kteří již byli známi, jsme využili SDSS spektra a vypočítali jsme vlastní hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení. Díky tomu můžeme získané hodnoty porovnat s hodnotami uvedenými v literatuře, což jsme shrnuli v tabulce číslo 3.3.

Tabulka 3.3: Srovnání určených parametrů bílých trpaslíků typu DA s hodnotami uvedenými v literatuře. Hodnoty označené hvězdičkou pocházejí z práce Bergeron a kol. (2001), hodnoty označené dvěma hvězdičkami z práce Kawka & Vennes (2006).

NLTT	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]
18623	7900	8.40	7700*	8.19*
19311	7720	8.30	7570*	8.19*
19653	7400	8.68	7270*	8.39*
22043	8520	8.78	8330*	8.38*
23036	8580	8.28	8670*	8.27*
27901	7385	(8.0)	8600**	(8.0)**
28712	9980	7.99	9790*	7.92*
29233	7980	8.16	7920**	8.19**
43827	11400	9.35	11690**	9.35**

Porovnáním námi spočítaných hodnot efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení s hodnotami udávanými v práci Bergeron a kol. (2001) lze dospět k závěru, že hodnoty obou veličin jsou ve velmi dobré shodě. Naše hodnoty povrchového gravitačního zrychlení jsou však systematicky vyšší. Důvodem může být jednak skutečnost, že hodnoty z práce Bergeron a kol. (2001) byly počítány jinou metodou za použití paralaxy objektů, jednak nezapočítání všech mechanismů způsobujících rozšíření spektroskopických čar. Rozdíl v hodnotách je patrnější u chladnějších bílých trpaslíků, u kterých může konvekce vynést helium do vyšších vrstev hvězdy a to pak může způsobovat další rozšíření, které v našich výpočtech není zahrnuto, protože započítáváme pouze vodík. Není ani vy-

loučeno, že u chladnějších bílých trpaslíků existuje nějaký další mechanismus rozšíření spektrálních čar, o kterém dosud nevíme.

Velmi dobrá shoda byla dosažena také s prací Kawka & Vennes (2006), přestože se jedná o analýzu spekter pocházejících z odlišných zdrojů. Spektra zpracovávaná v práci Kawka & Vennes (2006) byla získána na Apache Point Observatory (APO), spektra analyzovaná v této práci pocházejí ve všech třech případech z SDSS.

Koester & Knist (2006) považují NLTT 27901 za bílého trpaslíka typu DQ a zastoupení uhlíku v jeho atmosféře určili na $\log\left(\frac{C}{He}\right) = -0.642$. Právě díky tomuto nízkému zastoupení pokládali Kawka & Vennes (2006) tento objekt za bílého trpaslíka typu DC.

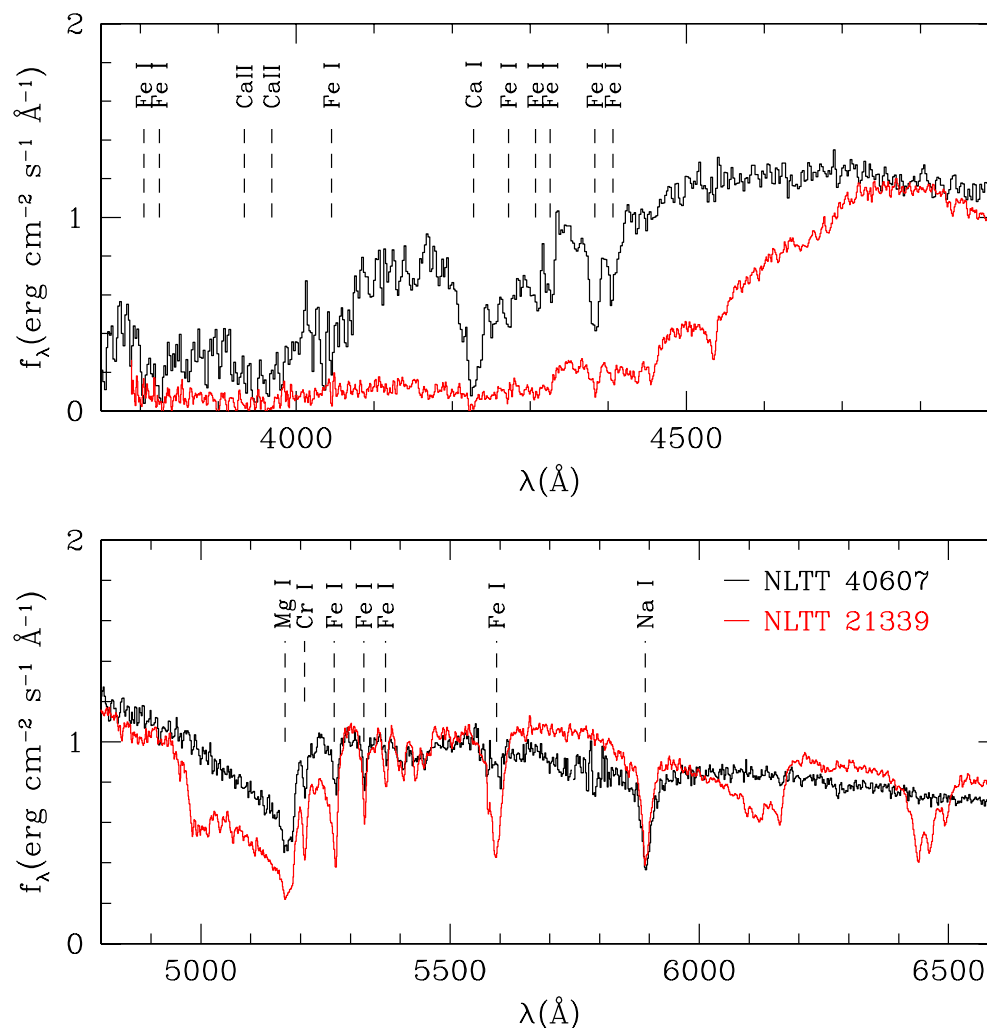
Bílý trpaslík NLTT 33108 je známým zástupcem pulzujících bílých trpaslíků spektrálního typu DA. Nachází se v chladné části (red edge) skupiny objektů ZZ Ceti.

Velmi zajímavým objektem je bílý trpaslík NLTT 5943. Jedná se o horkého bílého trpaslíka typu DQ s poměrně komplikovaným spektrem (viz obrázek 3.3), v němž lze nalézt také čaru $H\alpha$. Teplotu jsme za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ odhadli na 15 000 K, a to porovnáním spektra objektu se sérií spekter na obrázku číslo 1 (a) z práce Liebert a kol. (2003). Jde o velmi vzácný objekt a je zapotřebí jej dále analyzovat, zejména zjistit jaké je zastoupení vodíku a uhlíku v jeho atmosféře.

Tři bílí trpaslíci typu DZ v našem vzorku, NLTT 57760, NLTT 33462 a NLTT 24727, mají ve spektrech pouze čáry vápníku (viz obrázek 3.3). Čáry těžších prvků zde nejsou patrné. Zajímavým objektem je zde NLTT 24727, jehož spektrální klasifikace je DZQ. Ve spektru tohoto bílého trpaslíka jsou velmi nápadné čáry Ca II H a K (3933.66 a 3968.47 Å) a rozeznatelná je také čára Ca I (4226.73 Å). Efektivní teplotu jsme za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ určili na 9000 K. Pro další studium těchto objektů bude potřeba získat zastoupení jednotlivých prvků v jejich atmosférách.

Nejkomplikovanější spektrum má čtvrtý bílý trpaslík typu DZ z našeho vzorku, NLTT 21339 (viz obrázek 3.3). Jedná se o objekt s vysokou metalicitou, v jehož spektru je možné identifikovat čáry Ca I, Na I, Mg I a Fe I. Spektrum tohoto objektu je nápadně podobné spektru bílého trpaslíka NLTT 34344, který je prototypem bílých trpaslíků typu DZ s velkou metalicitou. Na rozdíl od zkoumaného bílého trpaslíka je u NLTT 34344 navíc přítomno slabé magnetické pole (Dufour a kol., 2006). Z podobnosti spekter NLTT 21339 a NLTT 40607, u kterého Kawka a kol. (2004) odhadli efektivní teplotu na hodnotu 7500 K, usuzujeme také na efektivní teplotu 7500 K. Na obrázku 3.6 je pro názornost vykresleno spektrum NLTT 40607 spolu se spektrem bílého trpaslíka NLTT 21339.

V případě bílého trpaslíka NLTT 10072 je zapotřebí získat kvalitnější spektrum objektu s větším poměrem signálu ku šumu, abychom mohli spolehlivě posoudit, zda se skutečně jedná o bílého trpaslíka typu DC, anebo jestli je spektrální čára $H\alpha$ v tomto případě natolik slabá, že ji v našem spektru nejsme schopni zaznamenat. Efektivní teplotu jsme opět určovali za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ a získali jsme hodnotu 5900 K.



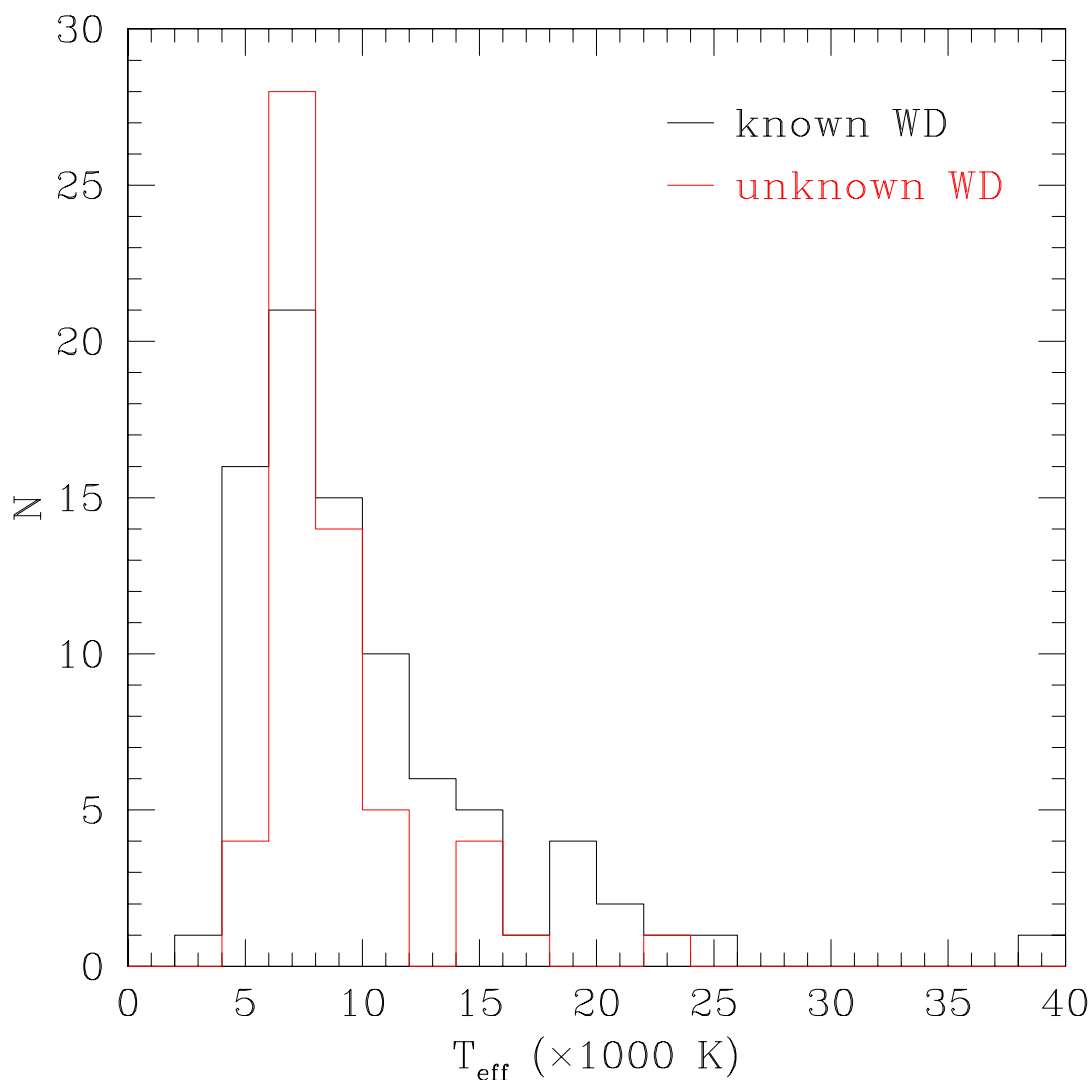
Obrázek 3.6: Srovnání průběhů spekter bílých trpaslíků NLTT 21339 a NLTT 40607 s vyznačením některých spektrálních čar.

3.6 Teplotní rozdělení

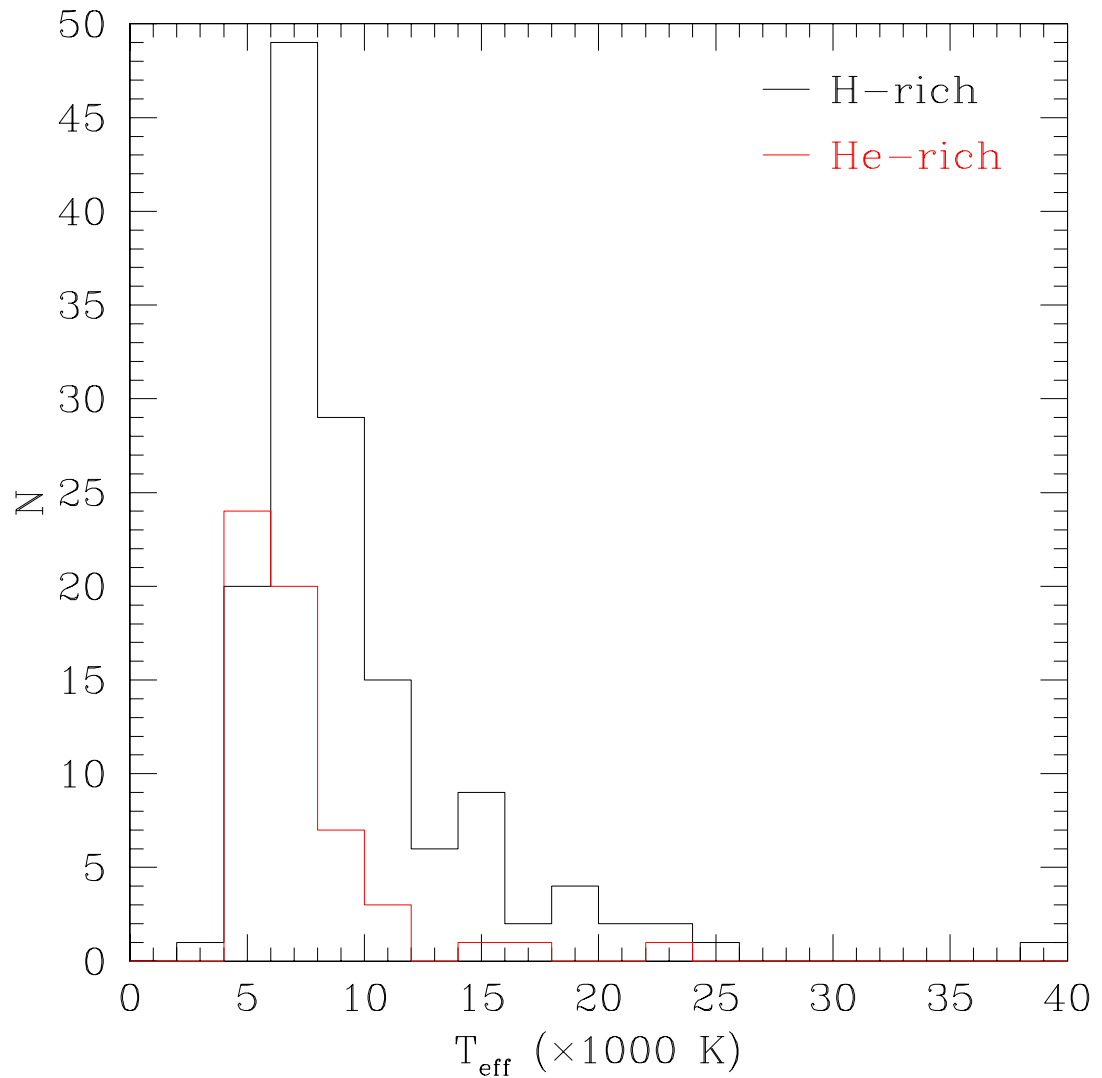
Určili jsme efektivní teploty 56 bílých trpaslíků typu DA a 20 heliových bílých trpaslíků. Rozdělení teplot v našem vzorku bílých trpaslíků typu DA jsme porovnali s teplotním rozdělením bílých trpaslíků typu DA vybraných z katalogu rNLTT, u kterých již byla teplota známa. Výsledné teplotní rozdělení je vykresleno na obrázku 3.7. Obrázek 3.8 znázorňuje teplotní rozdělení všech bílých trpaslíků typu DA v porovnání se všemi bílými trpaslíky bohatými na helium.

Průměrná hodnota efektivní teploty bílého trpaslíka z našeho vzorku je 8 300 K, medián souboru má hodnotu 7 730 K a modus 9 000 K. Pokud bychom započítali také bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení, budou

hodnoty činit popořadě 9 150 K, 7 600 K a 9 000 K. Průměrná hodnota efektivní teploty pro bílé trpaslíky typu DA je 9 530 K, pro heliové 7 260 K, mediány stejných souborů činí postupně 8 150 K a 6 430 K a módy 6 510 K a 9 000 K. Statistické chyby průměrných hodnot efektivních teplot jednotlivých skupin bílých trpaslíků se pohybují okolo hodnoty 390 K. Lze tedy shrnout, že většina zkoumaných bílých trpaslíků jsou spíše chladnější objekty. To je způsobeno metodou výběru kandidátů (Holberg a kol., 2008). Objekty byly vybírány na základě velikosti vlastního pohybu, který je větší pro objekty nacházející se blíže Slunci. Blíže Slunci jsme potom schopni pozorovat chladnější bílé trpaslíky než ve větších vzdálenostech od něj.



Obrázek 3.7: Teplotní rozdělení bílých trpaslíků typu DA. Černá křivka znázorňuje bílé trpaslíky, u nichž byla teplota již známa, červená bílé trpaslíky, u nichž jsme teplotu určili.



Obrázek 3.8: Teplotní rozdělení vodíkových trpaslíků v porovnání s rozdělením trpaslíků heliových. Černá křivka znázorňuje bílé trpaslíky typu DA, červená bílé trpaslíky bohaté na helium.

Kapitola 4

Další vlastnosti bílých trpaslíků

Ze zjištěné efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení a již známé zdánlivé hvězdné velikosti jsme spočítali další charakteristiky bílých trpaslíků z našeho vzorku.

4.1 Hmotnost a stáří

Hmotnost a stáří bílých trpaslíků jsme počítali interpolačním programem, který vytvořila A. Kawka. Program používá vývojové modely z práce Althaus & Benvenuto (1997) a Althaus & Benvenuto (1998). Jedná se o síť modelů pro bílé trpaslíky s uhlíko-kyslíkovým jádrem a vodíkovou obálkou (bílé trpaslíci typu DA) nebo bez ní (helioví bílé trpaslíci) pro hmotnosti od $0.45 M_{\odot}$ do $1.2 M_{\odot}$. Předpokládáme hmotnost vodíkové obálky $\frac{M_{\text{H}}}{M} = 10^{-4}$. Metalicitu používáme sluneční. Objekty s hmotností pod $0.45 M_{\odot}$ jsou počítány s využitím modelů s heliovým jádrem (Benvenuto & Althaus, 1998). Pro bílé trpaslíky s hmotností větší než $1.3 M_{\odot}$ používáme modely s uhlíkovým jádrem z práce Hamada & Salpeter (1961).

4.2 Absolutní hvězdná velikost

Při výpočtu absolutní hvězdné velikosti M_V vycházíme ze vztahu

$$\log f_{\nu}(M_V) = -0.4M_V + \log f_{\nu}(0),$$

kde $f_{\nu}(0) = 3.67 \cdot 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$. Výpočet toku provádíme pro vlnovou délku 5500 \AA a postupnými úpravami dospějeme ke vztahu pro výpočet absolutní hvězdné velikosti

$$M_V = -19.1961 - 2.5 \log H_{\nu} - 2.5 \log \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) + 2.5 \log g, \quad (4.1)$$

kde H_{ν} je Eddingtonův tok. Chybu absolutní hvězdné velikosti stanovujeme užitím vztahu

$$\Delta M_V = 2.5 \sqrt{\left(\frac{\Delta H_{\nu}}{H_{\nu} \ln 10} \right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M \ln 10} \right)^2 + (\Delta \log g)^2}. \quad (4.2)$$

4.3 Vzdálenost

Vzdálenost určíme z Pogsonovy rovnice (1.3). Úpravou dospějeme k vyjádření

$$d = 10^{\left(\frac{5-M_V+V}{5}\right)}. \quad (4.3)$$

Chybu určení vzdálenosti získáme ze vztahu

$$\Delta d = \frac{d}{5} \sqrt{\Delta M_V^2 + \Delta V^2}. \quad (4.4)$$

Tabulka číslo 4.1 shrnuje hmotnosti s chybou jejího určení, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří s chybou pro bílé trpaslíky typu DA. Chyba určení absolutní hvězdné velikosti pro všechny objekty je 0.2 až 0.3 mag a vzdálenosti jsou vypočítány s chybou přibližně 10%. Vlastnosti heliových bílých trpaslíků jsou stejným způsobem shrnuty v tabulce číslo 4.2. Pokud je hodnota hmotnosti v závorce, jedná se o výsledek získaný na základě předpokladu $\log(g) \sim 8.0$.

Abychom byli konzistentní, vypočítali jsme hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří také pro bílé trpaslíky z rNLTT katalogu, u nichž již byla teplota a povrchové gravitační zrychlení známo. V kapitole 8.2 jsou uvedeny shrnující tabulky efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení zvláště pro známé bílé trpaslíky typu DA a pro heliové bílé trpaslíky. V další kapitole dodatků uvádíme vypočítané hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří všech vybraných známých bílých trpaslíků.

Tabulka 4.1: Hodnoty hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří pro bílé trpaslíky typu DA.

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]	zdroj
82	0001–039	0.64±0.06	13.59	43	1.700±0.340	SDSS
347	0005–148	0.71±0.08	14.14	35	2.600±0.570	CTIO
659	0011+000	0.71±0.03	12.63	33	0.920±0.066	SDSS
1374	0023–109	0.32±0.01	9.91	189	0.140±0.008	SDSS
1849	0031+150	0.74±0.08	13.95	36	2.400±0.470	SDSS
2886	0049–308	0.42±0.06	13.42	41	2.000±0.600	CTIO
3022	0052–101	0.64±0.04	12.80	59	0.970±0.100	SDSS
3080	0053–117	0.68±0.06	13.71	21	1.900±0.370	CTIO
5503	0136–042	0.68±0.03	12.40	64	0.760±0.073	CTIO
5943	0144–046	(0.61)	11.26	235	0.200±0.730	CTIO
6794	0159–270	0.97±0.06	14.15	35	3.000±0.210	CTIO
6876	0201–052	0.49±0.02	10.05	181	0.021±0.001	CTIO
7051	0204–306	0.80±0.24	15.06	17	4.800±1.400	CTIO
8432	0233–230	0.55±0.09	13.80	44	1.700±0.580	CTIO

Tabulka 4.1: – pokračování

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]	zdroj
18623	0752+365	0.85±0.05	13.75	24	2.300±0.290	SDSS
19019	0806+294	0.74±0.06	13.88	28	2.300±0.340	SDSS
19311	0816+387	0.78±0.05	13.66	41	2.100±0.260	SDSS
19653	0827+328	1.02±0.04	14.48	18	3.500±0.120	SDSS
20145	0841+457	0.77±0.04	12.99	43	1.300±0.170	SDSS
20165	0842+382	0.69±0.05	13.22	36	1.400±0.230	SDSS
20629	0842+382	(0.59)	13.87	40	1.900±2.100	SDSS
20852	0900+204	0.68±0.06	13.63	47	1.800±0.330	SDSS
21241	0910+410	0.58±0.09	13.62	54	1.600±0.540	SDSS
21338	0913+442	0.75±0.04	13.11	33	1.400±0.180	SDSS
21844	0925+189	0.98±0.05	14.15	31	3.000±0.170	SDSS
22043	0930+294	1.08±0.04	14.15	22	2.800±0.048	SDSS
23036	0955+247	0.77±0.04	13.22	23	1.500±0.180	SDSS
24406	1025+197	0.90±0.10	14.17	38	3.100±0.380	SDSS
24770	1032+216	(0.59)	13.51	60	1.500±2.100	SDSS
26706	1111+339	0.76±0.07	13.28	71	1.600±0.330	SDSS
27781	1131+332	1.14±0.03	14.09	31	2.400±0.012	SDSS
28712	1147+256	0.59±0.03	12.21	55	0.620±0.059	SDSS
28772	1148+544	0.65±0.04	12.41	71	0.750±0.078	SDSS
29233	1157+438	0.69±0.04	13.33	34	1.500±0.220	SDSS
30781	1224+321	0.64±0.10	13.99	36	2.200±0.690	SDSS
32695	1300–005	0.72±0.03	12.30	81	0.730±0.065	SDSS
32785	1302–052	0.54±0.24	14.92	28	4.000±3.500	CTIO
33108	1307+354	0.72±0.03	12.18	50	0.670±0.046	SDSS
33503	1314–153	0.50±0.02	10.98	66	0.150±0.008	CTIO
33669	1316–215	1.11±0.09	15.75	13	5.500±0.550	CTIO
34206	1325+581	0.66±0.08	13.89	35	2.100±0.500	SDSS
34264	1327–013	0.74±0.09	13.70	36	2.100±0.490	SDSS
34623	1334+366	0.58±0.06	13.66	35	1.600±0.360	SDSS
35570	1350–274	0.70±0.06	13.43	46	1.600±0.330	CTIO
38183	1440–144	0.68±0.07	13.97	30	2.300±0.470	CTIO
39605	1510+566	0.65±0.03	12.66	56	0.880±0.076	SDSS
41800	1559+534	0.81±0.09	14.18	29	2.900±0.590	SDSS
42265	1610+166	0.50±0.01	11.01	88	0.160±0.006	SDSS
43827	1653+256	1.31±0.01	14.37	32	1.600±0.000 ^a	SDSS
44269	1707+157	0.78±0.21	14.40	39	3.300±1.200	CTIO
49165	2020–157	0.99±0.10	15.14	28	4.800±0.200	CTIO
50161	2053–274	0.74±0.04	12.90	72	1.200±0.190	CTIO
51252	2123–229	0.62±0.02	11.37	70	0.240±0.013	CTIO

Tabulka 4.1: – pokračování

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]	zdroj
56045	2308–300	0.62 ± 0.05	13.25	45	1.300 ± 0.230	CTIO
56257	2312–149	1.05 ± 0.05	13.81	18	2.300 ± 0.170	CTIO
56493	2317–027	0.32 ± 0.13	14.42	31	4.400 ± 0.370	CTIO

^aNad hmotnost $1.2 M_{\odot}$ je používán stejný čas chladnutí, a proto je chyba nulová.

Tabulka 4.2: Hodnoty hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří pro heliové bílé trpaslíky.

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]	zdroj
4872	0125–236	0.63 ± 0.04	11.01	72	0.160 ± 0.021	CTIO
10072	0307–296	(0.57)	14.20	49	2.800 ± 0.760	CTIO
10358	0312–084	(0.58)	12.59	68	0.840 ± 1.600	CTIO
18746	0756+437	(0.57)	12.93	48	1.100 ± 1.600	SDSS
21339	0913+258	(0.57)	13.20	86	1.400 ± 1.500	SDSS
21660	0921+315	(0.57)	15.23	38	4.300 ± 0.270	SDSS
22620	0945+206	(0.57)	15.37	31	4.500 ± 0.420	SDSS
24727	1031+230	(0.58)	12.59	72	0.840 ± 1.600	SDSS
26653	1110+292	(0.57)	15.37	31	4.500 ± 0.420	SDSS
27901	1132+576	(0.57)	13.26	48	1.500 ± 1.500	SDSS
33462	1313–097	(0.57)	12.77	58	0.990 ± 1.600	CTIO
33797	1318–148	(0.58)	12.59	58	0.840 ± 1.600	CTIO
36245	1403–010	(0.59)	11.15	85	0.170 ± 0.690	CTIO
42995	1629–187	(0.57)	15.37	40	4.500 ± 0.420	CTIO
48777	2006–164	(0.57)	14.37	47	3.000 ± 0.620	CTIO
49007	2015–129	(0.57)	15.23	30	4.300 ± 0.270	CTIO
49170	2021–275	(0.57)	14.46	48	3.200 ± 0.540	CTIO
53210	2210–124	(0.57)	15.10	41	4.100 ± 0.120	CTIO
53302	2212–132	(0.57)	13.53	67	1.800 ± 1.300	CTIO
57760	2340–172	(0.57)	14.29	35	2.900 ± 0.690	CTIO

4.4 Hmotnostní rozdělení

Ze získaných hodnot hmotností bílých trpaslíků jsme na obrázku 4.1 vykreslili rozložení hmotností pro bílé trpaslíky typu DA z našeho vzorku a pro bílé trpaslíky typu DA z rNLTT katalogu, u nich již byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení. Obrázek 4.2 znázorňuje hmotnostní rozdělení všech bílých trpaslíků typu DA v porovnání se všemi bílými trpaslíky bohatými na helium.

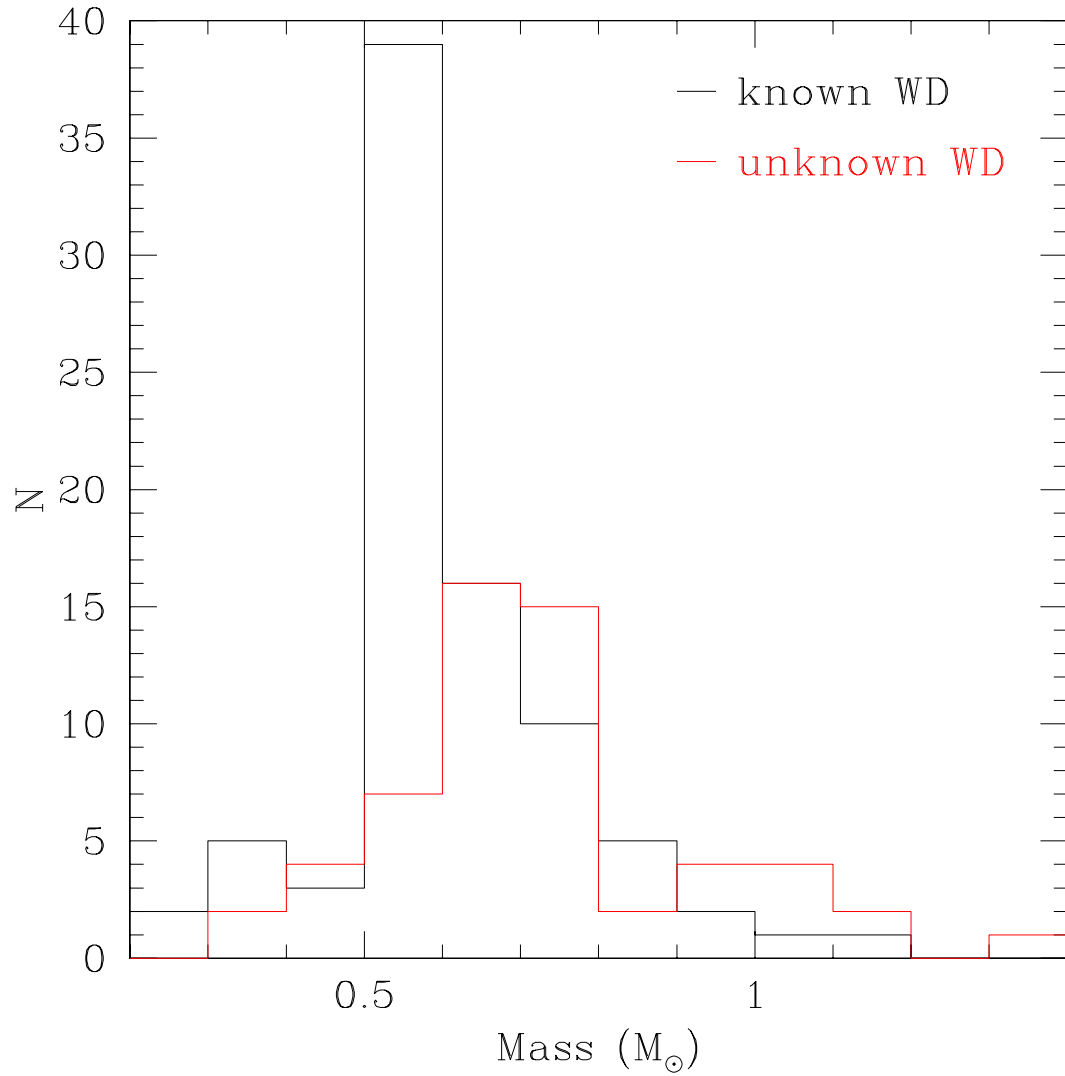
Průměrná hodnota hmotnosti bílého trpaslíka z našeho vzorku je $0.73 M_{\odot}$, medián souboru má hodnotu $0.71 M_{\odot}$ a modus činí $0.74 M_{\odot}$. Pokud bychom započítali také bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení, pak budou hodnoty průměru a mediánu souboru činit shodně $0.67 M_{\odot}$ a modus bude $0.68 M_{\odot}$. Průměrná hmotnost všech zkoumaných bílých trpaslíků typu DA činí $0.67 M_{\odot}$, heliových $0.68 M_{\odot}$, mediány stejných souborů mají hodnoty popořadě $0.66 M_{\odot}$ a $0.69 M_{\odot}$ a mody $0.51 M_{\odot}$ a $0.61 M_{\odot}$. Statistické chyby průměrných hmotností jednotlivých skupin bílých trpaslíků se pohybují okolo hodnoty $0.02 M_{\odot}$. Přičemž při výpočtu průměrů, mediánů a modů všech skupin objektů nebyli započítáni ti bílí trpaslíci, jejichž hodnotu povrchového gravitačního zrychlení jsme předpokládali rovnu $\log(g) = (8.0)$.

Tyto získané hodnoty můžeme porovnat s hodnotami jiných autorů. V práci Holberg a kol. (2008) je udána střední hodnota hmotnosti místní populace bílých trpaslíků $0.665 M_{\odot}$. Statistická chyba této hodnoty je opět přibližně $0.02 M_{\odot}$. Dále získali střední hmotnost bílých trpaslíků typu DA $0.68 M_{\odot}$ a heliových bílých trpaslíků $0.64 M_{\odot}$, tedy ani zde nebyly pro obě skupiny získány výrazně odlišné výsledky. Bergeron a kol. (1992) uvádějí průměrnou hmotnost $0.56 M_{\odot}$ a medián $0.54 M_{\odot}$. Vennes a kol. (1997) dospěli k průměrné hmotnosti pro EUVE vzorek $0.56 M_{\odot}$, a Liebert a kol. (2005) určili průměrnou hmotnost PG vzorku na $0.57 M_{\odot}$.

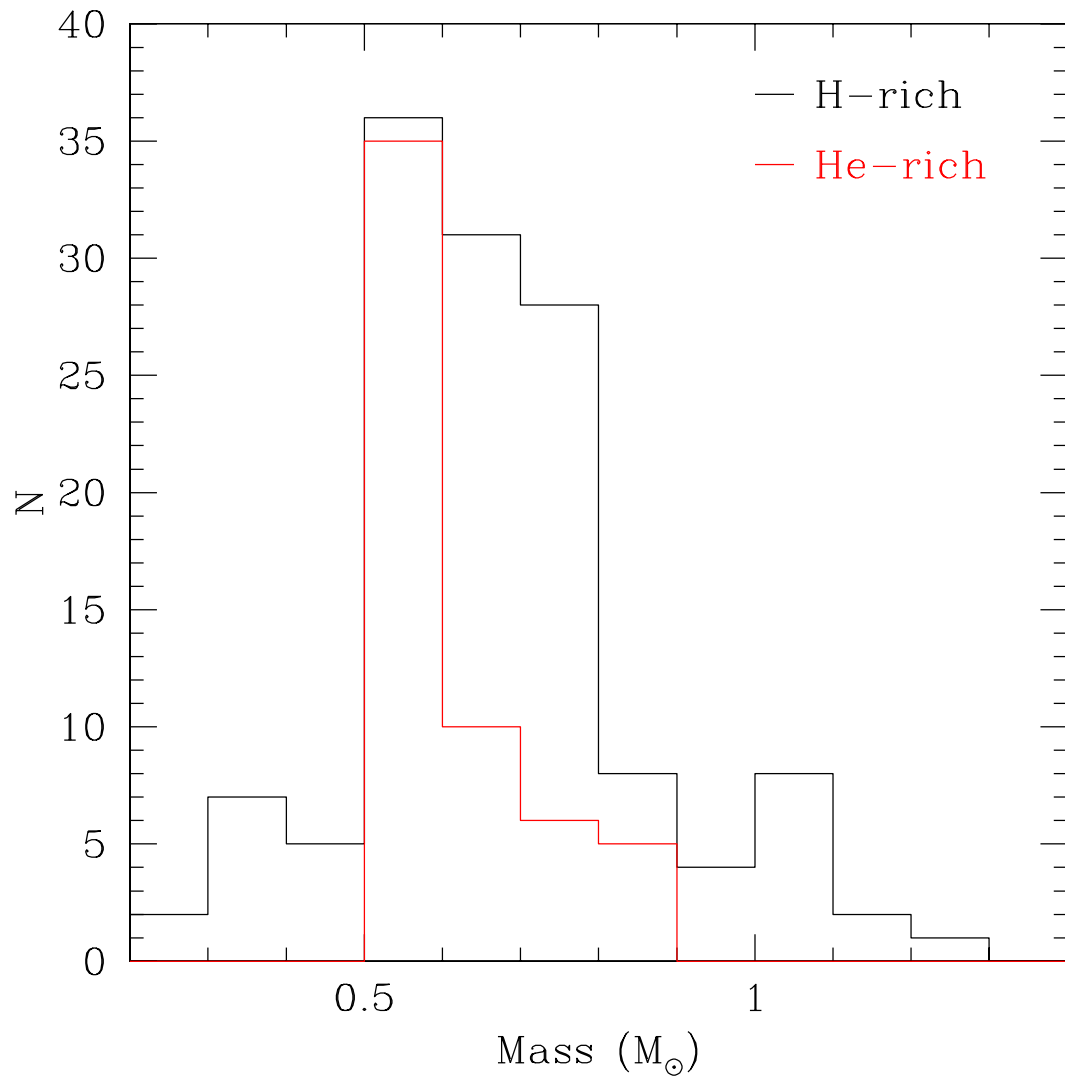
Z porovnání je patrné, že průměrná hmotnost, medián i modus hmotnosti našeho vzorku bílých trpaslíků jsou větší než hodnoty uváděné v literatuře. Pokud budeme uvažovat také bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení, souhlasí již naše průměrná hmotnost $0.67 M_{\odot}$ v rámci chyb velmi dobře s výsledkem $0.665 M_{\odot}$ z práce Holberg a kol. (2008). Příčinou lepší shody je zřejmě větší statistický soubor dat a také podobný charakter obou vzorků bílých trpaslíků. Náš vzorek a vzorek z práce Holberg a kol. (2008) obsahuje spíše chladné bílé trpaslíky, zatímco například Liebert a kol. (2005) nebo Vennes a kol. (1997) zkoumali především objekty s vyšší teplotou.

Na obrázku 4.3 jsou vyneseny závislosti efektivní teploty na logaritmu povrchového gravitačního zrychlení a stáří na hmotnosti. Jsou zde zahrnuti bílí trpaslíci z našeho vzorku i bílí trpaslíci z rNLTT katalogu s již známou teplotou a povrchovým gravitačním zrychlením. Z grafu byly odstraněny ty objekty, jejichž povrchové gravitační zrychlení jsme předpokládali na hodnotu $\log(g) \sim 8.0$.

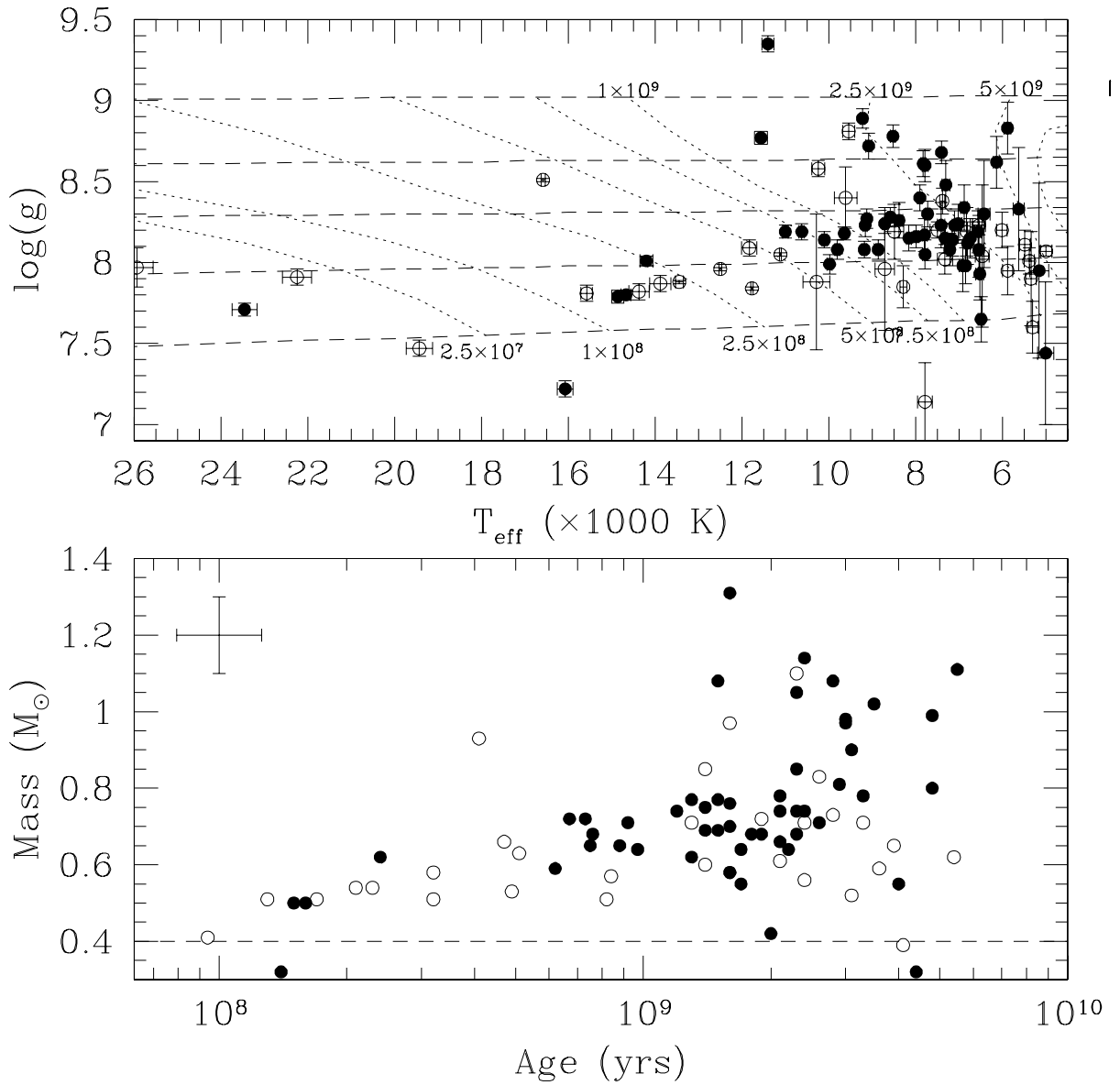
Z rozložení hmotností na obrázku 4.3 lze usuzovat na určitý růst průměrné hmotnosti bílých trpaslíků směrem k chladnějším objektům, kterých je ve vzorku většina. Podobný trend byl zaznamenán také v práci Bergeron a kol. (2006).



Obrázek 4.1: Hmotnostní rozdělení bílých trpaslíků typu DA. Černá křivka znázorňuje bílé trpaslíky, u nichž byla teplota již známa, červená bílé trpaslíky z našeho vzorku.



Obrázek 4.2: Hmotnostní rozdělení vodíkových trpaslíků v porovnání s rozdělením trpaslíků heliových. Černá křivka znázorňuje bílé trpaslíky typu DA, červená bílé trpaslíky bohaté na helium.



Obrázek 4.3: Závislost efektivní teploty na logaritmu povrchového gravitačního zrychlení (horní část obrázku) a závislost stáří na hmotnosti (dolní část obrázku) pro všechny bílé trpaslíky zkoumané v této práci. Vynechány byly pouze objekty, u nichž nebyla známa chyba určení povrchového gravitačního zrychlení. Plnými kolečky jsou vyneseni bílí trpaslíci z našeho vzorku, prázdnými kolečky bílí trpaslíci, u nichž již byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení. V horním obrázku jsou vyneseny chybové úsečky. V dolním obrázku jsou typické chybové úsečky pro hmotnosti a stáří ukázány v levém horním rohu.

Kapitola 5

Kinematika

5.1 Složky rychlosti U , V a W

Kinematiku bílých trpaslíků, u nichž jsme určili efektivní teploty a povrchová gravitační zrychlení, jsme získali pomocí programu S. Vennese, který využívá postup výpočtu z práce Johnson & Soderblom (1987).

Vstupem programu jsou rektascenze a deklinace objektu vždy k ekvinokciu 1950, protože je tento systém používán k definování galaktických souřadnic. Souřadnice k ekvinokciu 1950 jsme vypočítali z katalogizovaných souřadnic objektů k ekvinokciu 2000 pomocí procedury `precess` z balíku `astu` programu IRAF. Získané souřadnice jsme následně převedli do decimálního tvaru. Dalším vstupem jsou celkový vlastní pohyb μ a úhel θ převzaté ze Salim & Gould (2003), námi vypočítaná vzdálenost d a radiální rychlost. Radiální rychlost jsme u všech objektů položili rovnu nule, protože její hodnotu u většiny bílých trpaslíků neznáme. Pokud bychom znali hodnotu radiální rychlosti pro všechny objekty, získali bychom přesnější výsledky a bylo by také možné zjistit dráhy hvězd v Galaxii (Pauli a kol., 2006). Předpoklad nulové radiální rychlosti má nezanedbatelný dopad na získané výsledky. Dochází především k podcenění počtu příslušníků populace tlustého disku a špatnému zařazení hvězd do populace tenkého a tlustého disku (Pauli a kol., 2003). Výstupem programu jsou složky rychlosti U , V a W vzhledem k LSR, jejichž chyba určení je přibližně 10% až 20%.

V tabulce číslo 5.1 jsou shrnuty složky rychlosti pro bílé trpaslíky typu DA. Tabulka číslo 5.2 shrnuje kinematiku heliových bílých trpaslíků. V kapitole 8.4 jsou potom uvedeny složky rychlosti pro bílé trpaslíky, u kterých byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení.

5.2 Závislost složek rychlosti U a V

Z vypočítaných složek rychlosti jsme vykreslili závislost rychlosti U na rychlosti V . Na obrázku 5.1 jsou vyneseny závislosti složek rychlosti pro bílé trpaslíky, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení, a pro bílé trpaslíky typu DA i heliové bílé trpas-

líky z našeho vzorku. Stejnou závislost jsme na obrázku 5.2 vynesli také pro skupinu bílých trpaslíků typu DA v porovnání se skupinou heliových bílých trpaslíků.

V obrázcích jsou také zakresleny 2σ elipsa populace tenkého disku, 2σ elipsa populace tlustého disku a 1σ elipsa populace galaktického hala. Elipsy populace tlustého disku a galaktického hala byly zavedeny v práci Chiba & Beers (2000), kde byly nejprve spočítány střední velikosti složek rychlosti U , V a W a disperze rychlostí (σ_U , σ_V , σ_W) pro pět charakteristických rozsahů metalicit. Pro objekty galaktického hala, jejichž vzdálenost od galaktické roviny je menší než 1 kpc a jejichž metalicita má menší hodnotu než $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.2$, získali Chiba & Beers elipsoid rychlostí protažený v radiálním směru (σ_U , σ_V , σ_W) = $(141 \pm 11, 106 \pm 9, 94 \pm 8)$ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Disperze rychlostí pro objekty tlustého disku, jejichž vzdálenost od galaktické roviny je menší než 1 kpc a metalicita se pohybuje v rozmezí $-0.7 \leq [\text{Fe}/\text{H}] < -0.6$, jsou (σ_U , σ_V , σ_W) = $(46 \pm 4, 50 \pm 4, 35 \pm 3)$ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$. Disperze rychlostí populace tenkého disku byly stanoveny v práci Kawka & Vennes (2006) s výsledkem (σ_U , σ_V , σ_W) = $(34, 22, 19)$ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Tabulka 5.1: Kinematika bílých trpaslíků typu DA.

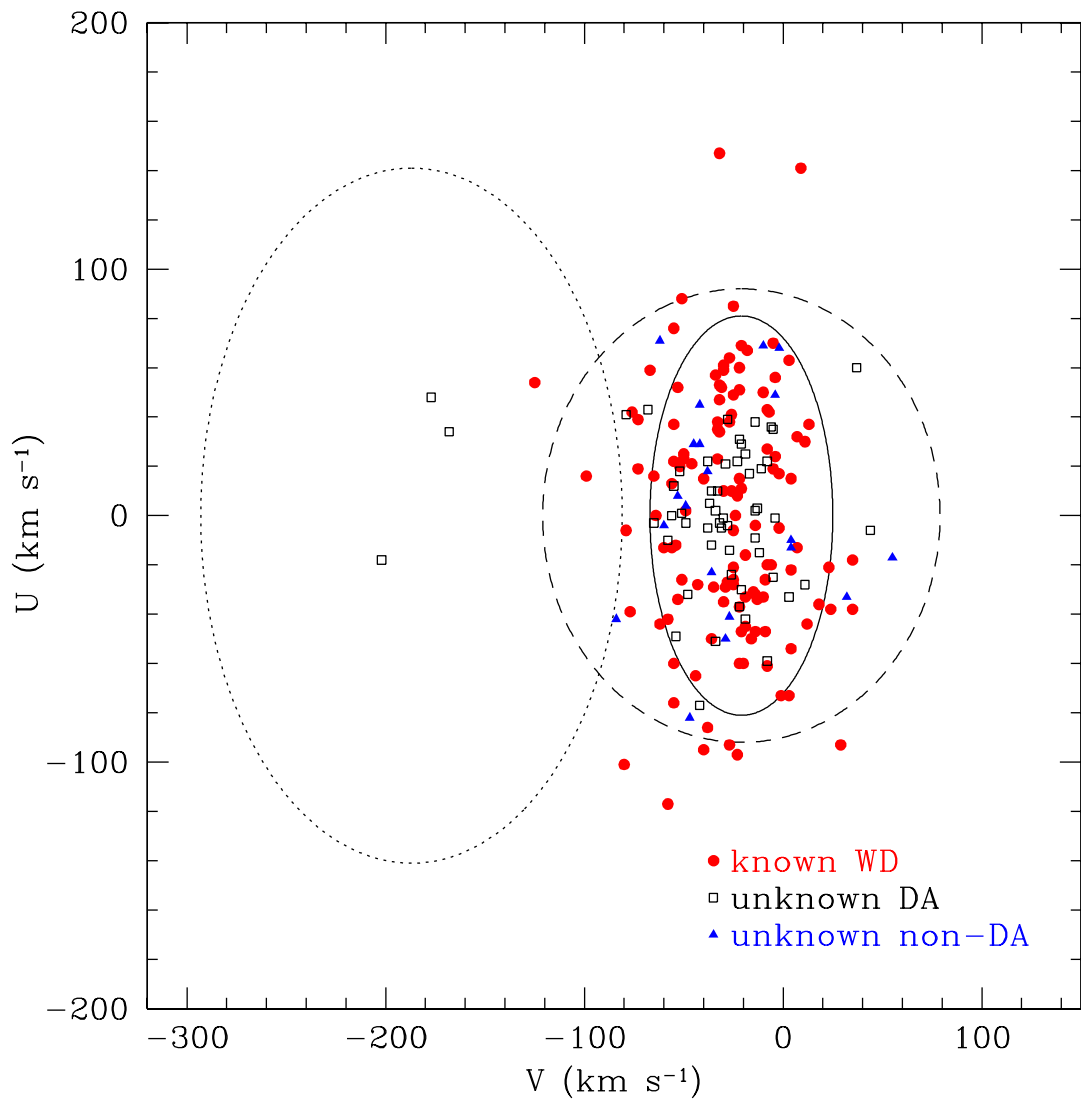
NLTT	WD	μ [arcsec \cdot yr $^{-1}$]	θ [$^\circ$]	U [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]	V [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]	W [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$]	zdroj
82	0001-039	0.237	105.8	-24	-26	-7	SDSS
347	0005-148	0.169	107.6	-9	-14	1	CTIO
659	0011+000	0.459	115.0	-32	-48	-16	SDSS
1374	0023-109	0.218	161.0	48	-177	-52	SDSS
1849	0031+150	0.229	178.0	25	-19	-19	SDSS
2886	0049-308	0.196	147.3	10	-33	9	CTIO
3022	0052-101	0.210	269.0	60	37	6	SDSS
3080	0053-117	0.439	350.0	-6	44	19	CTIO
5503	0136-042	0.187	131.7	-3	-49	0	CTIO
5943	0144-046	0.198	219.1	204	-39	-89	CTIO
6794	0159-270	0.255	101.5	-14	-27	18	CTIO
6876	0201-052	0.245	135.3	-18	-202	-9	CTIO
7051	0204-306	0.266	114.4	3	-13	13	CTIO
8432	0233-230	0.278	141.8	18	-52	16	CTIO
18623	0752+365	0.393	195.0	2	-34	-12	SDSS
19019	0806+294	0.182	113.0	22	-8	23	SDSS
19311	0816+387	0.308	217.0	-12	-36	-30	SDSS
19653	0827+328	0.550	196.0	5	-37	-12	SDSS
20145	0841+457	0.189	197.0	-1	-30	-2	SDSS
20165	0842+382	0.217	152.0	21	-29	17	SDSS
20629	0842+382	0.386	193.9	-3	-65	-9	SDSS
20852	0900+204	0.208	179.3	22	-38	-5	SDSS

Tabulka 5.1: – pokračování

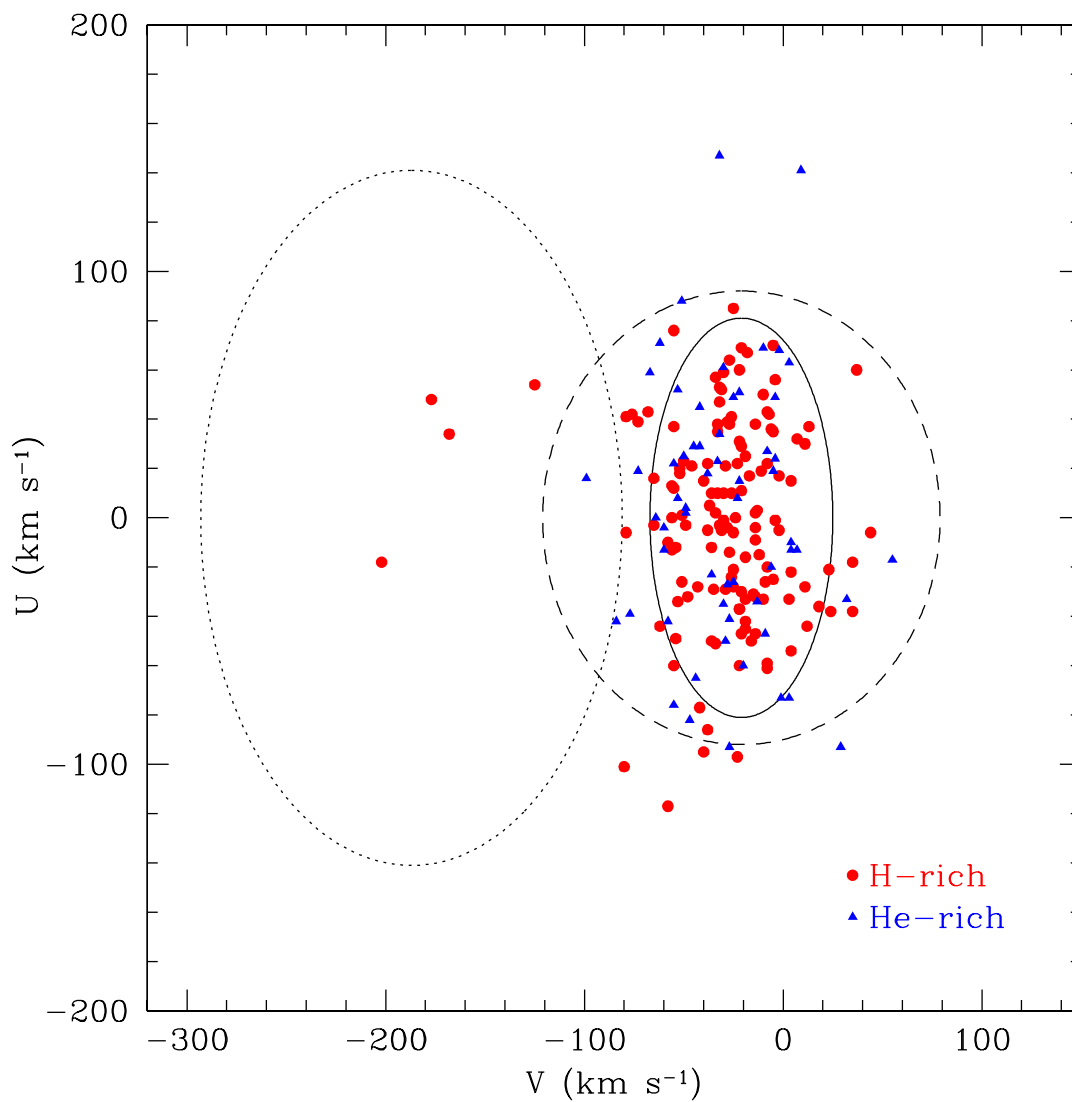
NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]	zdroj
21241	0910+410	0.200	259.0	-25	-5	-29	SDSS
21338	0913+442	0.267	178.0	10	-36	10	SDSS
21844	0925+189	0.302	147.2	39	-28	14	SDSS
22043	0930+294	0.236	220.1	2	-14	-6	SDSS
23036	0955+247	0.420	219.8	-3	-32	-16	SDSS
24406	1025+197	0.383	261.0	-42	-19	-30	SDSS
24770	1032+216	0.260	220.4	-10	-58	-25	SDSS
26706	1111+339	0.178	199.1	12	-55	4	SDSS
27781	1131+332	0.224	166.4	29	-21	12	SDSS
28712	1147+256	0.330	251.2	-49	-54	-13	SDSS
28772	1148+544	0.300	267.0	-77	-42	-14	SDSS
29233	1157+438	0.300	263.0	-30	-21	-1	SDSS
30781	1224+321	0.202	154.5	38	-14	11	SDSS
32695	1300-005	0.190	272.0	-51	-34	12	SDSS
32785	1302-052	0.278	268.7	-15	-12	8	CTIO
33108	1307+354	0.231	275.5	-37	-22	10	SDSS
33503	1314-153	0.710	197.9	34	-168	-129	CTIO
33669	1316-215	0.455	179.8	19	-11	-14	CTIO
34206	1325+581	0.426	301.0	-59	-8	-3	SDSS
34264	1327-013	0.230	176.0	31	-22	-12	SDSS
34623	1334+366	0.283	237.6	-5	-38	18	SDSS
35570	1350-274	0.198	223.5	-5	-31	-11	CTIO
38183	1440-144	0.254	240.5	-4	-28	9	CTIO
39605	1510+566	0.376	218.0	43	-68	66	SDSS
41800	1559+534	0.318	330.0	-33	3	14	SDSS
42265	1610+166	0.220	217.9	41	-79	26	SDSS
43827	1653+256	0.208	165.0	36	-6	-6	SDSS
44269	1707+157	0.196	152.3	35	-5	-17	CTIO
49165	2020-157	0.232	192.3	22	-23	2	CTIO
50161	2053-274	0.171	87.5	-28	11	-37	CTIO
51252	2123-229	0.207	144.2	0	-56	-23	CTIO
56045	2308-300	0.270	148.6	1	-51	-4	CTIO
56257	2312-149	0.186	109.3	-1	-4	1	CTIO
56493	2317-027	0.238	166.3	17	-17	-6	CTIO

Tabulka 5.2: Kinematika heliových bílých trpaslíků.

NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]	zdroj
4872	0125–236	0.305	81.7	–82	–47	29	CTIO
10072	0307–296	0.253	165.5	45	–42	12	CTIO
10358	0312–084	0.234	73.2	–41	–27	52	CTIO
18746	0756+437	0.338	298.3	–17	55	–45	SDSS
21339	0913+258	0.239	136.7	71	–62	42	SDSS
21660	0921+315	0.409	207.3	–4	–60	–23	SDSS
22620	0945+206	0.202	273.9	–13	4	–11	SDSS
24727	1031+230	0.235	257.8	–50	–29	–34	SDSS
26653	1110+292	0.380	208.9	4	–49	–3	SDSS
27901	1132+576	0.232	238.7	–23	–36	7	SDSS
33462	1313–097	0.248	137.6	68	–2	–28	CTIO
33797	1318–148	0.186	144.4	49	–4	–24	CTIO
36245	1403–010	0.259	249.5	–42	–84	18	CTIO
42995	1629–187	0.265	187.3	18	–38	–18	CTIO
48777	2006–164	0.201	103.7	–10	4	–33	CTIO
49007	2015–129	0.377	183.4	29	–42	–10	CTIO
49170	2021–275	0.241	206.7	29	–45	15	CTIO
53210	2210–124	0.351	152.2	8	–53	–29	CTIO
53302	2212–132	0.162	42.3	–33	32	–1	CTIO
57760	2340–172	0.369	229.8	69	–10	12	CTIO



Obrázek 5.1: Závislost složek rychlosti U a V pro tři skupiny bílých trpaslíků. Červeně jsou vyneseni bílí trpaslíci, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení. Černě bílí trpaslíci typu DA z našeho vzorku a modře helioví bílí trpaslíci z našeho vzorku. Plnou čarou je zakreslena 2σ elipsa populace tenkého disku, čárkovaně 2σ elipsa populace tlustého disku a tečkovaně 1σ elipsa populace galaktického hala.



Obrázek 5.2: Závislost složek rychlosti U a V pro všechny bílé trpaslíky typu DA (červeně) a všechny heliové bílé trpaslíky (modře). Plnou čarou je opět zakreslena 2σ elipsa populace tenkého disku, čárkovaně 2σ elipsa populace tlustého disku a tečkovaně 1σ elipsa populace galaktického hala.

5.3 Diskuse příslušnosti bílých trpaslíků ke složkám Galaxie

Obrázek 5.1 názorně potvrzuje závěr, že většina bílých trpaslíků ve slunečním okolí patří k populaci hvězd tenkého disku. Již mnohem menší část objektů, celkem 28 bílých trpaslíků, náleží k populaci tlustého disku.

Bílých trpaslíků, kteří jsou kandidáty na objekty galaktického hala, je celkem 5. Z bílých trpaslíků, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení, jsou kandidáty NLTT 32057 a NLTT 11722. NLTT 32057 je bílým trpaslíkem typu DA, NLTT 11722 typu DQ. NLTT 32057 má efektivní teplotu 4000 K (Bergeron a kol., 1997) a je tedy vážným kandidátem na objekt galaktického hala (např. Kawka a kol., 2004). Bergeron a kol. (2001) se domnívají, že by se mohlo jednat vícenásobný systém. Také NLTT 11722 s efektivní teplotou 6520 K (Dufour a kol., 2005) by ke galaktickému halu mohl patřit. Je však pravděpodobnější, že tento objekt náleží k populaci tlustého disku.

Kandidáty na objekty galaktického hala z našeho vzorku jsou tři bílí trpaslíci, NLTT 6876, NLTT 1374 a NLTT 33503. Ve všech třech případech se jedná o bílé trpaslíky typu DA. NLTT 6876 má efektivní teplotu 23 460 K, NLTT 1374 16 070 K a NLTT 33503 14 860 K, což jsou teploty příliš vysoké na to, aby tyto bílé trpaslíci mohli patřit ke starým objektům nacházejícím se v galaktickém halu. Z toho vyplývá, že v námi studovaném vzorku není žádný bílý trpaslík vážným kandidátem na objekt galaktického hala.

Z obecných výpočtů vyplývá, že v případě dvoudimenzionální Gaussovy křivky náleží do oblasti 2σ elipsy přibližně 86% všech prvků (Kawka a kol., 2004). Proto se uvnitř 2σ elipsy tenkého disku nachází 86% bílých trpaslíků patřících k populaci hvězd tenkého disku a 14% objektů padne vně elipsy. V našem vzorku všech zkoumaných bílých trpaslíků spadá do oblasti 2σ elipsy populace tenkého disku celkem 157 objektů. Těchto 157 objektů představuje oněch 86%. Proto k populaci tenkého disku patří celkem 183 bílých trpaslíků. Zbýlých 13 bílých trpaslíků z celého souboru 196 hvězd náleží k populaci tlustého disku nebo galaktického hala. Tedy přibližně 5% až 7% všech studovaných hvězd patří k populaci tlustého disku.

Kapitola 6

Luminozitní funkce

Luminozitní funkci, tedy počet hvězd o určité zářivosti v objemové jednotce, jsme určovali metodou použitou v práci Boyle (1989) a Schmidt & Green (1983). Program provádějící výpočet byl napsán S. Vennešem a později byl upraven A. Kawkou.

6.1 Postup výpočtu

K výpočtu luminozitní funkce ze všech bílých trpaslíků typu DA zkoumaných v této práci jsme použili námi určenou absolutní hvězdnou velikost M_V . Potom luminozitní funkci $\Phi(M_V)$ z celkového počtu N bílých trpaslíků pozorovaných v m polích určíme ze vztahu

$$\Phi(M_V) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{V'_a} \delta(M_{V_i} - M_V). \quad (6.1)$$

Veličina V'_a je dána vztahem

$$V'_a = \sum_{j=1}^m \frac{\omega_j}{4\pi} \int_0^{z_{max_j}} \exp\left(-\frac{z}{z_0}\right) \left(\frac{dV}{dz}\right) dz, \quad (6.2)$$

kde ω_j je prostorový úhel (ve steradiánech) vymezující j . pole, z je kolmá vzdálenost bílého trpaslíka od galaktické roviny a z_{max_j} je maximální vzdálenost, ve které může být v j . poli bílý trpaslík ještě pozorován.

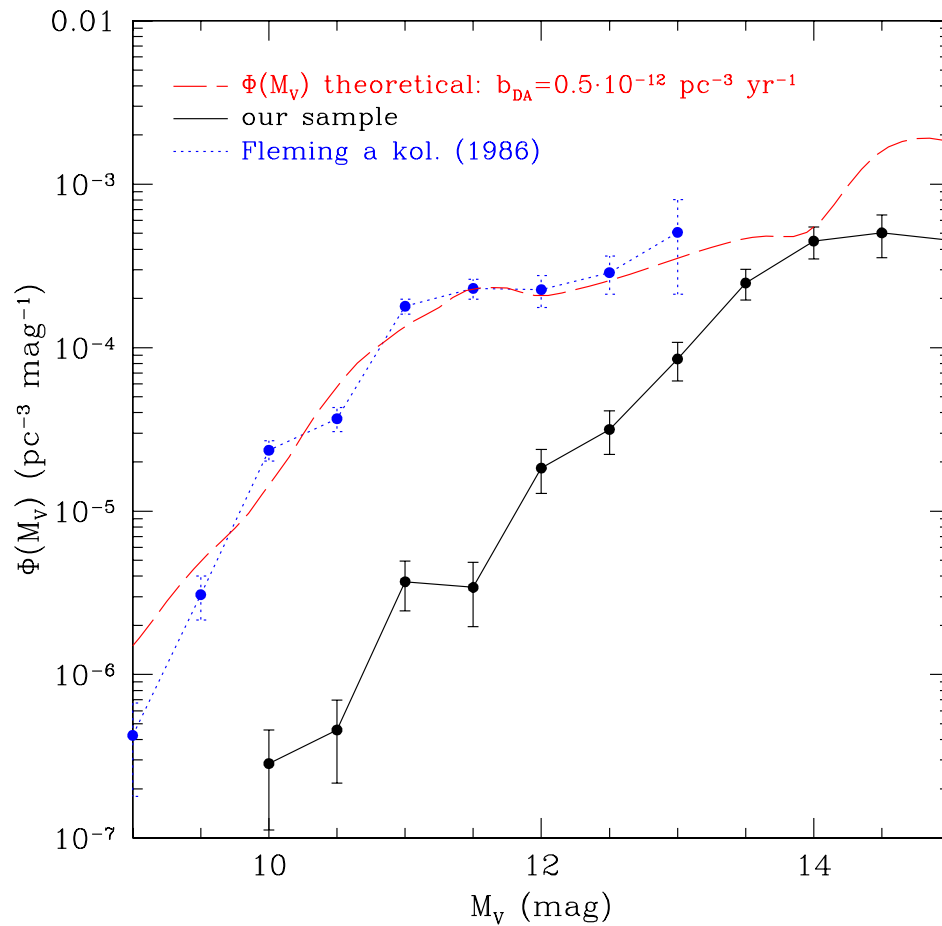
Při výpočtu teoretické luminozitní funkce (Wood, 1992) musíme uvážit funkci počáteční hmotnosti, tempo vzniku hvězd, dobu života hvězdy před stádiem bílého trpaslíka, vztah mezi počáteční a koncovou hmotností a tempo chladnutí bílého trpaslíka.

6.2 Luminozitní funkce pro bílé trpaslíky typu DA

Katalog rNLTT, ze kterého jsme v diplomové práci vycházeli, má pokrytí oblohy 38% (Salim & Gould, 2003). Absolutní hvězdné velikosti objektů se pohybují mezi 10 mag

a 17,5 mag. Největší vzdálenost objektů z celého vzorku všech zkoumaných bílých trpaslíků typu DA je přibližně 70 pc. V úvahu je potřeba vzít také skutečnost, že z celkového počtu přibližně 400 kandidátů jsme z nedostatku dat mohli zkoumat jen asi polovinu celé skupiny.

Získaná luminozitivní funkce pro bílé trpaslíky typu DA je vykreslena na obrázku 6.1. Kvůli velkým chybovým úsečkám, které jsou způsobeny statistikou jednoho bodu, je luminozitivní funkce vynesena pouze do hodnoty absolutní hvězdné velikosti 15 mag. Pro srovnání jsme vykreslili také teoretickou křivku a křivku z práce Fleming a kol. (1986). Luminozitivní funkce z práce Fleming a kol. (1986) končí u absolutní hvězdné velikosti 13 mag, protože zde byli zkoumáni bílí trpaslíci z Palomar-Green Survey, kteří mají vyšší teploty. Hodnoty jednotlivých bodů v obrázku 6.1 jsou číselně shrnuty v tabulce číslo 6.1.



Obrázek 6.1: Luminozitivní funkce pro bílé trpaslíky typu DA. Černě je vynesena luminozitivní funkce celého našeho vzorku bílých trpaslíků, červeně teoretická luminozitivní funkce a modře je zakreslena luminozitivní funkce z práce Fleming a kol. (1986).

Tabulka 6.1: Luminozitní funkce bílých trpaslíků typu DA.

počet hvězd	rozsah M_V [mag]	$\Phi(M_V)$ [$\cdot 10^6 \text{ pc}^{-3} \text{ mag}^{-1}$]
4	9.75–10.25	0.3 ± 0.2
4	10.25–10.75	0.5 ± 0.2
11	10.75–11.25	3.7 ± 1.3
6	11.25–11.75	3.4 ± 1.5
13	11.75–12.25	18 ± 5
12	12.25–12.75	32 ± 9
15	12.75–13.25	85 ± 23
23	13.25–13.75	250 ± 50
21	13.75–14.25	450 ± 100
12	14.25–14.75	500 ± 150
6	14.75–15.25	450 ± 190
1	15.25–15.75	180 ± 180
1	15.75–16.25	460 ± 460

6.3 Diskuse průběhu luminozitní funkce

Z průběhu všech tří křivek je patrné, že se námi získaná luminozitní funkce poměrně liší od zbylých dvou, a to především v oblasti bílých trpaslíků s vyšší teplotou. V oblasti chladnějších hvězd si již námi získaná luminozitní funkce a luminozitní funkce teoretická začínají odpovídat. Příčina menšího počtu horkých hvězd v našem vzorku je dána způsobem výběru kandidátů. Zatímco v případě práce Fleming a kol. (1986) byla kritériem pro výběr hvězdná velikost objektu, v našem případě je tímto kritériem vlastní pohyb a hvězdná velikost bílých trpaslíků. Větší hodnotou vlastního pohybu se vyznačují objekty, které leží blíže ke Slunci. Ve větší blízkosti Slunce jsme ale schopni pozorovat chladnější bílé trpaslíky než ve větší vzdálenosti od něj. Přírodním důsledkem metody je proto výběrový efekt, při němž jsou oproti některým jiným vzorkům zvýhodněny objekty s nižší hodnotou efektivní teploty.

Stanovení stáří galaktického disku z námi získané luminozitní funkce není bohužel možné. Pro tento účel je velikost našeho vzorku bílých trpaslíků příliš malá a především máme ve vzorku malé množství velmi chladných objektů. Je proto zapotřebí pozorovat další kandidáty vybrané z rNLTT katalogu a analyzovat jejich spektra. Také by bylo přínosné zkoumat kandidáty i z jiných katalogů, například z katalogu LSPM (Lépine & Shara, 2005) a dalších.

Kapitola 7

Závěr

7.1 Hlavní výsledky

V této práci jsme studovali celkem 76 spekter bílých trpaslíků, z nichž u 64 objektů dosud nebyly známy žádné fyzikální vlastnosti. Z tohoto celkového počtu 76 objektů bylo 56 bílých trpaslíků typu DA (z toho 2 bílí trpaslíci typu DAP a 1 objekt typu DQA), 11 typu DC, 4 typu DZ, 3 typu DQ a 2 typu DB.

Studovaná spektra byla jednak původní, jednak převzatá. Původní spektra byla napozorována v období od 11. 7. 2007 do 16. 7. 2007 na Cerro Tololo Inter-American Observatory S. Vennešem a A. Kawkou. Převzatá spektra pocházejí ze Sloan Digital Sky Survey, konkrétně z Data Release Six.

Spektra bílých trpaslíků jsme fitovali a získali tak hodnoty efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení. U bílých trpaslíků typu DA jsme vždy získaná spektra porovnávali se sítí modelů a hledali nejmenší hodnotu funkce χ^2 . Tímto způsobem je možné fitovat čáry Balmerovy série vodíku, proto bylo nutné u heliových bílých trpaslíků postupovat jinak. Spektra bílých trpaslíků typu DC a DZ jsme porovnávali s průběhem spektra absolutně černého tělesa za předpokladu $\log(g) \sim 8.0$ (s výjimkou NLTT 21339). K určení teplot bílých trpaslíků typu DQ jsme použili především práci Dufour a kol. (2005). Hodnoty efektivní teploty bílých trpaslíků typu DB jsme převzali z práce Voss a kol. (2007).

Porovnali jsme teplotní rozdělení našeho vzorku bílých trpaslíků s teplotním rozdělením bílých trpaslíků vybraných z katalogu rNLTT, u kterých již byla efektivní teplota známa. Jedná se celkem o 120 objektů, z nichž je 83 bílých trpaslíků typu DA, 28 typu DC, 4 typu DQ, 3 typu DZ, 1 typu DB a 1 je bílý trpaslík typu DBA. Vykreslili jsme teplotní rozdělení obou skupin bílých trpaslíků typu DA a teplotní rozdělení vodíkových trpaslíků v porovnání s rozdělením trpaslíků heliových. Z obrázku 3.8 je patrné, že efektivní teplota bílých trpaslíků typu DA je průměrně vyšší (průměrná hodnota 9 530 K, medián 8 150 K a modus 6 510 K) než teplota heliových bílých trpaslíků (průměrná hodnota 7 260 K, medián 6 430 K a modus 9 000 K). Nejvyšší efektivní teplotu jsme v našem vzorku zjistili u bílého trpaslíka NLTT 6876, $T_{\text{eff}} = (23460 \pm 290)$ K, nejnižší u objektů NLTT 22620, NLTT 26653 a NLTT 42995, $T_{\text{eff}} = (4800 \pm 300)$ K. Průměrná hodnota efektivní teploty

bílého trpaslíka z našeho vzorku je 8 300 K, medián souboru má hodnotu 7 730 K a modus 9 000 K. Pro všechny studované objekty budou hodnoty činit popořadě 9 150 K, 7 600 K a 9 000 K. Statistické chyby průměrných hodnot efektivních teplot jednotlivých skupin bílých trpaslíků se pohybují okolo hodnoty 390 K. Poměrně nižší efektivní teplota studovaných bílých trpaslíků je důsledkem výběru kandidátů na základě velikosti vlastního pohybu.

Ze znalosti efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení jsme určili další fyzikální vlastnosti bílých trpaslíků. Hmotnost a stáří bílých trpaslíků jsme počítali interpolačním programem, který pracuje se sítí modelů pro bílé trpaslíky s uhlíko-kyslíkovým jádrem a vodíkovou obálkou (bílé trpaslíci typu DA) nebo bez ní (heliové bílé trpaslíci) pro hmotnosti od $0.45 M_{\odot}$ do $1.2 M_{\odot}$. Absolutní hvězdnou velikost jsme stanovili ze vztahu 4.1 a vzdálenost z úpravy Pogsonovy rovnice (4.3). Hmotnost, absolutní hvězdnou velikost, vzdálenost a stáří jsme spočítali pro náš vzorek bílých trpaslíků, ale, abychom byli konzistentní, také pro bílé trpaslíky, jejichž efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení již bylo známo.

Získané hodnoty hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří pro bílé trpaslíky z rNLTT katalogu, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, můžeme porovnat s hodnotami hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří, ke kterým dospěli jiní autoři. U většiny objektů souhlasí vypočítané vlastnosti poměrně dobře s pracemi Kawka & Vennes (2006), Kawka a kol. (2007) a také s Beauchamp a kol. (1999), Bergeron a kol. (1997), Bergeron a kol. (2001), Bragaglia a kol. (1995), Dufour a kol. (2007), Koester a kol. (2001) a Liebert a kol. (2005). Nejvíce se vždy liší hodnoty stáří bílých trpaslíků. Používali jsme stejné hodnoty efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení, proto jsou odlišnosti způsobeny použitím rozdílných vývojových modelů.

Vykreslili jsme hmotnostní rozdělení pro bílé trpaslíky typu DA z našeho vzorku a pro bílé trpaslíky typu DA, u nichž již byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, a hmotnostní rozdělení všech bílých trpaslíků typu DA v porovnání se všemi bílými trpaslíky bohatými na helium. Také jsme vynesli závislosti efektivní teploty na logaritmu povrchového gravitačního zrychlení a stáří na hmotnosti. Nejhmotnějším bílým trpaslíkem v našem vzorku je NLTT 43827 s hmotností $(1.31 \pm 0.01) M_{\odot}$, nejmenší hmotnost, $(0.32 \pm 0.01) M_{\odot}$, má bílý trpaslík NLTT 1374. Průměrná hodnota hmotnosti bílého trpaslíka z našeho vzorku je $0.73 M_{\odot}$, medián souboru má hodnotu $0.71 M_{\odot}$ a modus činí $0.74 M_{\odot}$. Pokud bychom započítali také bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, pak budou hodnoty průměru a mediánu souboru činit shodně $0.67 M_{\odot}$ a modus bude $0.68 M_{\odot}$. Průměrná hmotnost všech zkoumaných bílých trpaslíků typu DA činí $0.67 M_{\odot}$, heliových $0.68 M_{\odot}$, mediány stejných souborů mají hodnoty popořadě $0.66 M_{\odot}$ a $0.69 M_{\odot}$ a mody $0.51 M_{\odot}$ a $0.61 M_{\odot}$. Statistické chyby průměrných hmotností jednotlivých skupin bílých trpaslíků se pohybují okolo hodnoty $0.02 M_{\odot}$. Průměrná hmotnost, medián i modus hmotnosti našeho vzorku bílých trpaslíků jsou větší než hodnoty uváděné v literatuře. Pokud budeme uvažovat také bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, souhlasí již naše průměrná hmotnost $0.67 M_{\odot}$ velmi dobře s výsledkem $0.665 M_{\odot}$ z práce Holberg a kol. (2008). Příčinou lepší shody je zřejmě větší statistický

soubor dat a také podobný charakter obou vzorků bílých trpaslíků.

Vypočítali jsme složky rychlosti U , V a W vzhledem k LSR pro bílé trpaslíky z našeho vzorku i pro bílé trpaslíky z rNLTT katalogu, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení. Pro výpočet rychlostí bylo zapotřebí znát u každého objektu rektascenzi a deklinaci k ekvinokciu 1950, celkový vlastní pohyb μ a úhel θ , námi vypočítanou vzdálenost d a radiální rychlost, kterou jsme u všech objektů položili rovnu nule. Tento předpoklad má ale nezanedbatelný vliv na získané výsledky (Pauli a kol., 2003).

Získané hodnoty složek rychlosti vzhledem k LSR můžeme porovnat se složkami rychlosti uvedenými v literatuře. Kinematikou bílých trpaslíků se zabývá práce Kawka & Vennes (2006), ve které jsou uvedeny hodnoty U , V a W pouze pro několik málo bílých trpaslíků, které jsme v této práci zkoumali. Hodnoty složek rychlosti jsou ve velmi dobré shodě. Rychlosti se mezi sebou neliší o více než $3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Vynesli jsme závislost rychlosti U na rychlosti V pro bílé trpaslíky, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, a pro bílé trpaslíky typu DA i heliové bílé trpaslíky z našeho vzorku. Stejnou závislost jsme vykreslili pro skupinu bílých trpaslíků typu DA v porovnání se skupinou heliových bílých trpaslíků. V obrázcích 5.1 a 5.2 je zakreslena také 2σ elipsa populace tenkého disku, 2σ elipsa populace tlustého disku a 1σ elipsa populace galaktického hala.

Z obou obrázků plyne, že většina bílých trpaslíků ve slunečním okolí patří k populaci hvězd tenkého disku. Celkem k populaci hvězd tenkého disku náleží 183 objektů. Zbýlých 13 bílých trpaslíků patří k populaci tlustého disku nebo galaktického hala. Bílých trpaslíků, kteří jsou kandidáty na objekty galaktického hala, je celkem 5. NLTT 32057 i NLTT 11722, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení, jsou velmi dobrými kandidáty. Kandidáty na objekty galaktického hala z našeho vzorku jsou tři objekty, NLTT 6876, NLTT 1374 a NLTT 33503. Ve všech třech případech se jedná o bílé trpaslíky typu DA. NLTT 6876, NLTT 1374 i NLTT 33503 mají ale příliš vysoké efektivní teploty, než aby mohli patřit ke starým objektům nacházejícím se v galaktickém halu. Z toho vyplývá, že v námi studovaném vzorku bílých trpaslíků není žádný vážným kandidátem na objekt galaktického hala.

Luminozitní funkci, tedy počet hvězd o určité zářivosti v objemové jednotce, jsme počítali pomocí vztahu 6.1 a vykreslili jsme ji na obrázku 6.1. Její průběh jsme porovnali s průběhem teoretické luminozitní funkce a luminozitní funkce z práce Fleming a kol. (1986) a diskutovali jsme rozdíly mezi křivkami. Stáří galaktického disku není z našeho vzorku bílých trpaslíků bohužel možno stanovit.

Náš vzorek zkoumaných bílých trpaslíků čítá celkem 76 objektů. Z toho je 56 bílých trpaslíků typu DA, což představuje přibližně 73%. Tento podíl bílých trpaslíků je přibližně ve shodě s hodnotou 67%, která pochází z práce Kawka & Vennes (2006), a kolem níž se udávané hodnoty pohybují nejčastěji. Podíl bílých trpaslíků typu DC v našem vzorku je přibližně 15%, což poměrně dobře odpovídá 13% udávaným opět v Kawka & Vennes (2006). Zastoupení bílých trpaslíků typu DB je zhruba 3%, což je hodnota menší než udávaných 7% (Kawka & Vennes, 2006). Podíl bílých trpaslíků typu DQ činí přibližně 5% a DZ přibližně 4%, což odpovídá hodnotám popořadě 8% a 5%, ke kterým dospěli Kawka & Vennes (2006).

Pokud budeme uvažovat všechny bílé trpaslíky zkoumané v této práci, jedná se o vzorek

celkem 196 hvězd. Z toho připadá na bílé trpaslíky typu DA přibližně 71%, na bílé trpaslíky typu DC přibližně 20%, na bílé trpaslíky typu DB zhruba 1%, na bílé trpaslíky typu DZ přibližně 4% a na bílé trpaslíky typu DQ také přibližně 4% objektů.

Podarilo se nám přispět novými objekty ke vzorku bílých trpaslíků ve slunečním okolí a rozšířit znalosti o jeho členech. Z původní skupiny 76 neznámých bílých trpaslíků se nacházejí 4 ve vzdálenosti do 20 pc od Slunce. Jsou to NLTT 7051 ve vzdálenosti 17 pc, NLTT 19653 ve vzdálenosti 18 pc, NLTT 33669 vzdálený 13 pc a NLTT 56257 ve vzdálenosti 18 pc. Ve všech čtyřech případech se jedná o bílé trpaslíky typu DA. Tři objekty pocházejí z pozorování na CTIO, jeden (NLTT 19653) byl převzat z SDSS. Bergeron a kol. (2001) získali trigonometrickou paralaxu bílého trpaslíka NLTT 19653, která odpovídá vzdálenosti 22 ± 2 pc. Tato hodnota je v rámci chyb ve shodě s námi určenou vzdáleností 18 ± 2 pc, větší váhu má však výsledek získaný na základě znalosti paralaxy.

Dále jsme pro celkem 28 objektů ze slunečního okolí, u nichž již byla známa hodnota efektivní teploty a povrchového gravitačního zrychlení, určili další vlastnosti, a to hmotnost, absolutní hvězdnou velikost, vzdálenost, stáří a složky rychlosti U , V a W vzhledem k LSR. Katalog rNLTT je tedy poměrně vhodný ke studiu bílých trpaslíků ve slunečním okolí.

7.2 Úkoly do budoucna

Velmi žádoucí by bylo získat spektroskopická pozorování většího vzorku bílých trpaslíků. Výběrem kandidátů z rNLTT katalogu na základě zjednodušeného diagramu vlastních pohybů hvězd a za použití opticko-infračerveného diagramu jsme dospěli k mnohem větší skupině objektů čítající přibližně 400 bílých trpaslíků, než jakou jsme mohli v této práci zkoumat. Těchto asi 200 zbylých kandidátů na bílé trpaslíky je zapotřebí napozorovat a získat jejich spektra. Takovýmto rozšířením vzorku zkoumaných bílých trpaslíků bychom byli schopni dospět k přesnějším výsledkům.

Například bychom získali lepší statistiku příslušnosti objektů k jednotlivým složkám Galaxie. Bylo by možné objevit další kandidáty na objekty galaktického hala, kteří jsou přínosní pro výzkum Galaxie, a kteří se bohužel v našem původním vzorku bílých trpaslíků nevyskytli.

Zvětšení vzorku bílých trpaslíků by také velmi pomohlo zpřesnit průběh luminozitní funkce pro bílé trpaslíky typu DA a pokud by byl vzorek dostatečně rozsáhlý a obsahoval by dostatečné množství velmi chladných objektů, byli bychom pak schopni stanovit z průběhu luminozitní funkce i stáří galaktického disku.

Také by bylo výhodné získat kvalitnější spektra s větším poměrem signálu ku šumu některých bílých trpaslíků, kteří jsou již v našem vzorku obsaženi. Pak bychom například u objektu NLTT 10072 byli schopni jednoznačně určit, zda se jedná o bílého trpaslíka typu DA nebo DC.

Od vzácných objektů jako je horký bílý trpaslík NLTT 5943 s komplikovaným spektrem by bylo užitečné získat více dat a mnohem více je analyzovat, například zjistit zastoupení jednotlivých prvků v atmosféře hvězdy.

Pro všechny bílé trpaslíky zkoumané v této práci by bylo vhodné naměřit radiální rych-

losti. Potom bychom mohli radiální rychlost zahrnout do našich výpočtů a získat o kinematice zkoumaných objektů více informací bez nežádoucího ovlivnění.

Abychom potvrdili vypočítané vzdálenosti bílých trpaslíků ve slunečním okolí, potřebujeme získat jejich trigonometrické paralaxy. Ty by nám mohl poskytnout astrometrický satelit Gaia, který by měl velmi přesně měřit paralaxy objektů až do hvězdné velikosti 20 mag (Torres a kol., 2005; Jordan, 2007).

Poměrně velkými chybami jsou v naší práci zatíženy efektivní teploty heliových bílých trpaslíků. To je způsobeno metodou jejich výpočtu. Přesnější hodnoty bychom získali, pokud bychom tyto objekty analyzovali pomocí heliových modelů. Na těchto modelech však v současné době teprve pracujeme.

Kapitola 8

Dodatky

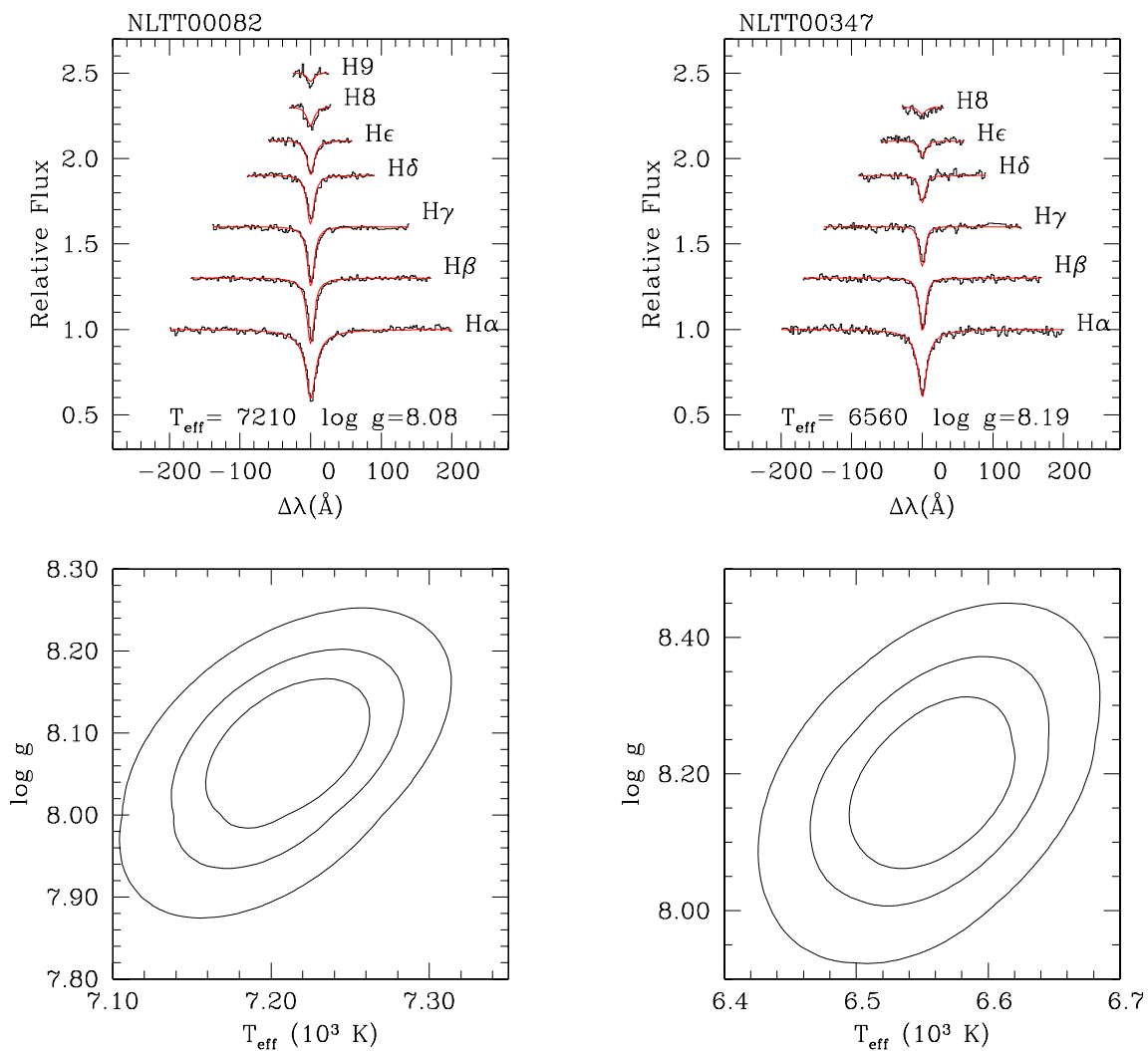
V první části dodatků je vykreslena kompletní sada fitovaných spekter bílých trpaslíků typu DA z našeho vzorku. Ve vrchní části obrázků jsou vždy proloženy čáry Balmerovy série vodíku, v dolní části obrázků je vykreslena funkce χ^2 . Jednotlivé kontury představují chyby σ (68%), 2σ (95%) a 3σ (99%). Odlišnost funkce χ^2 u bílého trpaslíka NLTT 56493 je způsobena především malým počtem spektrálních čar, které bylo možno fitovat.

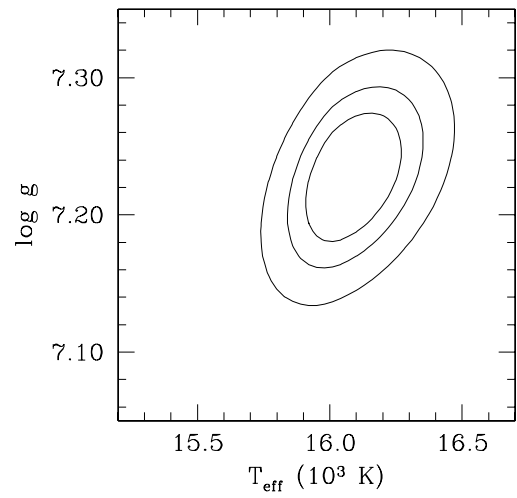
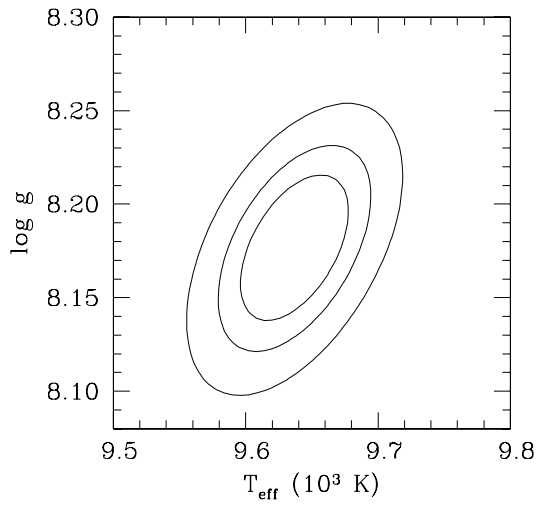
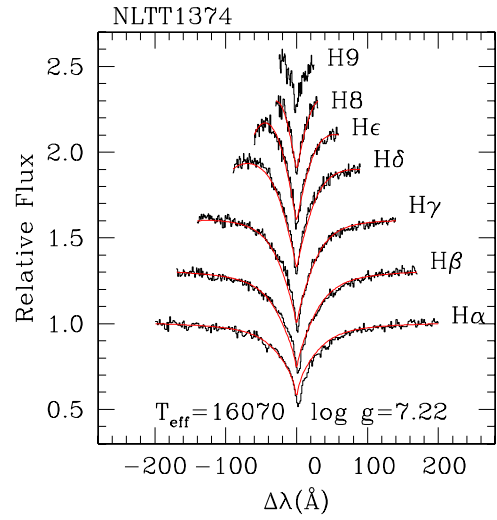
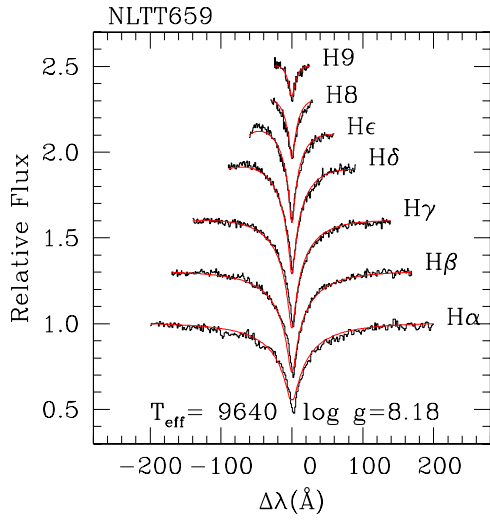
Další část dodatků obsahuje výčet převzatých hodnot efektivní teploty, povrchového gravitačního zrychlení a zdánlivé hvězdné velikosti objektů zvláště pro známé bílé trpaslíky typu DA a zvláště pro známé heliové bílé trpaslíky.

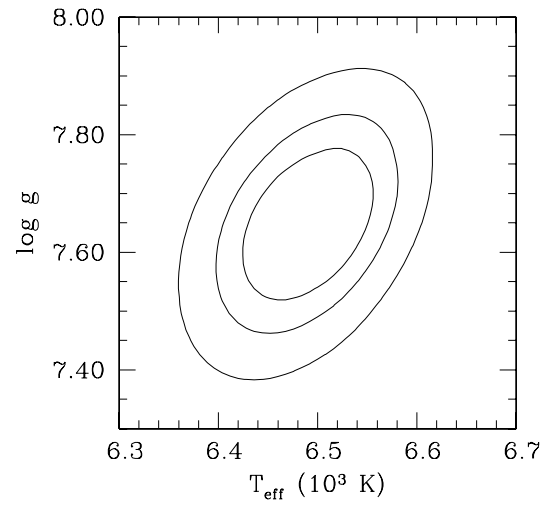
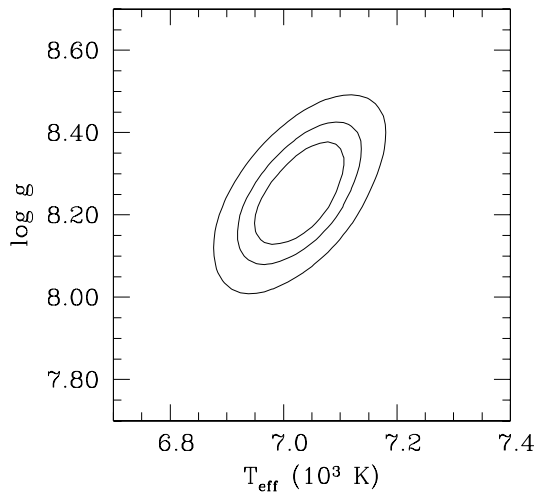
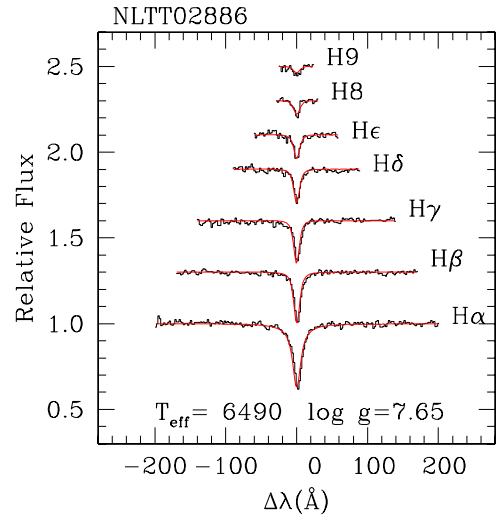
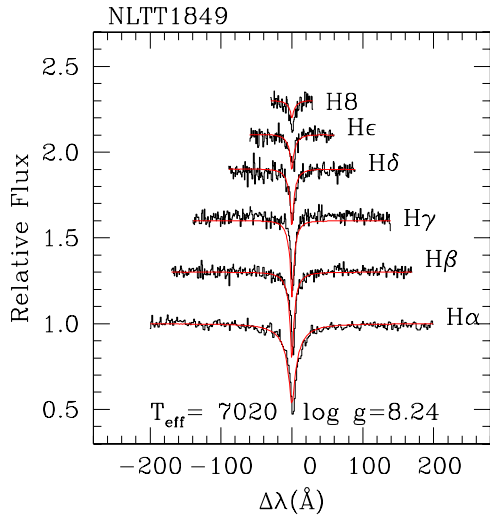
Ve třetí kapitole dodatků uvádíme námi spočítané hodnoty hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří pro všechny bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa efektivní teplota a povrchové gravitační zrychlení.

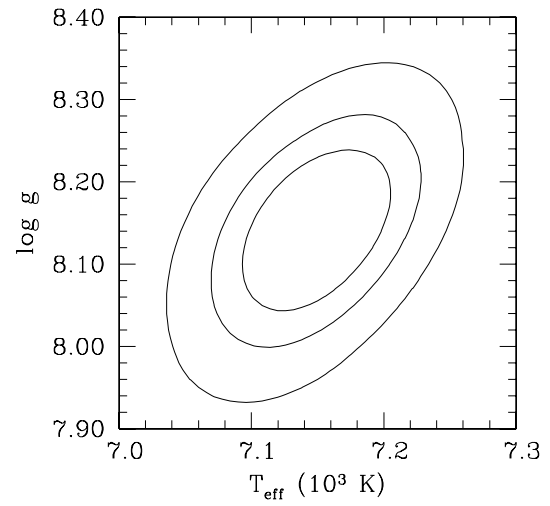
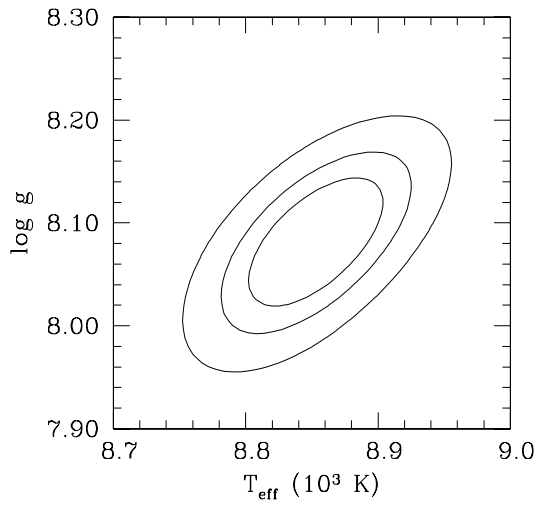
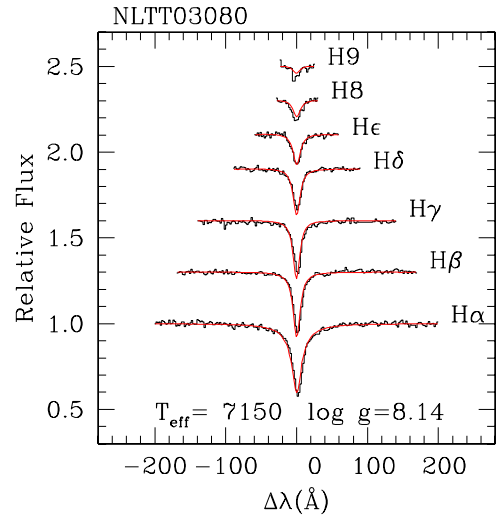
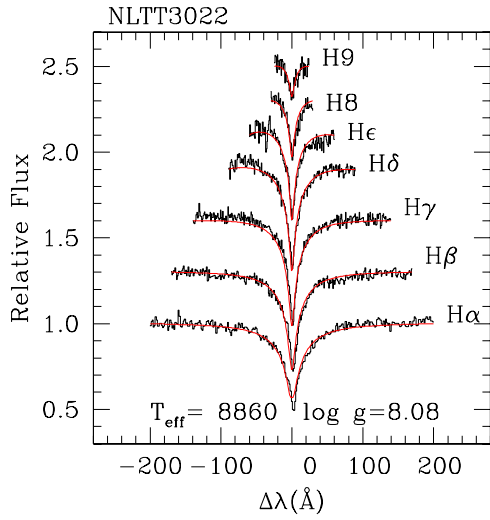
Pro stejný vzorek bílých trpaslíků jsou v poslední části dodatků shrnuty celkový vlastní pohyb μ a úhel θ převzaté ze Salim & Gould (2003) a námi určené hodnoty složek rychlosti U , V a W vzhledem k LSR.

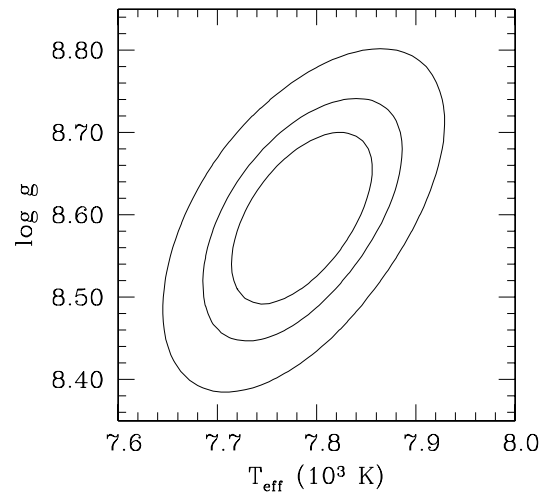
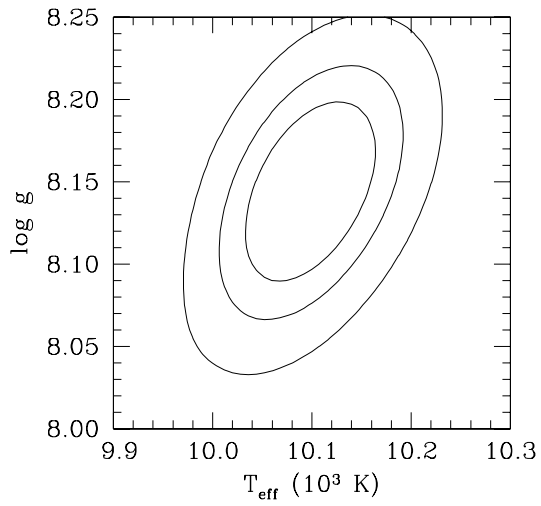
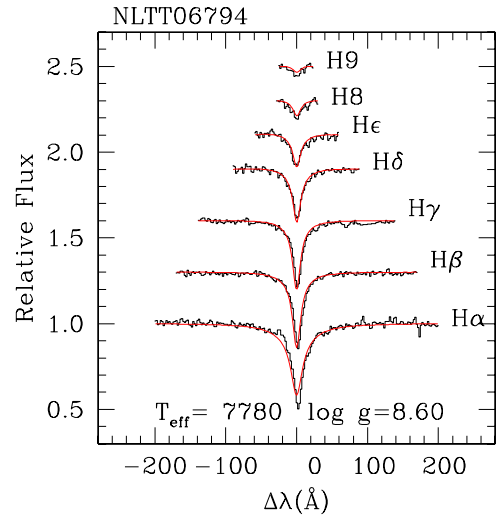
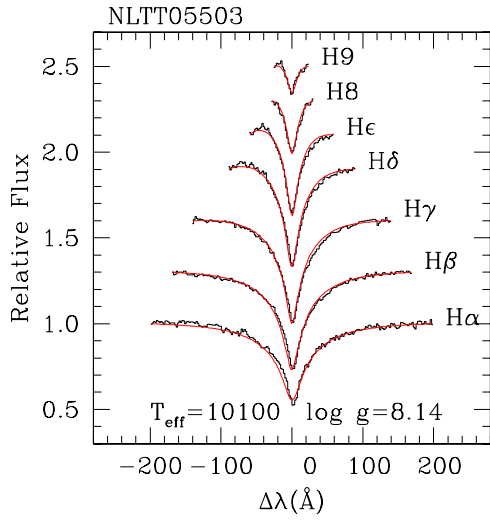
8.1 Analýza spekter bílých trpaslíků typu DA

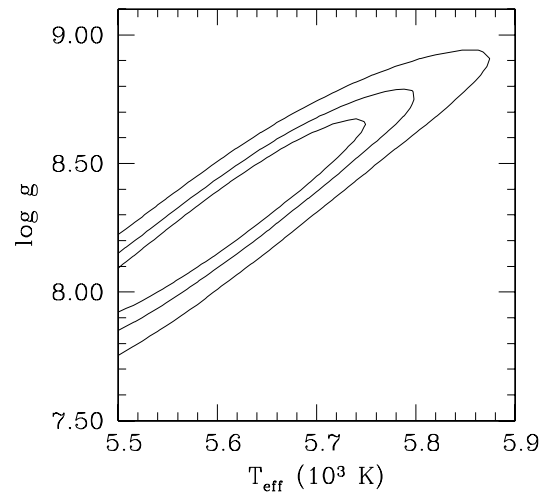
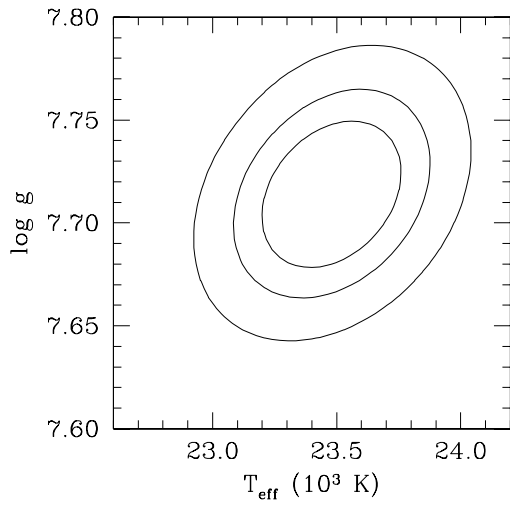
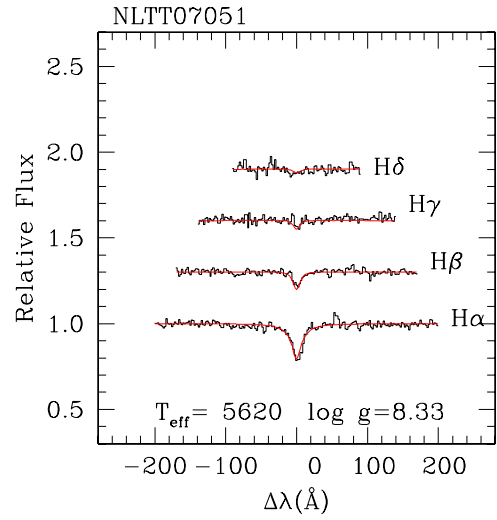
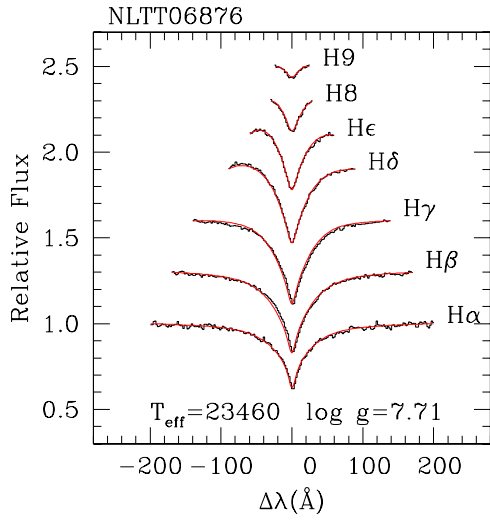


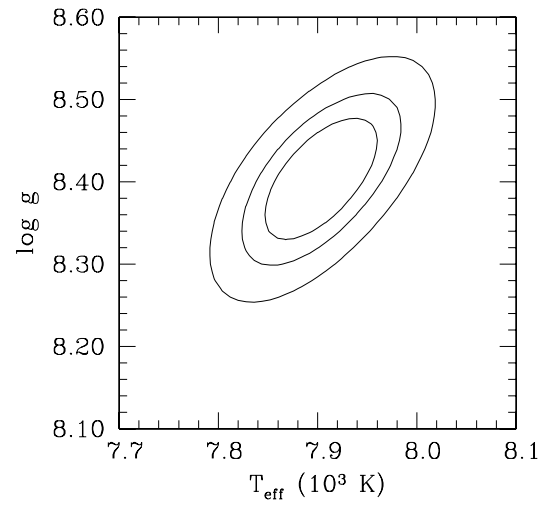
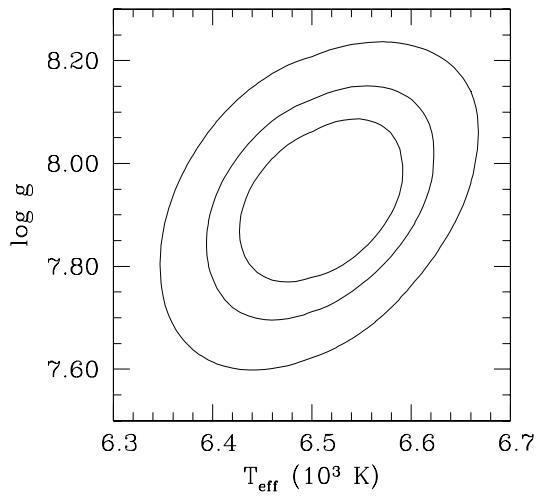
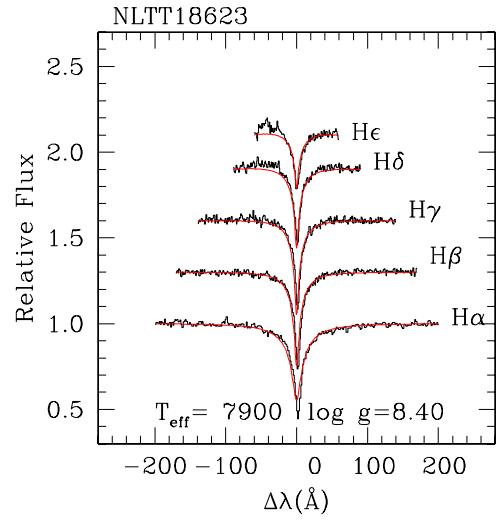
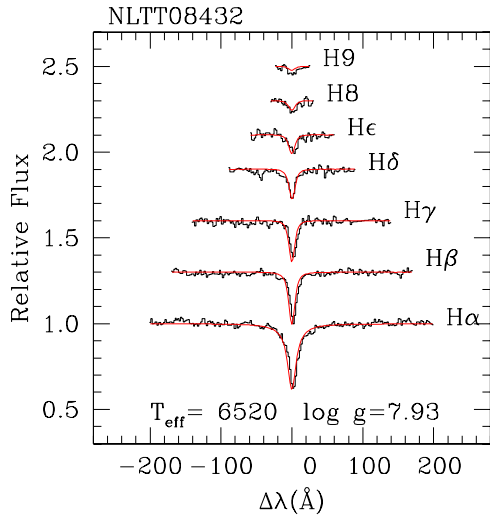


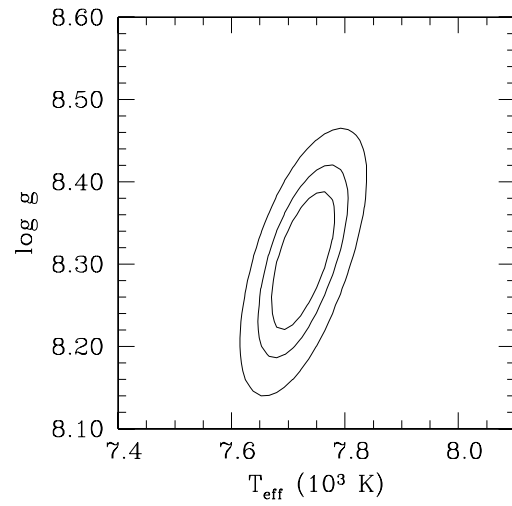
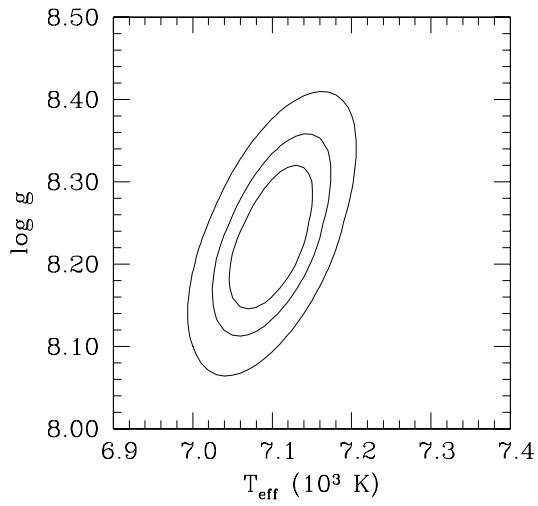
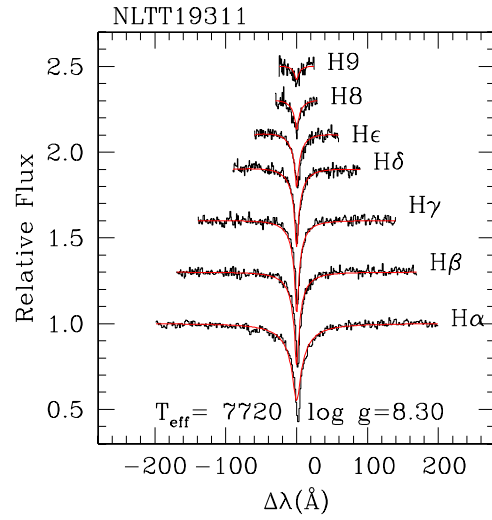
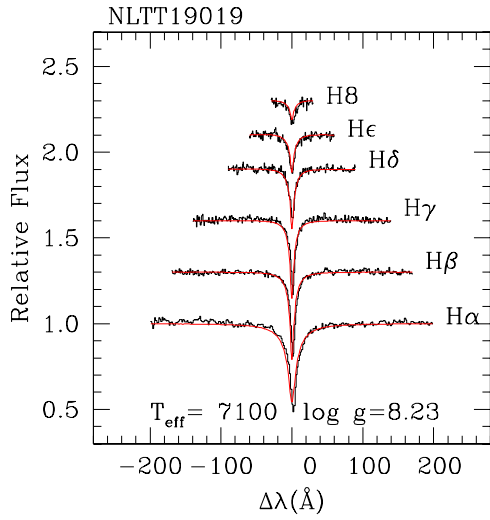


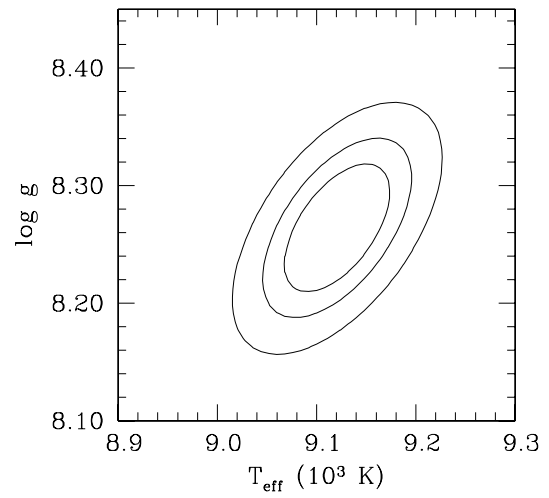
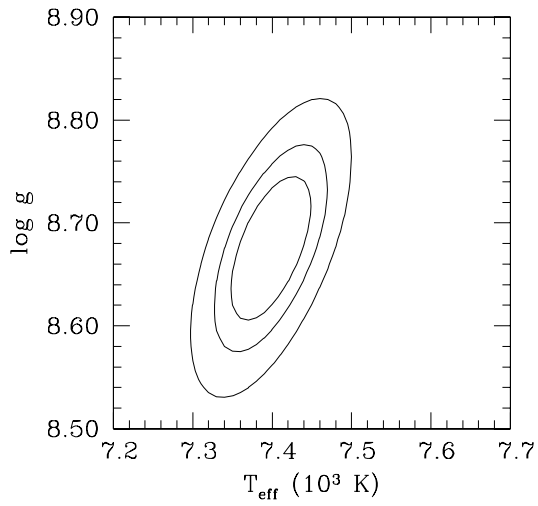
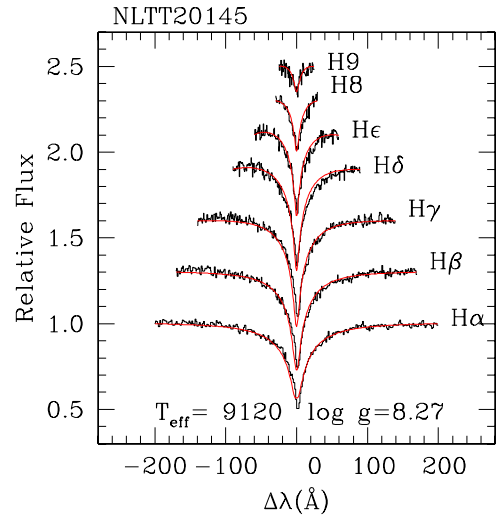
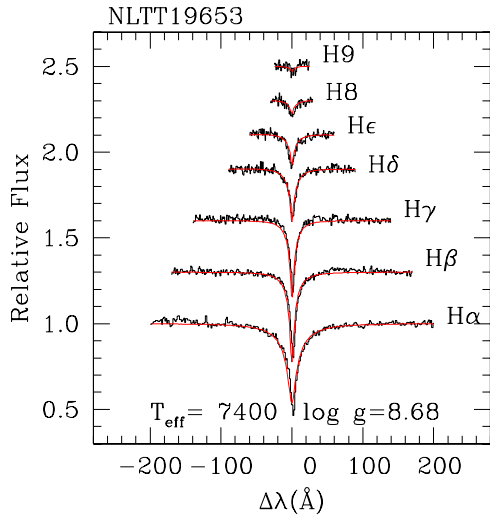


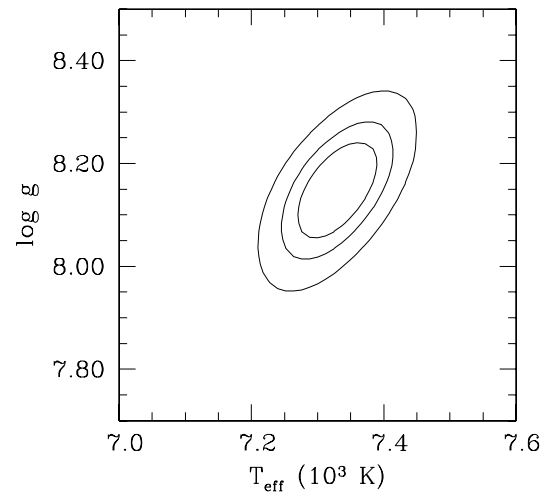
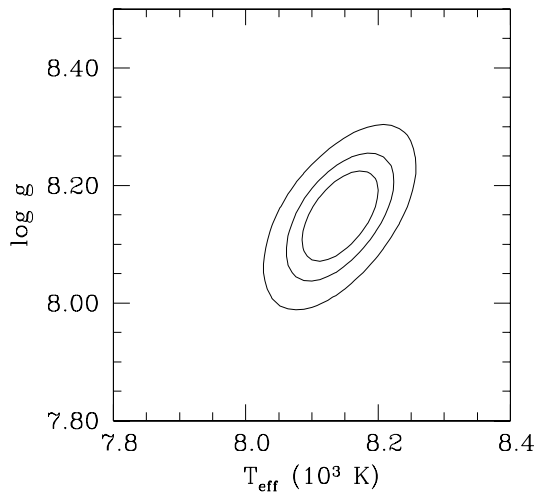
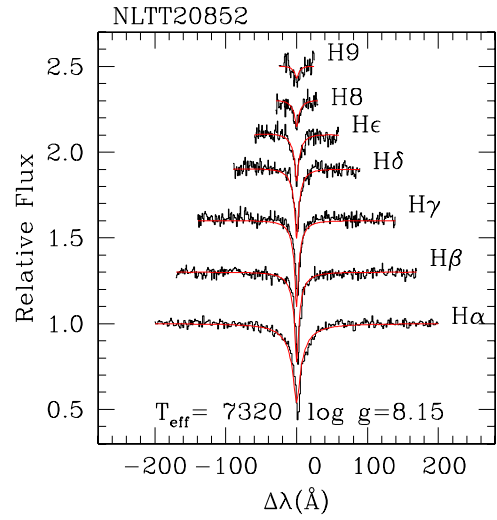
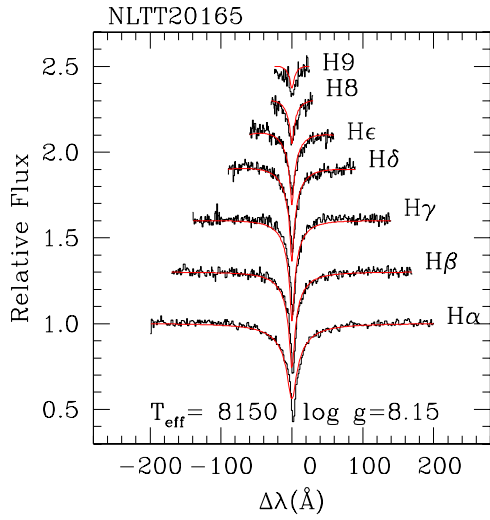


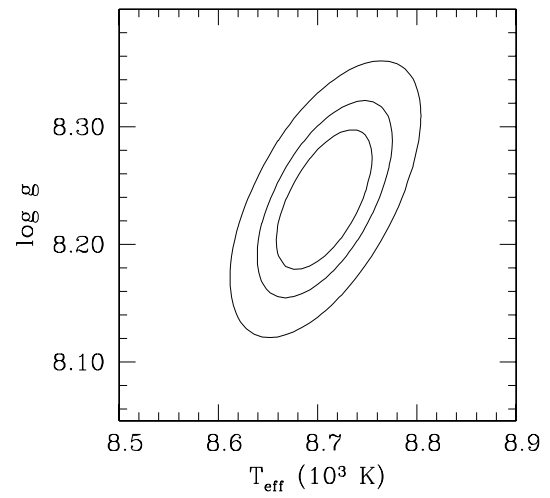
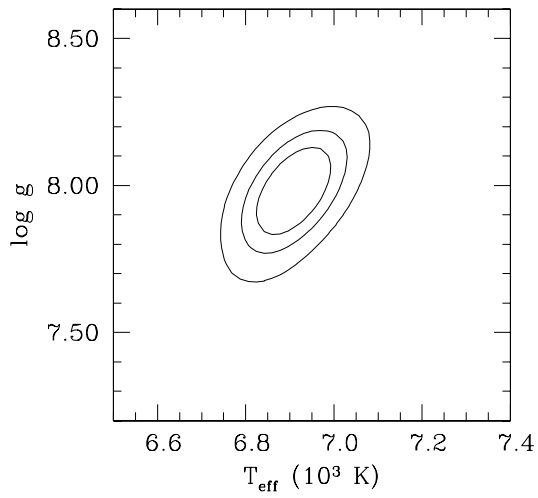
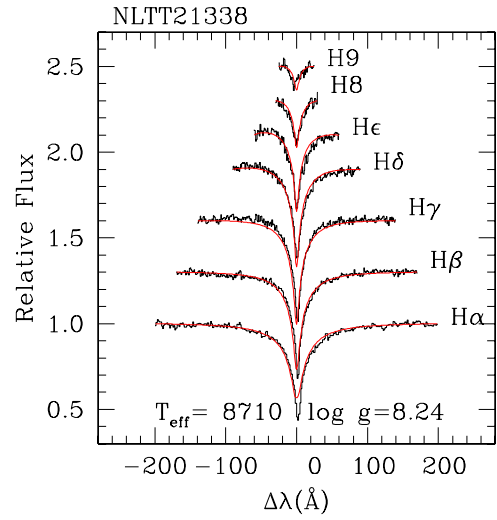
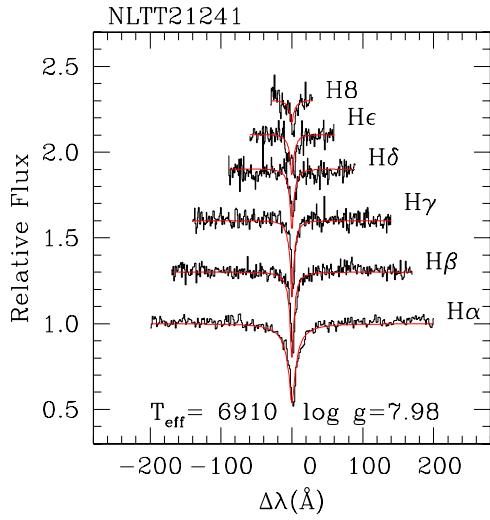


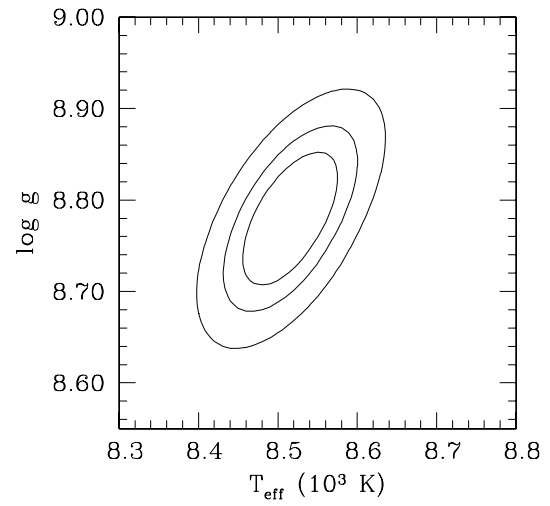
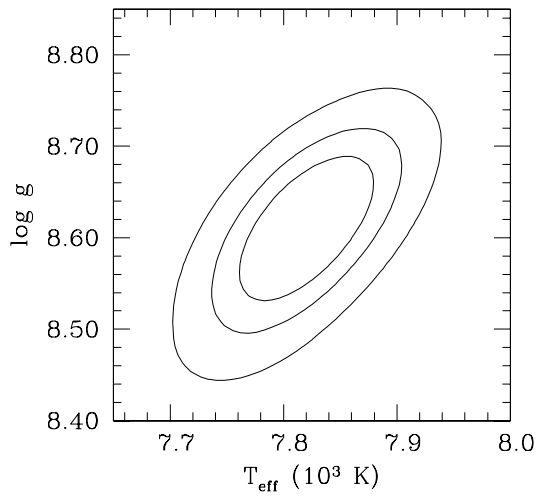
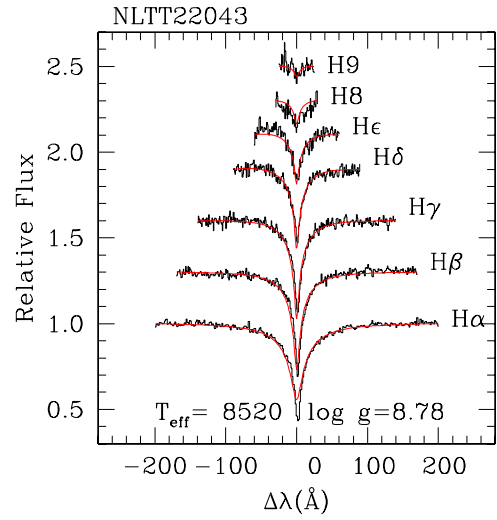
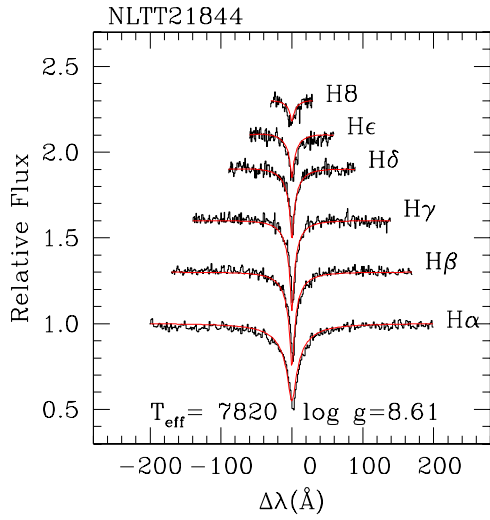


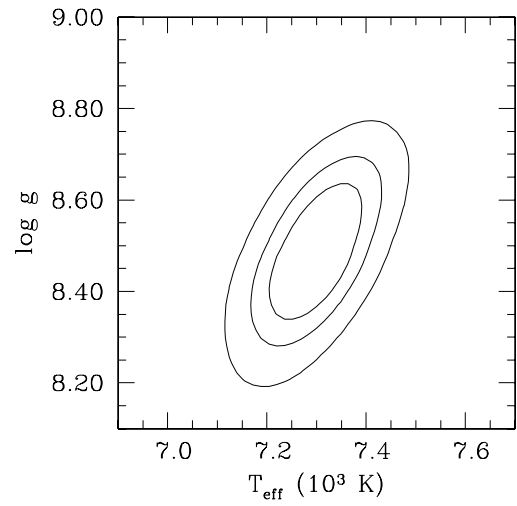
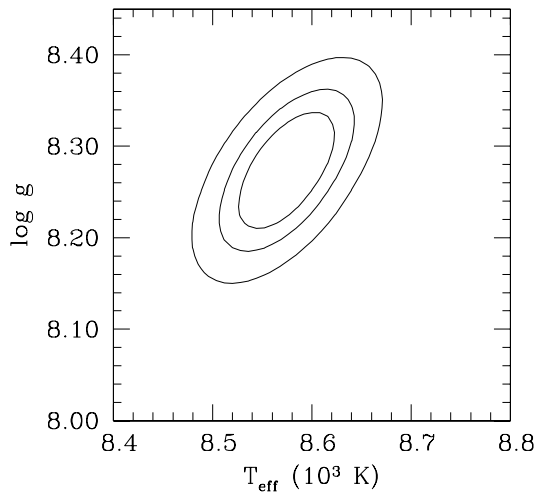
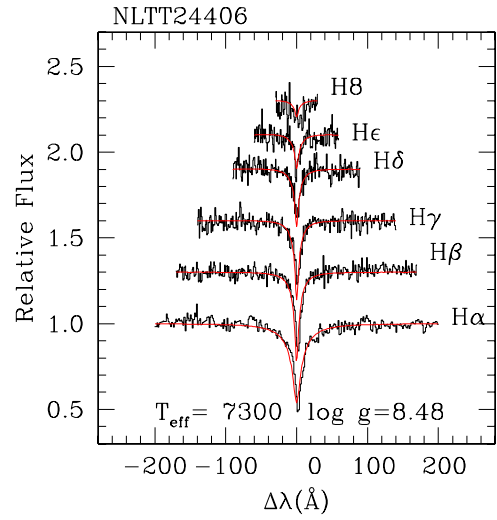
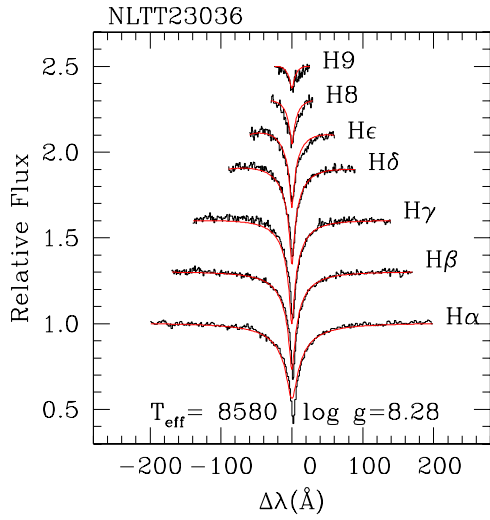


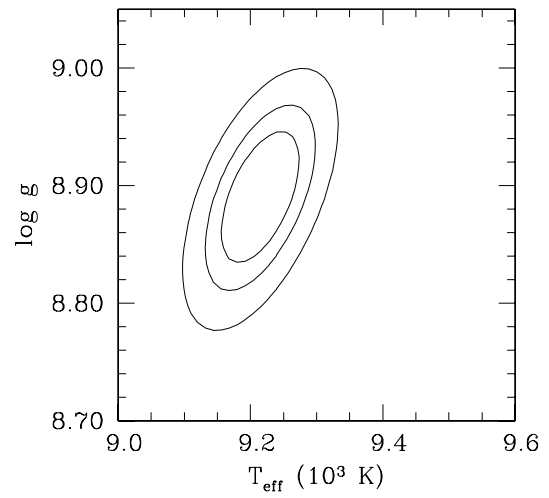
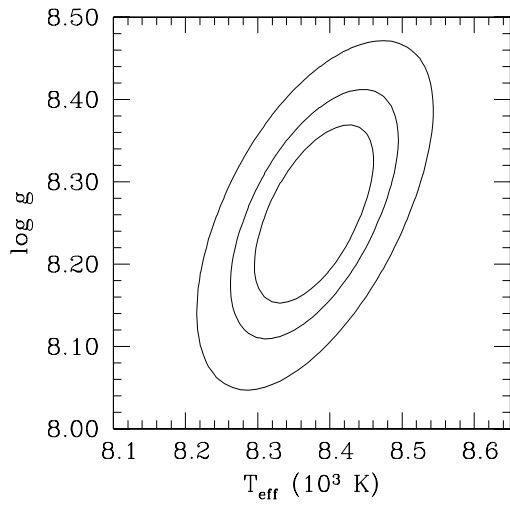
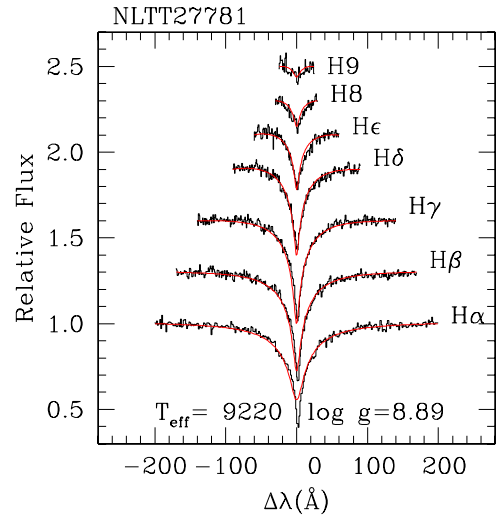
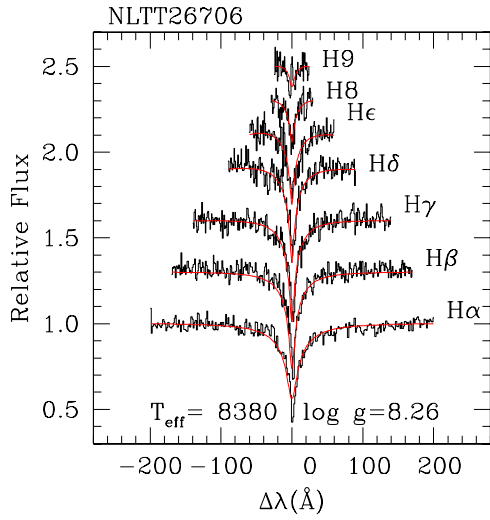


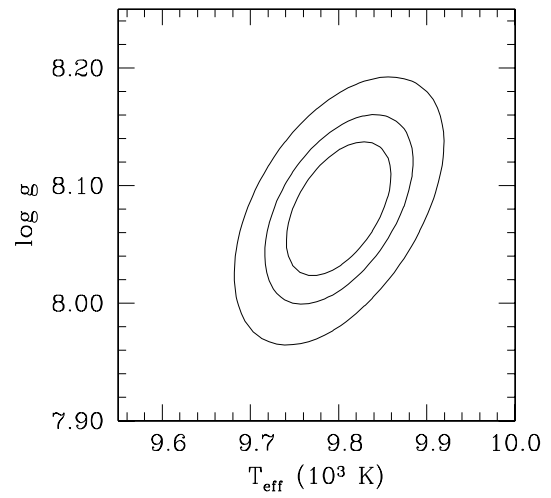
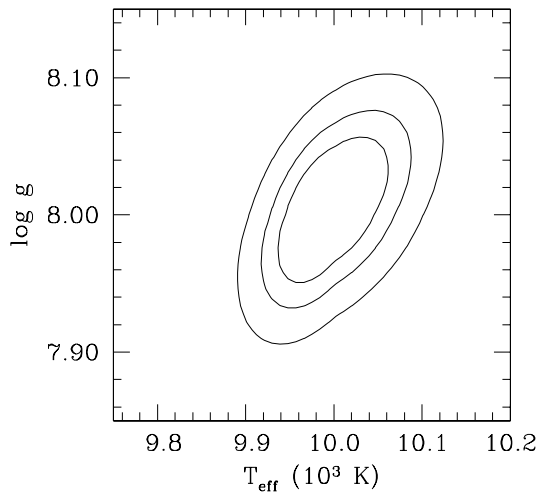
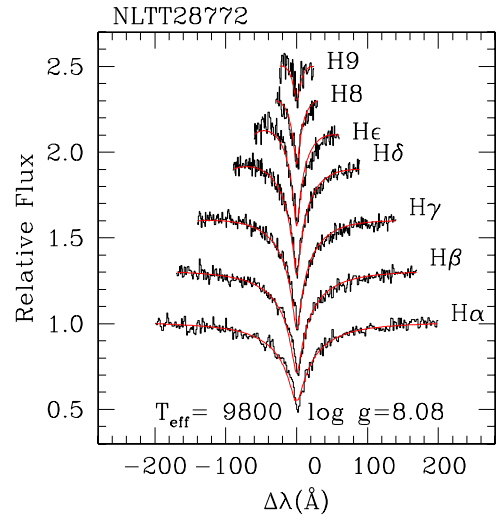
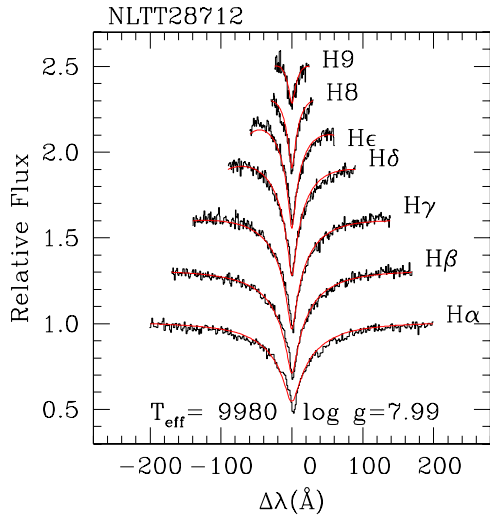


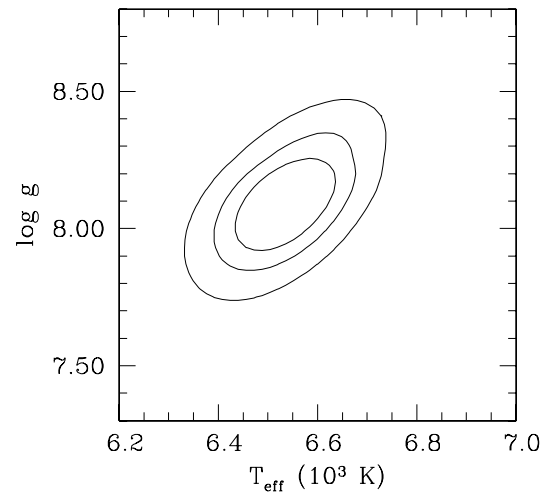
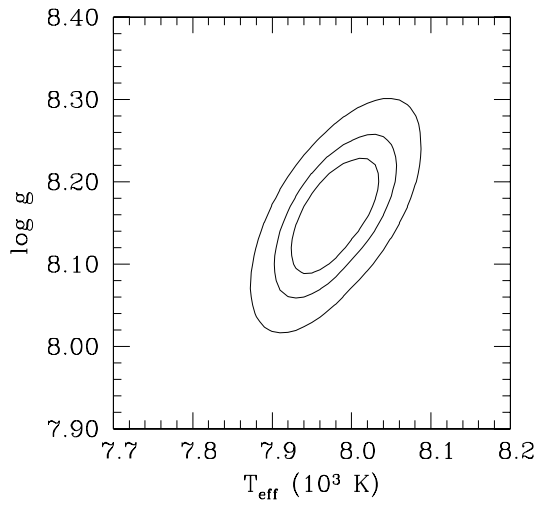
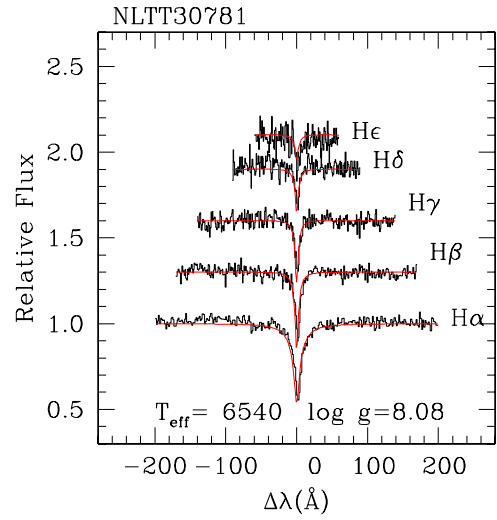
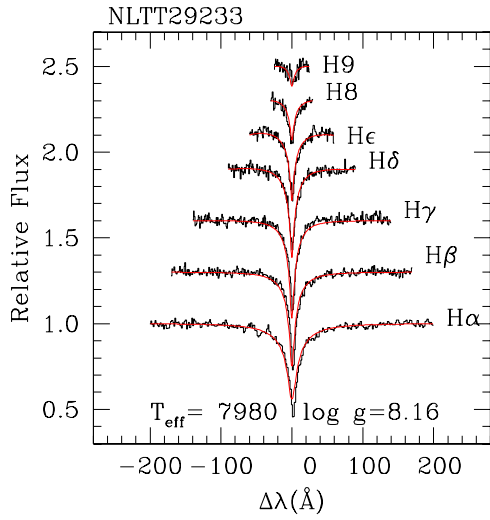


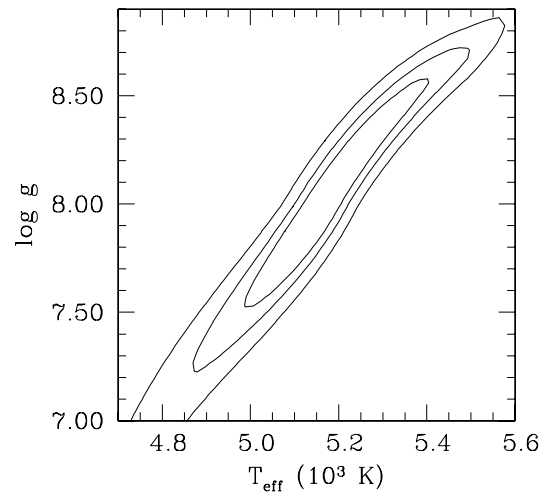
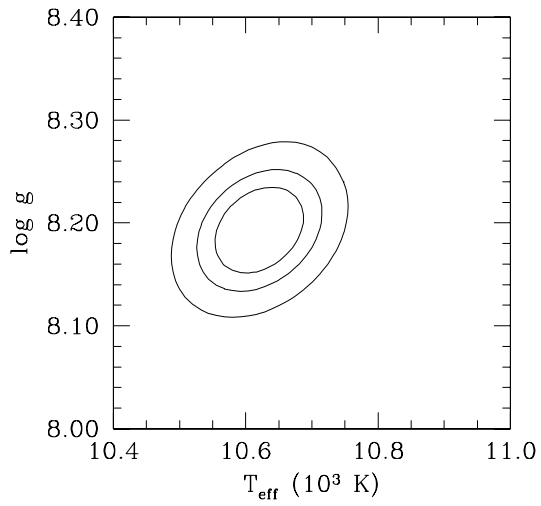
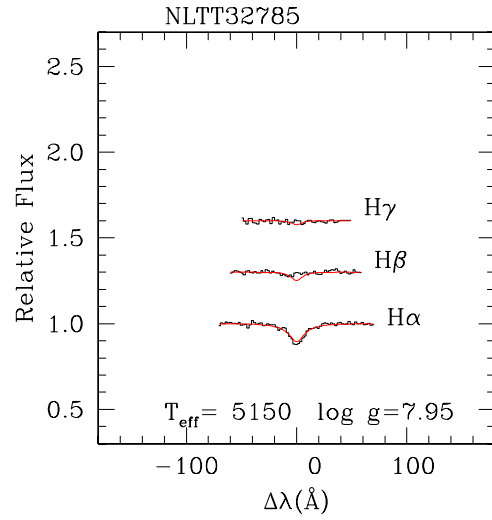
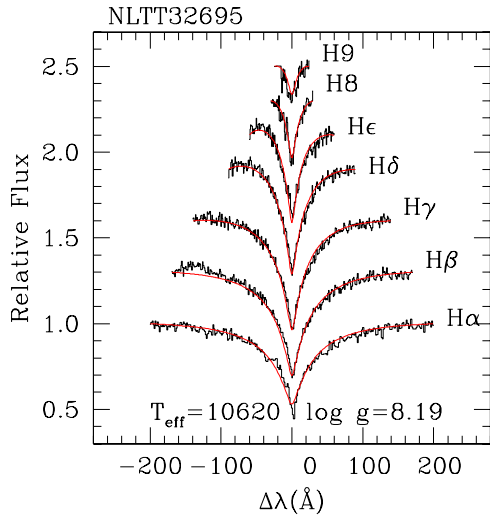


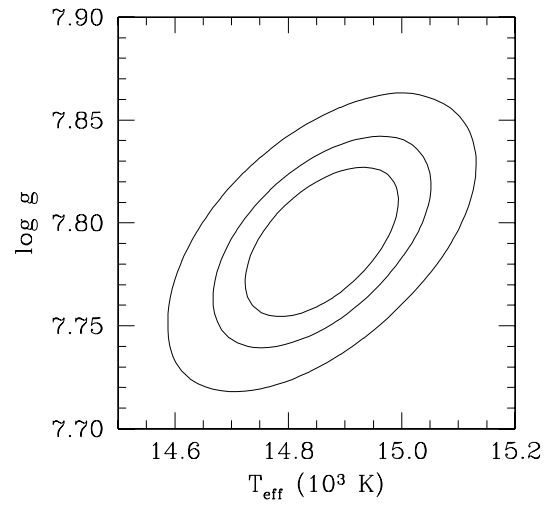
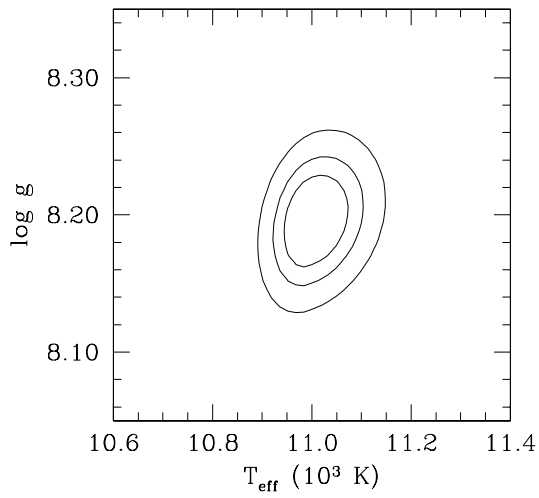
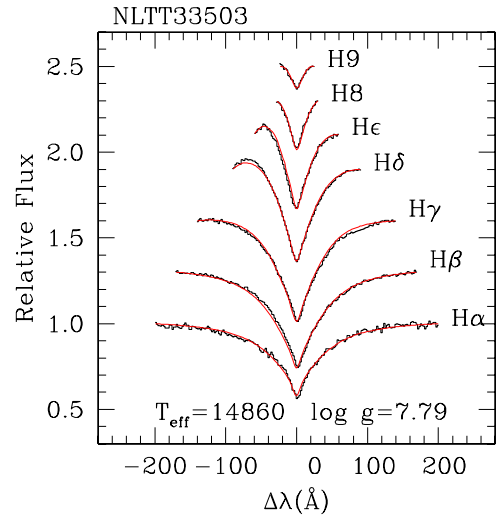
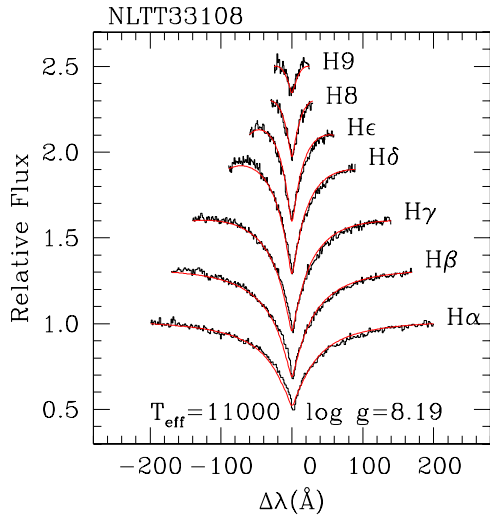


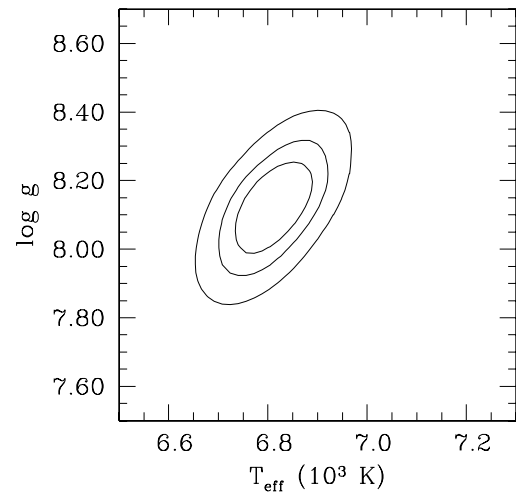
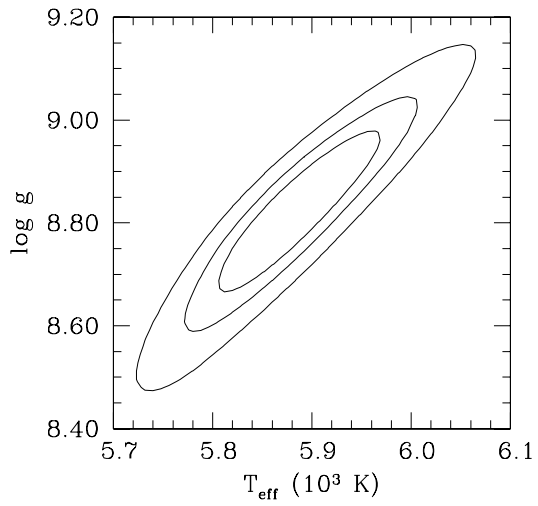
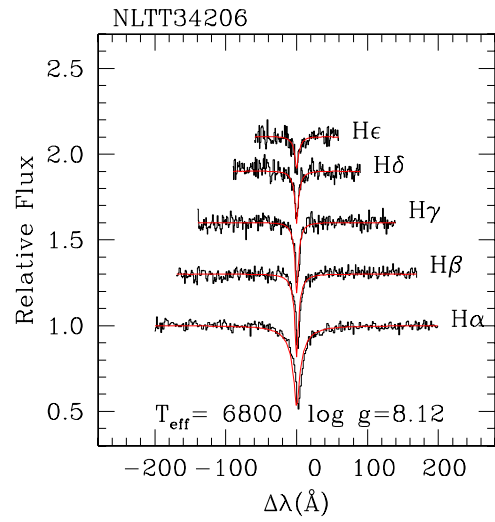
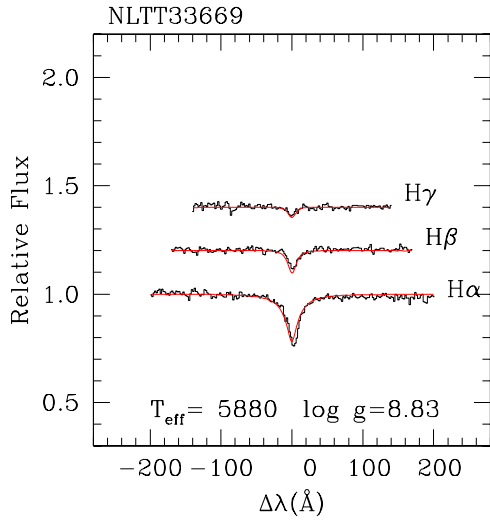


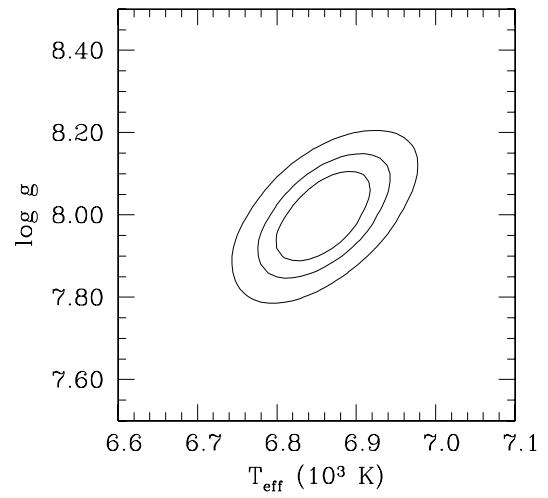
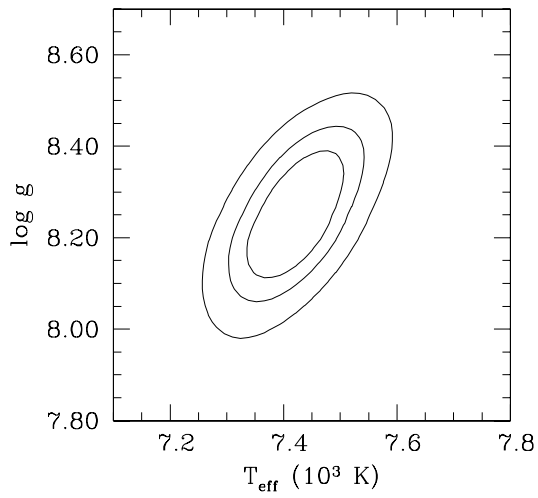
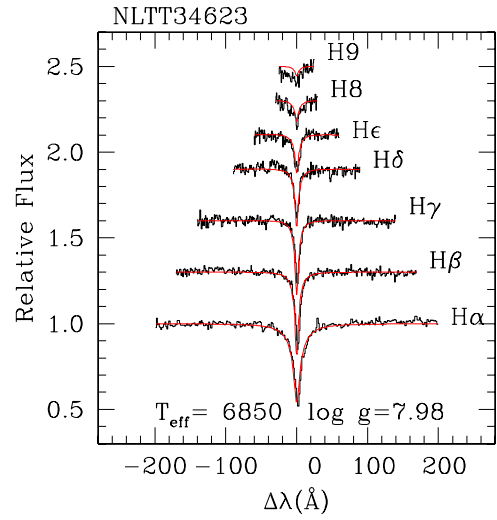
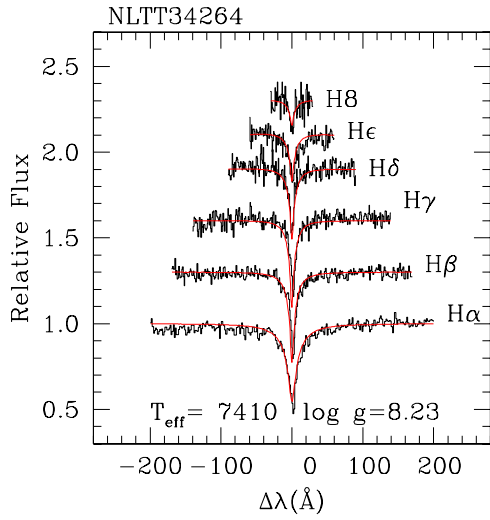


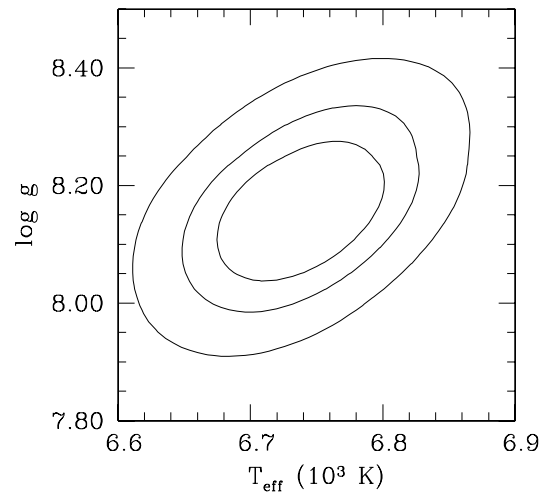
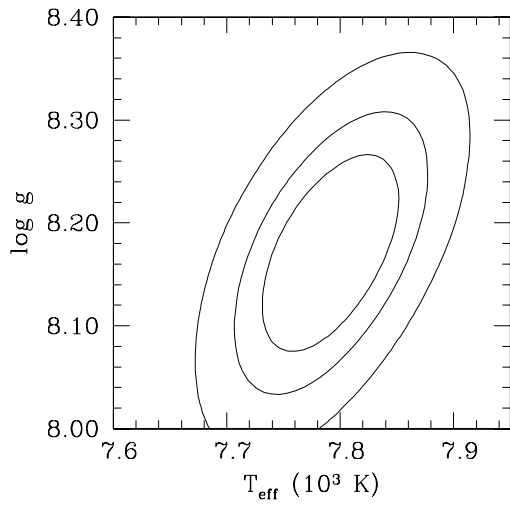
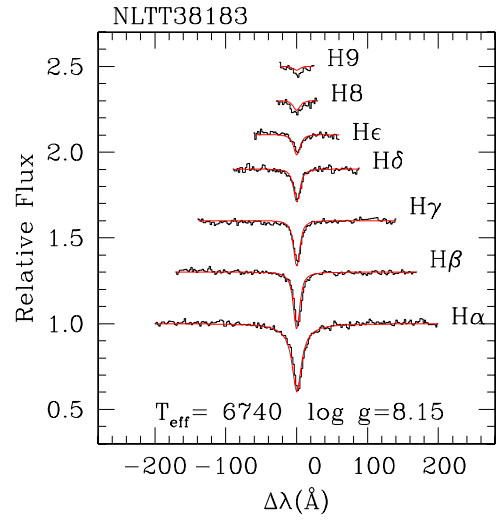
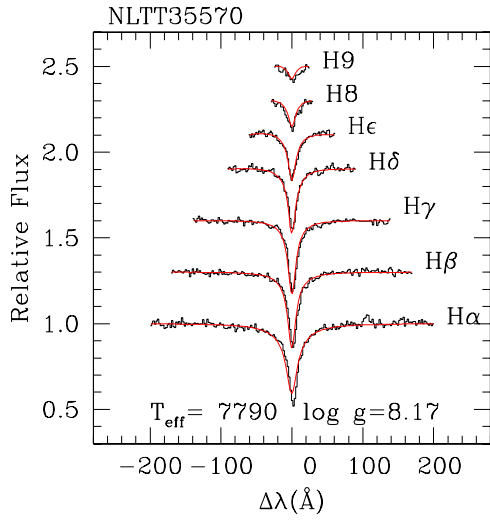


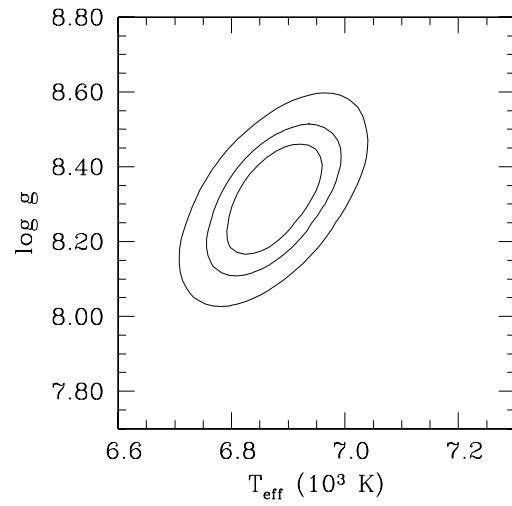
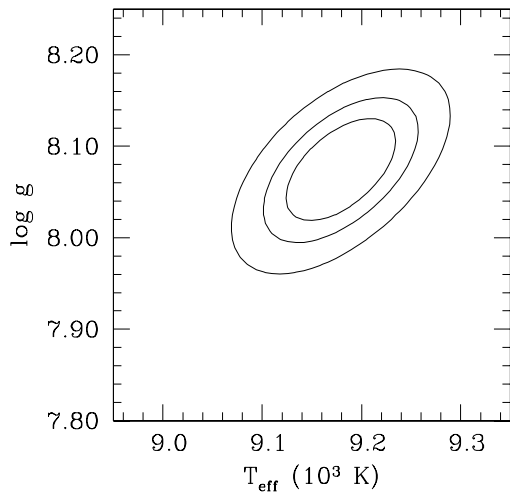
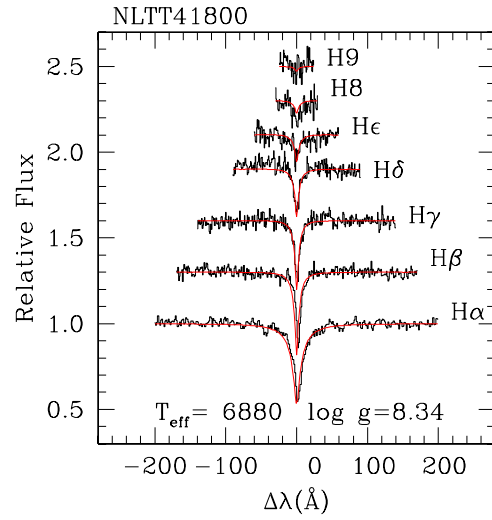
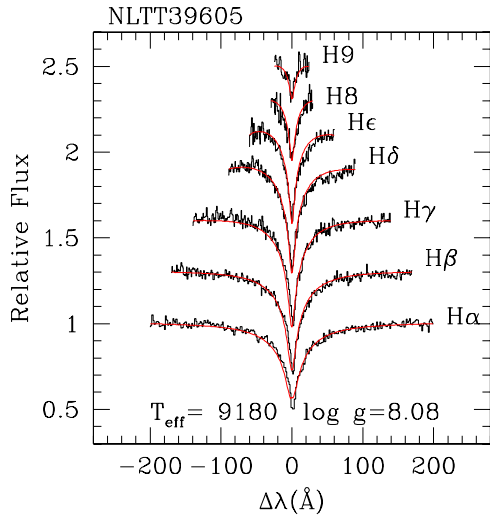


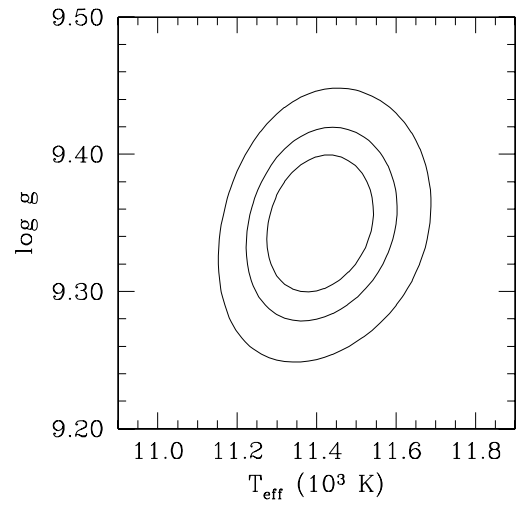
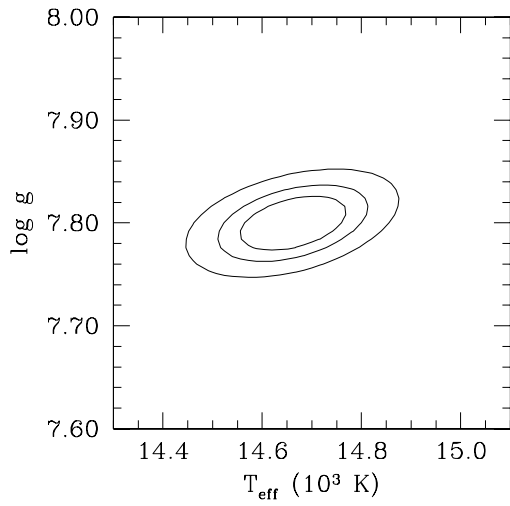
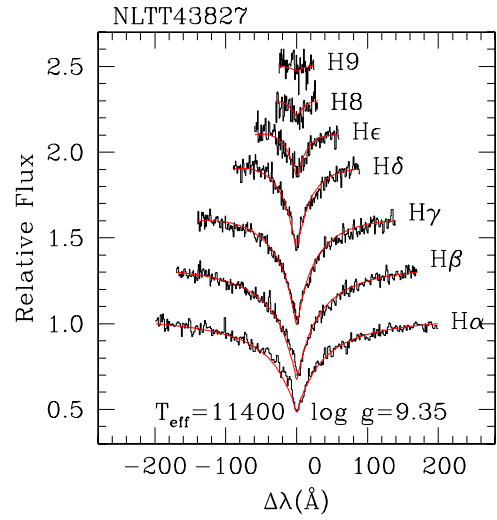
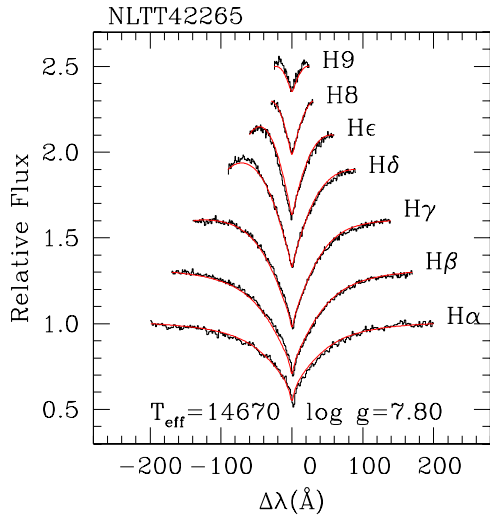


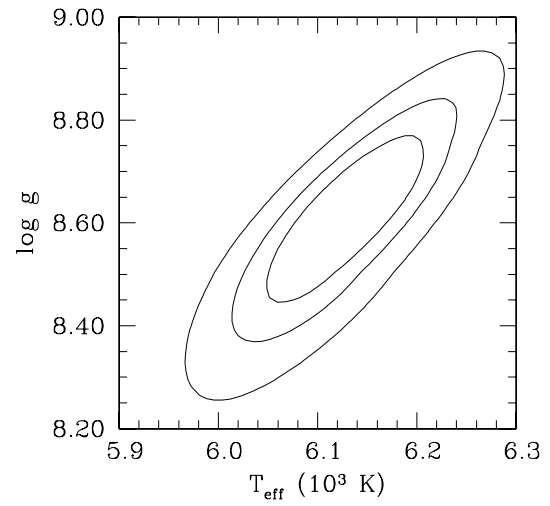
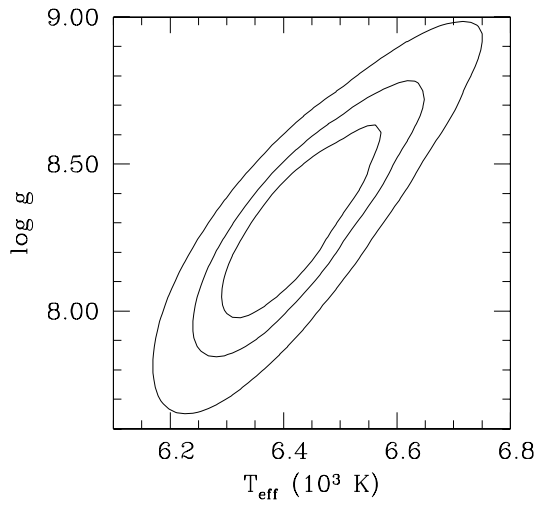
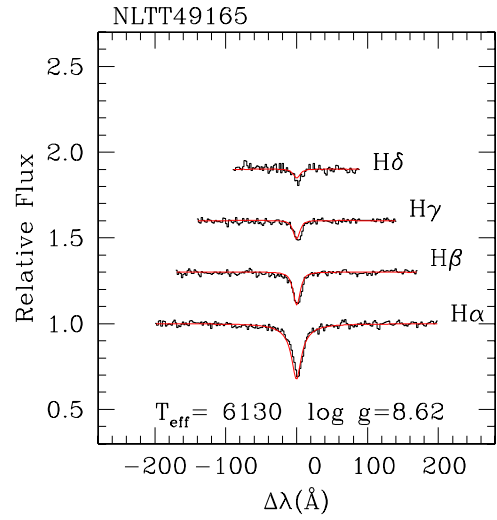
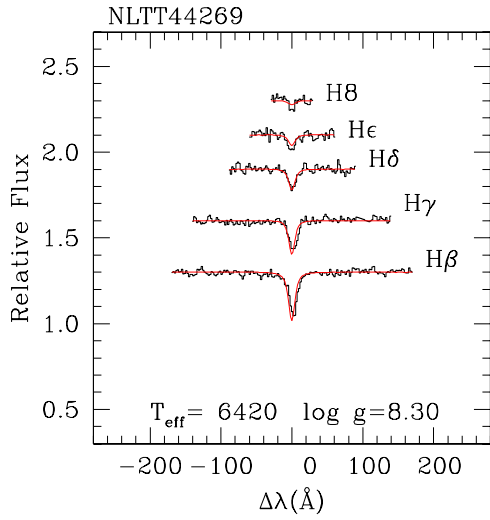


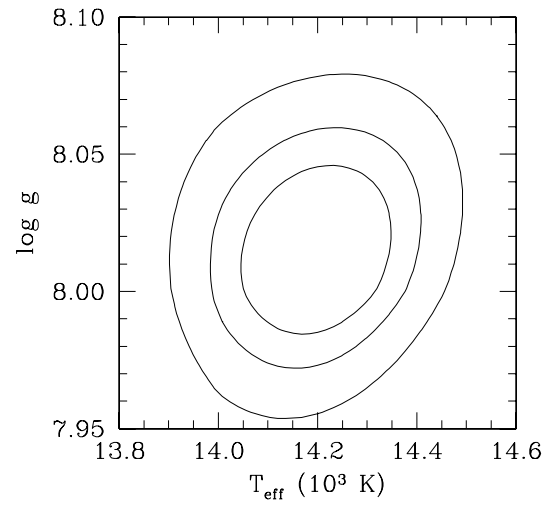
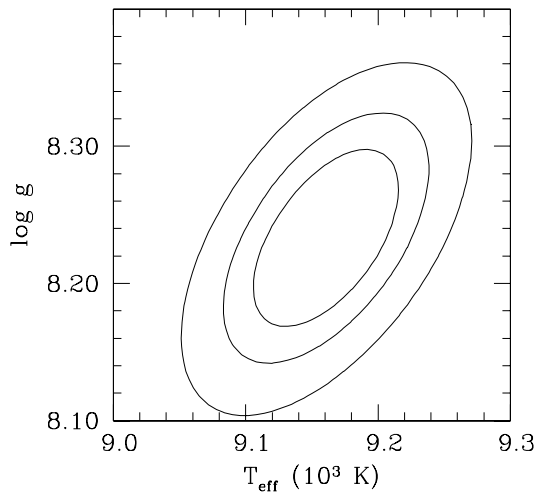
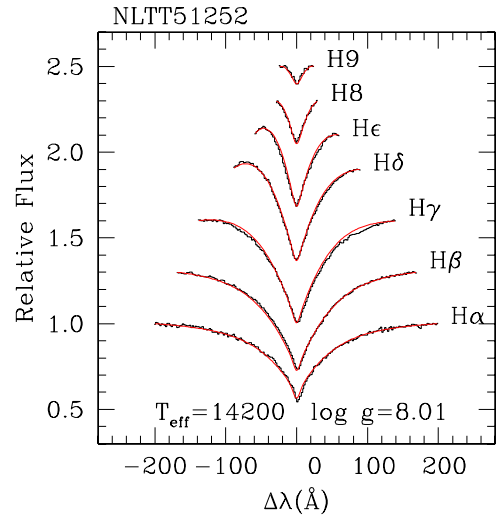
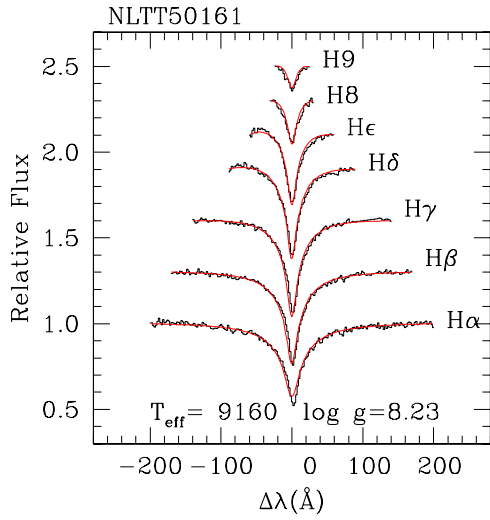


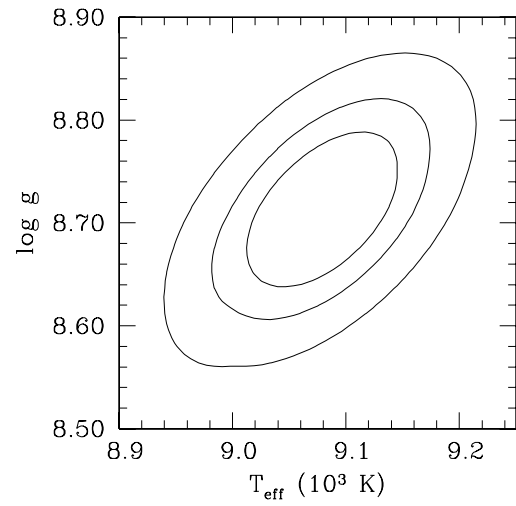
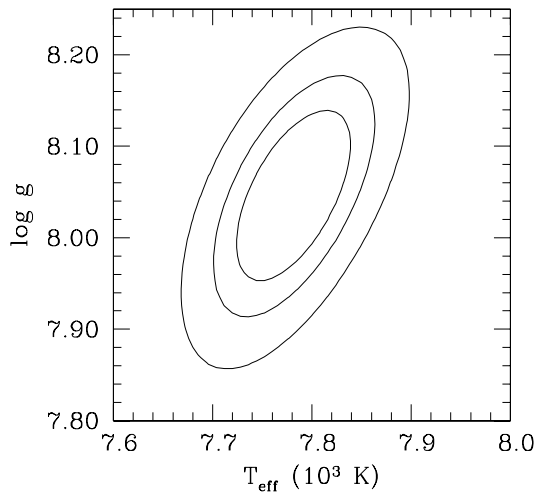
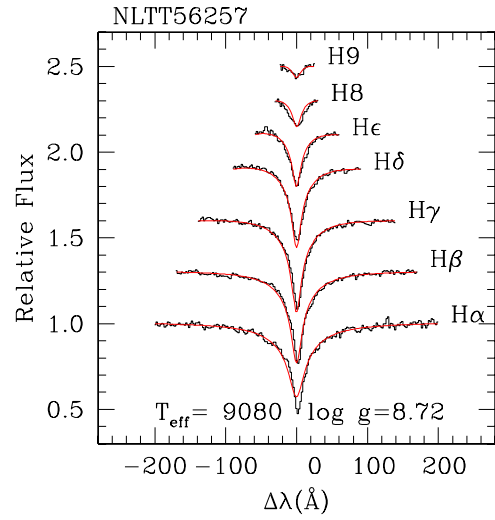
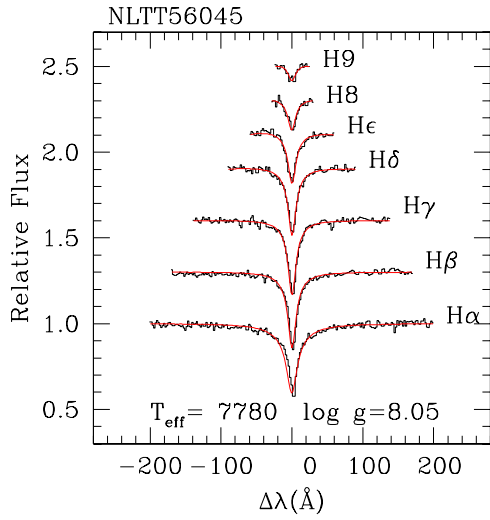


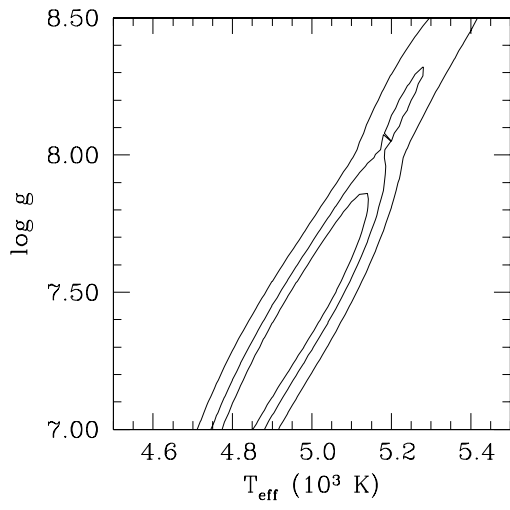
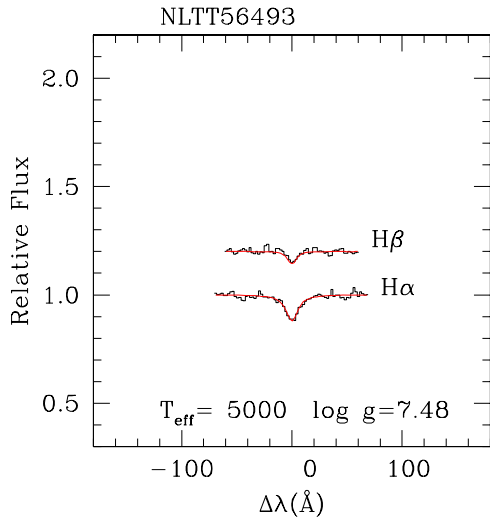












8.2 Známé teploty a povrchová gravitační zrychlení bílých trpaslíků

Tabulka 8.1: Známé hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení pro bílé trpaslíky typu DA.

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
529	0008+423	7380 ± 60	8.38 ± 0.08	13.96	1
574	0009+501	6540 ± 150	8.23 ± 0.06	14.36	4
659	0011+000	9610 ± 260	8.40 ± 0.19	15.35	3
669	0011-134	6010 ± 120	8.20 ± 0.11	15.89	4
2388 ^a	0041-102	~ 20000	(8.0)	14.90	2
3570	0102+210.1	5320 ± 160	(8.0)	17.95	4
3572	0102+210.2	4830 ± 170	(8.0)	18.09	4
3877	0107+267	13880 ± 242	7.87 ± 0.05	15.03	6
4654	0121+401	5340 ± 120	7.90 ± 0.29	17.12	3
5358	0133-116	11768 ± 28	7.84 ± 0.01	14.10	7
5777	0141-675	6460 ± 160	8.04 ± 0.44	13.90	2
7229	0208+396	7320 ± 180	8.02 ± 0.09	14.51	4
8284	0230-144	5480 ± 120	8.11 ± 0.09	15.77	4
8353	0231-054	16580 ± 46	8.51 ± 0.01	14.24	7
8581	0236+259	5500 ± 500	(8.0)	16.29	1
8947	0243-026	6820 ± 160	8.19 ± 0.15	15.54	4
10871	0322-019	5220 ± 110	7.50 ± 0.99	16.12	4
11620	0339-035	12497 ± 33	7.96 ± 0.01	15.20	7
12672	0407+197	5220 ± 110	(8.0)	17.71	4
13791	0440+510	8710 ± 220	7.96 ± 0.38	15.95	3
14498	0503-174	5300 ± 120	7.60 ± 0.16	16.01	3
14920	0518+333	7780 ± 170	7.14 ± 0.24	16.06	3
15796	0551+468	5380 ± 120	8.01 ± 0.08	17.23	3
16280	0612+177	25938 ± 369	7.97 ± 0.12	13.40	5
17270	0657+320	4990 ± 130	8.07 ± 0.03	16.62	3
19228	0813+217	6100 ± 130	(8.0)	17.02	4
20587	0854+404	22250 ± 340	7.91 ± 0.05	14.90	6
20774	0858+363	11830 ± 174	8.09 ± 0.05	14.54	6
21338	0913+442	8490 ± 220	8.19 ± 0.17	15.37	3
22454	0941-068	6030 ± 130	(8.0)	16.43	4
26379	1105-040	15576 ± 130	7.81 ± 0.05	12.92	5
27279	1121+216	7490 ± 180	8.20 ± 0.05	14.21	3
29016	1153+135	4910 ± 130	(8.0)	17.73	4
29359	1159-098	9540 ± 138	8.81 ± 0.05	16.02	6

Tabulka 8.1: – pokračování

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
29642	1204–136	11111±23	8.05±0.01	15.52	7
29898	1208+576	5880±120	7.95±0.15	15.78	3
30996	1229–012	19430±298	7.47±0.05	13.79	6
31183	1232+479	14370±235	7.82±0.05	14.50	6
31458	1237–028	10240±147	8.58±0.05	15.97	6
31748	1242–105	8280±80	7.85±0.13	14.43	1
31890	1244+145	10280±310	7.88±0.42	15.89	3
31894	1244–125	13440±88	7.88±0.01	14.70	7
32057	1247+550	4000±70	7.52±0.04	17.79	4
32398	1254+223	39450±606	7.85±0.05	13.37	6
32727	1300+263	4320±100	8.07±0.18	18.77	3
33303	1310+583	10560±153	8.32±0.05	14.09	6
33693	1317+453	13320±231	7.38±0.05	14.14	6
33833	1319+466	13880±321	8.19±0.05	14.55	6
34060	1323–514	18280±220	7.92±0.04	14.60	2
34206	1325+581	6810±160	8.14±0.31	16.70	3
34829	1337+705	20460±306	7.90±0.05	12.79	6
35201	1344+572	13390±281	7.94±0.05	13.35	6
35878	1356–233	9617±15	8.13±0.02	15.31	7
36477	1408+323	18150±278	7.95±0.05	14.06	6
40489	1529+141	5250±200	8.00±0.50	15.74	1
40881	1538+333	8940±100	8.44±0.10	15.03	1
42202	1609+135	9080±250	8.75±0.10	15.11	3
42265	1610+166	14390±240	7.84±0.05	15.67	6
43145	1633+433	6690±116	8.20±0.14	14.82	6
43310	1637+335	9940±280	8.13±0.13	14.65	3
43383	1639+153	7450±360	(8.0)	15.70	4
43454	1641+387	15570±304	7.95±0.06	14.41	6
43880	1655+215	9180±230	7.87±0.12	14.13	3
46138	1811+324A	7380±180	7.65±0.37	16.40	3
46139	1811+324B	6480±160	7.75±0.37	17.07	3
46319	1818+126	6340±130	7.29±0.39	16.09	4
47243	1855+338	11240±430	8.19±0.20	14.64	3
48454	1953–011	7920±200	8.23±0.05	13.69	3
48815	2007–219	9887±9	8.14±0.02	14.40	7
50382	2059+190	6840±160	7.86±0.28	16.36	3
50392	2059+247	6070±130	8.17±0.17	16.57	3
50698	2107–216	5830±140	8.40±0.05	16.80	3
51749	2136+229	9480±250	7.85±0.20	15.25	3

Tabulka 8.1: – pokračování

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
51874	2139+132	7640 ± 380	(8.0)	16.56	4
54650	2240–017	9150 ± 520	(8.0)	16.22	4
55053	2248+293	5520 ± 100	7.49 ± 0.16	15.54	4
55288	2253–081	6770 ± 180	8.41 ± 0.19	16.48	3
55343	2254+126	11611 ± 42	7.91 ± 0.02	16.00	7
55932	2306–220	14810 ± 260	7.86 ± 0.08	13.68	1
56801	2322–181	21474 ± 63	7.83 ± 0.01	15.38	7
57146	2329+267	9400 ± 240	8.02 ± 0.28	15.33	3
58183	2348–244	11282 ± 17	8.02 ± 0.01	15.33	7
58386	2352+401	8290 ± 250	8.01 ± 0.23	14.94	4

^aDAB

Citace:

- (1) Kawka & Vennes (2006)
- (2) Kawka a kol. (2007)
- (3) Bergeron a kol. (2001)
- (4) Bergeron a kol. (1997)
- (5) Bragaglia a kol. (1995)
- (6) Liebert a kol. (2005)
- (7) Koester a kol. (2001)

Tabulka 8.2: Známé hodnoty teploty a povrchového gravitačního zrychlení pro heliové bílé trpaslíky. Objekty, u kterých není uvedena poznámka, jsou bílí trpaslíci typu DC.

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
8	0000-345	6240±140	8.31±0.16	15.02	3
431	0007+308	8200±250	(8.0)	16.80	3
1725	0029-032	4770±50	8.07±0.04	17.32	3
3486 ^a	0100-068	22500±700	8.08±0.03	13.96	4
4320	0115+159	9800±360	8.38±0.06	13.85	3
4753	0123-262	7260±190	(8.0)	15.06	3
8435	0233-242	5400±500	(8.0)	15.74	1
10953	0324+738	4650±50	7.10±0.42	17.68	2
11722 ^c	0341+182	6520±130	7.99±0.10	15.03	10
13235	0423+120	6150±130	(8.0)	15.42	3
13658	0435-088	6650±160	8.11±0.04	13.75	3
15811 ^b	0552-041	5080±60	8.33±0.01	14.47	3
18271	0738-171	7710±220	8.09±0.03	13.06	2
18906	0802+386	11070±480	8.31±0.18	15.56	2
19138	0810+489	7300±100	(8.0)	15.09	1
21302	0912+536	7160±190	8.28±0.03	13.84	2
23636 ^c	1008+290	~4600	(8.0)	17.51	7
25087	1039+145	7330±200	7.96±0.26	16.51	3
25836	1055-072	7420±200	8.42±0.06	14.33	2
25908 ^d	1056+345	11000±600	(8.0)	15.58	9
29040	1154+186	7630±220	8.06±0.16	15.61	2
30094 ^b	1212+023	~6000	(8.0)	17.85	8
31347 ^c	1235+422	5846±190	(8.0)	17.53	6
33481	1313-198	5330±100	8.33±0.06	17.14	2
35341	1346+121	4970±70	(8.0)	18.17	3
37455 ^c	1426+613	6427±190	(8.0)	16.87	6
38361	1444-174	4960±60	8.37±0.08	16.44	2
40607 ^b	1532+129	~7500	(8.0)	15.07	1
43149	1633+571	6040±200	8.03±0.06	14.99	3
43402	1639+537	7510±210	8.14±0.11	15.05	2
44303 ^c	1708-147	10680±770	(8.0)	14.31	3
45565	1748+708	5590±90	8.36±0.02	14.13	2
50189	2054-050	4620±40	8.09±0.12	16.69	2
55164	2251-070	4590±70	8.38±0.05	15.71	3

Tabulka 8.2: – pokračování

NLTT	WD	T_{eff} [K]	$\log(g)$ [cgs]	V [mag]	zdroj
56220 ^c	2311–068	7980±240	8.27±0.17	15.40	2
56245 ^b	2312–024	6220±190	8.19±0.26	16.29	5
56473	2316–065	4720±50	8.17±0.17	18.15	2

^aDB ^bDZ ^cDQ ^dDBA

Citace:

- (1) Kawka & Vennes (2006)
- (2) Bergeron a kol. (2001)
- (3) Bergeron a kol. (1997)
- (4) Beauchamp a kol. (1999)
- (5) Dufour a kol. (2007)
- (6) Koester & Knist (2006)
- (7) Schmidt a kol. (1999)
- (8) Reid a kol. (2001)
- (9) Wegner & Nelan (1987)
- (10) Dufour a kol. (2005)

8.3 Hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří známých bílých trpaslíků

Tabulka 8.3: Hodnoty hmotnosti, absolutní hvězdné velikosti, vzdálenosti a stáří pro všechny bílé trpaslíky z katalogu rNLTT, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení.

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]
8	0000-345	0.77 ± 0.11	13.95	16	3.30 ± 0.39
431	0007+308	(0.57)	12.89	60	1.10 ± 1.60
529	0008+423	0.83 ± 0.05	13.96	10	2.60 ± 0.31
574	0009+501	0.73 ± 0.04	14.22	11	2.80 ± 0.26
659	0011+000	0.85 ± 0.12	13.00	30	1.40 ± 0.40
669	0011-134	0.71 ± 0.07	14.54	19	3.30 ± 0.57
1725	0029-032	0.61 ± 0.03	15.41	24	4.70 ± 0.14
2388	0041-102	(0.62)	10.76	67	0.07 ± 0.41
3486	0100-068	0.60 ± 0.02	10.64	71	0.07 ± 0.42
3570	0102+210.1	(0.58)	14.82	42	3.70 ± 2.10
3572	0102+210.2	(0.58)	15.32	36	5.40 ± 0.93
3877	0107+267	0.54 ± 0.03	11.22	58	0.21 ± 0.02
4320	0115+159	0.82 ± 0.04	12.34	20	1.30 ± 0.12
4654	0121+401	0.52 ± 0.13	14.67	31	3.10 ± 1.80
4753	0123-262	(0.57)	13.33	22	1.50 ± 1.50
5358	0133-116	0.51 ± 0.01	11.49	33	0.32 ± 0.00
5777	0141-675	0.61 ± 0.22	13.99	10	2.10 ± 1.90
7229	0208+396	0.60 ± 0.05	13.44	16	1.40 ± 0.26
8284	0230-144	0.65 ± 0.06	14.85	15	3.90 ± 0.59
8353	0231-054	0.93 ± 0.01	11.89	30	0.41 ± 0.01
8435	0233-242	(0.57)	14.65	17	3.40 ± 0.36
8581	0236+259	(0.58)	14.67	21	3.20 ± 2.40
8947	0243-026	0.71 ± 0.09	13.98	21	2.40 ± 0.61
10871	0322-019	0.34 ± 0.29	14.24	24	3.80 ± 3.40
10953	0324+738	0.21 ± 0.12	15.60	26	3.30 ± 3.40
11620	0339-035	0.58 ± 0.01	11.54	54	0.32 ± 0.01
11722	0341+182	0.67 ± 0.06	13.53	20	2.30 ± 0.26
12672	0407+197	(0.58)	14.91	36	4.00 ± 2.00
13235	0423+120	(0.57)	14.01	19	2.60 ± 0.91
13658	0435-088	0.64 ± 0.03	13.68	10	2.40 ± 0.12
13791	0440+510	0.57 ± 0.17	12.68	45	0.84 ± 0.81
14498	0503-174	0.39 ± 0.07	14.29	22	4.10 ± 1.60

Tabulka 8.3: – pokračování

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]
14920	0518+333	0.25±0.05	11.95	66	0.83±0.30
15796	0551+468	0.59±0.05	14.79	31	3.60±0.49
15811	0552−041	0.78±0.01	15.00	8	4.90±0.03
16280	0612+177	0.62±0.06	10.24	43	0.02±0.01
17270	0657+320	0.62±0.02	15.25	19	5.40±0.21
18271	0738−171	0.63±0.02	13.11	10	1.50±0.09
18906	0802+386	0.78±0.12	12.00	51	0.79±0.31
19138	0810+489	(0.57)	13.31	23	1.5±1.50
19228	0813+217	(0.59)	14.17	37	2.30±2.20
20587	0854+404	0.58±0.03	10.44	78	0.03±0.01
20774	0858+363	0.66±0.03	11.83	35	0.47±0.04
21302	0912+536	0.75±0.02	13.38	12	2.40±0.08
21338	0913+442	0.71±0.11	13.12	28	1.30±0.50
22454	0941−068	(0.59)	14.23	28	2.40±2.30
23636	1008+290	(0.57)	15.68	23	5.00±0.74
25087	1039+145	0.55±0.16	13.29	44	1.40±0.74
25836	1055−072	0.85±0.04	13.24	16	2.60±0.15
25908	1056+345	(0.58)	12.02	52	0.48±1.30
26379	1105−040	0.51±0.02	10.92	25	0.13±0.01
27279	1121+216	0.72±0.03	13.61	13	1.90±0.18
29016	1153+135	(0.58)	15.23	32	5.10±1.20
29040	1154+186	0.61±0.10	13.14	31	1.50±0.47
29359	1159−098	1.10±0.03	13.79	28	2.300±0.001
29642	1204−136	0.63±0.01	11.94	52	0.51±0.01
29898	1208+576	0.56±0.08	14.30	20	2.40±0.67
30094	1212+023	(0.57)	14.12	56	2.70±0.82
30996	1229−012	0.41±0.01	9.96	58	0.09±0.02
31183	1232+479	0.51±0.02	11.08	48	0.17±0.01
31347	1235+422	(0.57)	14.25	45	2.90±0.73
31458	1237−028	0.97±0.03	13.10	38	1.60±0.08
31748	1242−105	0.51±0.06	12.72	22	0.82±0.17
31890	1244+145	0.53±0.17	11.95	62	0.49±0.49
31894	1244−125	0.54±0.01	11.29	48	0.230±0.004
32057	1247+550	0.34±0.02	16.65	17	8.80±0.55
32398	1254+223	0.59±0.02	9.26	67	0.004±0.000
32727	1300+263	0.62±0.11	16.20	33	7.10±1.40
33303	1310+583	0.80±0.03	12.53	21	0.95±0.10
33481	1313−198	0.79±0.04	14.72	30	4.50±0.13
33693	1317+453	0.35±0.01	10.54	52	0.29±0.02

Tabulka 8.3: – pokračování

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]
33833	1319+466	0.72±0.03	11.68	37	0.36±0.04
34060	1323–514	0.57±0.02	10.80	58	0.09±0.01
34206	1325+581	0.68±0.18	13.91	36	2.20±1.30
34829	1337+705	0.57±0.03	10.57	28	0.05±0.01
35201	1344+572	0.57±0.03	11.39	25	0.26±0.02
35341	1346+121	(0.57)	15.14	40	4.20±0.16
35878	1356–233	0.68±0.01	12.56	36	0.85±0.03
36477	1408+323	0.59±0.03	10.85	44	0.10±0.01
37455	1426+613	(0.57)	13.82	41	2.30±1.10
38361	1444–174	0.81±0.05	15.15	18	5.30±0.08
40489	1529+141	0.58±0.24	14.89	15	3.90±3.20
40607	1532+129	(0.57)	13.20	24	1.40±1.50
40881	1538+333	0.88±0.06	13.35	22	1.80±0.23
42202	1609+135	1.06±0.06	13.87	18	2.40±0.12
42265	1610+166	0.52±0.03	11.11	82	0.18±0.01
43145	1633+433	0.71±0.09	14.07	14	2.50±0.60
43149	1633+571	0.59±0.04	14.09	15	2.70±0.10
43310	1637+335	0.68±0.08	12.44	28	0.78±0.20
43383	1639+153	(0.59)	13.34	30	1.30±2.00
43402	1639+537	0.66±0.07	13.20	23	1.80±0.32
43454	1641+387	0.58±0.03	11.12	46	0.16±0.02
43880	1655+215	0.52±0.06	12.35	23	0.64±0.12
44303	1708–147	(0.58)	12.10	28	0.52±1.40
45565	1748+708	0.81±0.01	14.47	9	4.2±0.04
46138	1811+324A	0.42±0.13	12.87	51	1.4±0.03
46139	1811+324B	0.45±0.14	13.58	50	1.30±1.10
46319	1818+126	0.28±0.10	13.03	41	1.70±0.18
47243	1855+338	0.72±0.12	12.12	32	0.64±0.29
48454	1953–011	0.74±0.03	13.46	11	1.70±0.16
48815	2007–219	0.68±0.01	12.47	24	0.81±0.03
50189	2054–050	0.63±0.08	15.64	16	5.10±0.44
50382	2059+190	0.51±0.12	13.50	37	1.30±0.82
50392	2059+247	0.69±0.11	14.44	27	3.10±0.85
50698	2107–216	0.84±0.03	15.01	23	4.70±0.23
51749	2136+229	0.51±0.09	12.20	41	0.58±0.20
51874	2139+132	(0.59)	13.24	46	1.30±2.00
54650	2240–017	(0.60)	12.55	54	0.79±1.70
55053	2248+293	0.34±0.06	13.96	21	3.10±0.19
55164	2251–070	0.82±0.03	15.69	10	5.90±0.00

Tabulka 8.3: – pokračování

NLTT	WD	M [M_{\odot}]	M_V [mag]	d [pc]	stáří [$\cdot 10^9$ yrs]
55288	2253–081	0.85 ± 0.12	14.36	27	3.30 ± 0.59
55343	2254+126	0.55 ± 0.01	11.62	75	0.37 ± 0.01
55932	2306–220	0.53 ± 0.04	11.08	33	0.16 ± 0.02
56220	2311–068	0.75 ± 0.11	12.98	30	1.90 ± 0.43
56245 ^a	2312–024	0.69 ± 0.17	13.96	29	3.00 ± 0.69
56473	2316–065	0.68 ± 0.11	15.49	34	5.20 ± 0.47
56801	2322–181	0.54 ± 0.00	10.39	100	0.04 ± 0.00
57146	2329+267	0.61 ± 0.15	12.48	37	0.76 ± 0.49
58183	2348–244	0.61 ± 0.01	11.85	50	0.47 ± 0.01
58386	2352+401	0.60 ± 0.13	12.94	25	1.00 ± 0.52

^a Bílý trpaslík typu DZ, hmotnost s její chybou převzata z Dufour a kol. (2007).

8.4 Kinematika známých bílých trpaslíků

Tabulka 8.4: Kinematika bílých trpaslíků, u nichž byla známa teplota a povrchové gravitační zrychlení.

NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]
8	0000-345	0.758	169.0	25	-50	11
431	0007+308	0.537	222.4	141	9	-71
529	0008+423	0.237	193.4	15	4	-3
574	0009+501	0.715	219.9	37	13	-17
659	0011+000	0.459	114.9	-28	-43	-14
669	0011-134	0.899	217.3	85	-25	-1
1725	0029-032	0.651	77.7	-60	-20	8
2388	0041-102	0.196	227.2	70	-5	-4
3486	0100-068	0.184	166.4	23	-33	-7
3570	0102+210.1	0.478	205.5	67	-18	-53
3572	0102+210.2	0.475	206.5	67	-7	-26
3877	0107+267	0.267	126.0	-26	-51	-24
4320	0115+159	0.648	181.8	34	-32	-35
4654	0121+401	0.696	100.9	-60	-55	2
4753	0123-262	0.591	154.6	22	-55	9
5358	0133-116	0.469	104.8	-34	-55	9
5777	0141-675	1.050	198.3	50	-10	33
7229	0208+396	1.145	115.7	-44	-62	-3
8284	0230-144	0.687	177.1	38	-33	-4
8353	0231-054	0.266	69.7	-20	-8	26
8435	0233-242	0.622	189.0	49	-25	0
8581	0236+259	0.362	119.3	-6	-25	6
8947	0243-026	0.534	155.3	21	-46	-4
10871	0322-019	0.909	164.6	42	-76	-18
10953	0324+738	0.393	139.3	-26	-25	-4
11620	0339-035	0.226	80.1	-21	-25	46
11722	0341+182	1.199	159.8	16	-99	-37
12672	0407+197	0.579	125.1	-6	-79	24
13235	0423+120	0.248	201.9	19	-5	-10
13658	0435-088	1.574	171.1	52	-53	-12
13791	0440+510	0.484	86.7	-12	-54	88
14498	0503-174	0.688	14.4	-38	35	40
14920	0518+333	0.224	107.6	2	-49	49
15796	0551+468	0.534	179.2	-13	-56	-27
15811	0552-041	2.376	167.0	59	-67	-14

Tabulka 8.4: – pokračování

NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]
16280	0612+177	0.360	190.1	23	-50	-39
17270	0657+320	0.691	149.4	15	-40	13
18271	0738-171	1.267	115.1	51	-22	42
18906	0802+386	0.304	187.1	0	-64	-14
19138	0810+489	0.258	166.5	8	-23	11
19228	0813+217	0.411	195.4	13	-56	-30
20587	0854+404	0.190	171.8	16	-65	11
20774	0858+363	0.207	210.2	0	-24	-8
21302	0912+536	1.563	224.0	-42	-58	-28
21338	0913+442	0.267	178.4	10	-31	9
22454	0941-068	0.433	187.5	35	-33	-28
23636	1008+290	0.729	190.1	19	-73	-6
25087	1039+145	0.299	145.0	61	-30	11
25836	1055-072	0.827	276.3	-47	-9	-15
25908	1056+345	0.288	220.5	-13	-60	-9
26379	1105-040	0.445	188.2	30	-34	-24
27279	1121+216	1.040	269.2	-45	-19	-14
29016	1153+135	0.646	277.5	-50	-16	-4
29040	1154+186	0.330	274.0	-34	-13	-2
29359	1159-098	0.204	240.0	-4	-14	-5
29642	1204-136	0.306	261.7	-50	-36	-13
29898	1208+576	0.554	131.5	56	-4	30
30094	1212+023	0.557	140.0	147	-32	-35
30996	1229-012	0.199	271.2	-37	-22	3
31183	1232+479	0.164	144.1	43	-8	19
31347	1235+422	0.506	315.0	-93	29	-16
31458	1237-028	0.216	280.9	-26	-9	9
31748	1242-105	0.349	257.1	-16	-19	1
31890	1244+145	0.220	301.9	-54	4	14
31894	1244-125	0.204	277.9	-31	-15	11
32057	1247+550	1.287	192.7	54	-125	77
32398	1254+223	0.209	189.1	37	-55	2
32727	1300+263	0.854	277.8	-117	-58	14
33303	1310+583	0.214	113.0	30	11	10
33481	1313-198	0.636	273.8	-65	-44	20
33693	1317+453	0.463	283.7	-95	-40	11
33833	1319+466	0.260	288.5	-33	-10	8
34060	1323-514	0.510	266.8	-101	-80	18
34206	1325+581	0.426	300.9	-61	-8	-3

Tabulka 8.4: – pokračování

NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]
34829	1337+705	0.405	266.3	-29	-29	19
35201	1344+572	0.276	312.3	-22	4	2
35341	1346+121	0.535	162.5	88	-51	-25
35878	1356-233	0.335	261.8	-29	-35	16
36477	1408+323	0.254	178.4	47	-32	10
37455	1426+613	0.273	273.3	-27	-28	25
38361	1444-174	1.144	252.6	-39	-77	28
40489	1529+141	0.179	177.2	17	-2	4
40607	1532+129	0.248	221.7	15	-22	12
40881	1538+333	0.186	295.4	-5	-2	18
42202	1609+135	0.551	178.5	41	-26	-8
42265	1610+166	0.220	217.9	39	-74	25
43145	1633+433	0.373	144.2	32	7	-3
43149	1633+571	1.644	317.2	-93	-27	51
43310	1637+335	0.474	183.0	65	-27	2
43383	1639+153	0.670	178.6	76	-55	-25
43402	1639+537	0.228	211.4	27	-8	19
43454	1641+387	0.165	8.7	-21	23	5
43880	1655+215	0.582	178.0	59	-30	-12
44303	1708-147	0.400	136.0	24	-4	-43
45565	1748+708	1.681	311.4	-35	-30	50
46138	1811+324A	0.260	226.4	53	-32	34
46139	1811+324B	0.259	227.0	52	-31	34
46319	1818+126	0.216	12.5	-18	35	17
47243	1855+338	0.354	7.7	-38	24	22
48454	1953-011	0.827	212.3	38	-27	10
48815	2007-219	0.331	160.8	10	-26	-14
50189	2054-050	0.802	106.6	-20	-6	-44
50382	2059+190	0.336	203.3	60	-22	-7
50392	2059+247	0.379	52.0	-36	18	-3
50698	2107-216	0.562	173.2	20	-52	-13
51749	2136+229	0.294	64.9	-44	12	-11
51874	2139+132	0.347	107.2	-32	-14	-53
54650	2240-017	0.252	220.5	69	-21	5
55053	2248+293	1.255	83.9	-97	-23	-36
55164	2251-070	2.585	105.4	-76	-55	-56
55288	2253-081	0.551	95.9	-47	-21	-25
55343	2254+126	0.187	89.4	-47	-14	-21
55932	2306-220	0.339	106.0	-28	-25	-14

Tabulka 8.4: – pokračování

NLTT	WD	μ [arcsec·yr ⁻¹]	θ [°]	U [km·s ⁻¹]	V [km·s ⁻¹]	W [km·s ⁻¹]
56220	2311–068	0.382	244.1	63	3	16
56245	2312–024	0.618	71.3	-73	-1	-10
56473	2316–065	1.707	201.0	216	-167	-52
56801	2322–181	0.236	91.6	-86	-38	-30
57146	2329+267	0.441	86.7	-60	-22	-13
58183	2348–244	0.257	204.0	57	-34	9
58386	2352+401	0.573	159.2	11	-21	-56

Literatura

- [1] Adams W. S. (1915): The Spectrum of the Companion of Sirius. *PASP* **27**, 236.
- [2] Adams W. S. (1925): The Relativity Displacement of the Spectral Lines in the Companion of Sirius. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **11**, 382-387.
- [3] Ali A., Griem H. (1965): Theory of Resonance Broadening of Spectral Lines by Atom-Atom Impacts. *Phys. Rev.* **140**, A1044.
- [4] Ali A., Griem H. (1966): Theory of Resonance Broadening of Spectral Lines by Atom-Atom Impacts (errata). *Phys. Rev.* **144**, A366.
- [5] Althaus L.G., Benvenuto O.G. (1997): Evolution of helium white dwarfs of low intermediate masses. *ApJ* **477**, 313-334.
- [6] Althaus L.G., Benvenuto O.G. (1998): Evolution of DA white dwarfs in the context of a new theory of convection. *MNRAS* **296**, 206-216.
- [7] Barstow M.A., Bond H.E., Holberg J.B., Burleigh M.R., Hubeny I., Koester D. (2005): Hubble Space Telescope spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B. *MNRAS* **362**, 1134-1142.
- [8] Beauchamp A., Wesemael F., Bergeron P., Fontaine G., Saffer R.A., Liebert J., Brassard P. (1999): Spectroscopic Studies of DB White Dwarfs: The Instability Strip of the Pulsating DB (V777 Herculis) Stars. *ApJ* **516**, 887-891.
- [9] Benvenuto O.G., Althaus L.G. (1998): Evolution of helium white dwarfs with hydrogen envelopes. *MNRAS* **293**, 177-188.
- [10] Benvenuto O.G., Althaus L.G. (1999): Grids of white dwarf evolutionary models with masses from $M = 0.1$ to $1.2 M_{\odot}$. *MNRAS* **303**, 30-38.
- [11] Bergeron P., Gianninas A., Boudreault S. (2007): The Mass Distribution of White Dwarfs: An Unwavering Obsession. *15th European Workshop on White Dwarfs ASP Conference Series* **372**, editors Napiwotzki R. & Burleigh M.R., 29.
- [12] Bergeron P., Leggett S.K., Ruiz M.T. (2001): Photometric and Spectroscopic Analysis of Cool White Dwarfs with Trigonometric Parallax Measurements. *ApJS* **133**, 413-449.

- [13] Bergeron P., Ruiz M.T., Leggett S.K. (1997): The Chemical Evolution of Cool White Dwarfs and the Age of the Local Galactic Disk. *ApJS* **108**, 339.
- [14] Bergeron P., Saffer R.A., Liebert J. (1992): A spectroscopic determination of the mass distribution of DA white dwarfs. *ApJ* **394**, 228-247.
- [15] Bergeron P., Wesemael F., Fontaine G. (1992): On the influence of the convective efficiency on the determination of the atmospheric parameters of DA white dwarfs. *ApJ* **387**, 288-293.
- [16] Bessel F. W. (1844): Extract of a letter from on the proper motions of Procyon and Sirius. *MNRAS* **6**, 136-141.
- [17] Binney J., Merrifield M. (1998): Galactic astronomy. Princeton University Press, Princeton.
- [18] Bond G. (1862): On the Companion of Sirius, by Prof. G. Bond, Director of the Observatory of Harvard College. *AN* **57**, 131.
- [19] Boss L. (1910): Preliminary General Catalogue of 6188 stars for the epoch 1900. Carnegie Institution, Washington, D.C.
- [20] Boyle B.J. (1989): The space distribution of DA white dwarfs. *MNRAS* **240**, 533-549.
- [21] Bragaglia A., Renzini A., Bergeron P. (1995): Temperatures, gravities, and masses for a sample of bright DA white dwarfs and the initial-to-final mass relation. *ApJ* **443**, 735-752.
- [22] Dirac P.A.M. (1926): On the Theory of Quantum Mechanics. *Proc. Roy. Soc.* **A112**, 661.
- [23] Dufour P., Bergeron, P., Fontaine G. (2005): Detailed Spectroscopic and Photometric Analysis of DQ White Dwarfs. *ApJ* **627**, 404-417.
- [24] Dufour P., Bergeron P., Schmidt G.D., Liebert J., Harris H.C., Knapp G.R., Anderson S.F., Schneider D.P. (2006): Model Atmosphere Analysis of the Weakly Magnetic DZ White Dwarf G165-7. *ApJ* **651**, 1112-1119.
- [25] Dufour P., Bergeron P., Liebert J., Harris H.C., Knapp G.R., Anderson S.F., Hall P.B., Strauss M.A., Collinge M.J., Edwards M.C. (2007): On the Spectral Evolution of Cool, Helium-Atmosphere White Dwarfs: Detailed Spectroscopic and Photometric Analysis of DZ Stars. *ApJ* **663**, 1291-1308.
- [26] Eddington A.S. (1924): On the relation between the masses and luminosities of the stars. *MNRAS* **84**, 308-332.
- [27] Eddington A.S. (1926): The Internal constitution of the Stars. Cambridge University Press, Cambridge.

- [28] Einstein A. (1908): Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* **4**, 411-462.
- [29] Eisenstein D.J., Liebert J., Harris H.C., Kleinman S.J., Nitta A., Silvestri N., Anderson S.A., Barentine J.C., Brewington H.J., Brinkmann J., Harvanek M., Krzesiński J., Neilsen E.H. Jr., Long D., Schneider D.P., Snedden S.A. (2006): A Catalog of Spectroscopically Confirmed White Dwarfs from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 4. *ApJS* **167**, 40-58.
- [30] Fermi E. (1926): Quantization of the Monatomic Perfect Gas. *Rend. Acc. Lincei* **3**, 145.
- [31] Finley D.S., Koester D. (1997): PG 0922+162: Discovery of the Youngest Visual Double Degenerate. *ApJ* **489**, L79.
- [32] Fleming T.A., Liebert J., Green R.F. (1986): The luminosity function of DA white dwarfs. *ApJ* **308**, 176-189.
- [33] Fontaine G., Villeneuve B., Wilson J. (1981): On the acoustic flux of Sirius A. *ApJ* **243**, 550-556.
- [34] Fowler R.H. (1926): On dense matter. *MNRAS* **87**, 114-122.
- [35] Giclas H.L., Burnham R. Jr., Thomas N.G. (1971): Lowell proper motion survey Northern Hemisphere. The G numbered stars. 8991 stars fainter than magnitude 8 with motions $> 0''.26/\text{year}$. *Lowell Obs.*
- [36] Giclas H.L., Burnham R. Jr., Thomas N.G. (1978): Lowell Proper Motion Survey - Southern Hemisphere Catalog 1978. , *Lowell Obs. Bull.* **8**, 89.
- [37] Gray D.F. (1992): The Observation and Analysis of Stellar Photospheres (2nd edition). Cambridge University Press, Cambridge.
- [38] Green R.F., Schmidt M., Liebert J. (1986): The Palomar-Green catalog of ultraviolet-excess stellar objects. *ApJS* **61**, 305-352.
- [39] Hamada T., Salpeter E.E. (1961): Models for Zero-Temperature Stars. *ApJ* **134**, 683.
- [40] Hansen B.M.S., Liebert J. (2003): Cool White Dwarfs. *ARA&A* **41**, 465-515.
- [41] Holberg J.B., Oswalt T.D., Sion E.M. (2002): A Determination of the Local Density of White Dwarf Stars. *ApJ* **571**, 512-518.
- [42] Holberg J.B., Barstow M.A., Burleigh M.R. (2003): An Archive of IUE Low-Dispersion Spectra of the White Dwarf Stars. *ApJS* **147**, 145-166.
- [43] Holberg J.B., Sion E.M., Oswalt T., McCook G.P., Foran S., Subasavage J.P. (2008): A new look at the local white dwarf population. *AJ* **135**, 1225-1239.

- [44] Hubeny I., Hummer D.G., Lanz T. (1994): NLTE model stellar atmospheres with line blanketing near the series limits. *A&A* **282**, 151-167.
- [45] Hummer D.G., Mihalas D. (1988): The equation of state for stellar envelopes. I - an occupation probability formalism for the truncation of internal partition functions. *ApJ* **331**, 794-814.
- [46] Chandrasekhar S. (1935): The highly collapsed configurations of a stellar mass (Second paper). *MNRAS* **95**, 207-225.
- [47] Chandrasekhar S. (1967): An introduction to the study of stellar structure. New York: Dover.
- [48] Chiba M., Beers T.C. (2000): Kinematics of Metal-poor Stars in the Galaxy. III. Formation of the Stellar Halo and Thick Disk as Revealed from a Large Sample of Nonkinematically Selected Stars. *AJ* **119**, 2843-2865.
- [49] Christlieb N., Wisotzki L., Reimers D., Homeier D., Koester D., Heber U. (2001): The stellar content of the Hamburg/ESO survey I. Automated selection of DA white dwarfs. *A&A* **366**, 898-912.
- [50] Iben I., Jr., Tutukov, A.V. (1984): Cooling of low-mass carbon-oxygen dwarfs from the planetary nucleus stage through the crystallization stage. *ApJ* **282**, 615-630.
- [51] Iben I., Jr., Tutukov, A.V. (1986): On the formation and evolution of a helium degenerate dwarf in a close binary. *ApJ* **311**, 742-752.
- [52] Johnson D.R.H., Soderblom D.R. (1987): Calculating galactic space velocities and their uncertainties, with an application to the Ursa Major group. *AJ* **93**, 864-867.
- [53] Jordan S. (2007): Gaia – A White Dwarf Discovery Machine. *15th European Workshop on White Dwarfs ASP Conference Series* **372**, editors Napiwotzki R. & Burleigh M.R., 139.
- [54] Kawka A. (2004): A Study of White Dwarfs in the Solar Neighbourhood. Ph.D. thesis, Murdoch University.
- [55] Kawka A., Vennes S. (2004): Ap Stars as Progenitors of Magnetic White Dwarfs. *Proceedings of the IAU Symp.* **224**: A-Star Puzzle (Cambridge University Press), editors Zverko J., Ziznovsky J., Adelman S.J. & Weiss W.W., 879-885.
- [56] Kawka A., Vennes S. (2006): Spectroscopic Identification of Cool White Dwarfs in the Solar Neighborhood. *ApJ* **643**, 402-415.
- [57] Kawka A., Vennes S. (2007): White Dwarfs in the GALEX Survey. *Proceedings of IAU2006 JD4*, The UV Universe: Stars from Birth to Death, Universidad Complutense de Madrid, editors Gomez de Castro A.I. & Barstow M.A., 237-242.

- [58] Kawka A., Vennes S., Thorstensen J.R. (2004): Observations of White Dwarfs in the Solar Neighborhood. *AJ* **127**, 1702-1711.
- [59] Kawka A., Vennes S., Schmidt G.D., Wickramasinghe D.T., Koch R. (2007): Spectropolarimetric Survey of Hydrogen-rich White Dwarf Stars. *ApJ* **654**, 499-520.
- [60] Kilkenny D., O'Donoghue D., Koen C., Stobie R.S., Chen A. (1997): The Edinburgh-Cape Blue Object Survey - II. Zone 1 - the North Galactic CAP. *MNRAS* **287**, 867-893.
- [61] Koester D., Chanmugam G. (1990): Physics of white dwarf stars. *Reports on Progress in Physics* **53**, 837-915.
- [62] Koester D., Knist S. (2006): New DQ white dwarfs in the Sloan Digital Sky Survey DR4: confirmation of two sequences. *A&A* **454**, 951-956.
- [63] Koester D., Napiwotzki R., Christlieb N., Drechsel H., Hagen H.-J., Heber U., Homeier D., Karl C., Leibundgut B., Moehler S., Nelemans G., Pauli E.-M., Reimers D., Renzini A., Yungelson L. (2001): High-resolution UVES/VLT spectra of white dwarfs observed for the ESO SN Ia progenitor survey (SPY). I. *A&A* **378**, 556-568.
- [64] Kroupa P., Tout Ch.A., Gilmore G. (1993): The distribution of low-mass stars in the Galactic disc. *MNRAS* **262**, 545-587.
- [65] Lamontagne R., Demers S., Wesemael F., Fontaine G., Irwin M.J. (2000): The Montreal-Cambridge-Tololo Survey of Southern Subluminous Blue Stars: The South Galactic Cap. *AJ* **119**, 241-260.
- [66] Landolt A.U. (1968): A New Short-Period Blue Variable. *ApJ* **153**, 151.
- [67] Lasker B.M., Hesser J. E. (1971): High-Frequency Stellar Oscillations.VI. R548, a Periodically Variable White Dwarf. *ApJ* **163**, L89.
- [68] Lemke M. (1997): Extended VCS Stark broadening tables for hydrogen - Lyman to Brackett series. *A&AS* **122**, 285-292.
- [69] Lépine S., Shara M.M. (2005): A Catalog of Northern Stars with Annual Proper Motions Larger than 0.15" (LSPM-NORTH Catalog). *AJ* **129**, 1483-1522.
- [70] Liebert J., Harris H.C., Dahn C.C., Schmidt G.D., Kleinman S.J., Nitta A., Krzesiński J., Eisenstein D., Smith J.A., Szkody P., Hawley S., Anderson S.F., Brinkmann J., Collinge M.J., Fan X., Hall P.B., Knapp G.R., Lamb D.Q., Margon B., Schneider D.P., Silvestri N. (2003): SDSS White Dwarfs with Spectra Showing Atomic Oxygen and/or Carbon Lines. *AJ* **126**, 2521-2528.
- [71] Liebert J., Bergeron P., Holberg J.B. (2005): The Formation Rate and Mass and Luminosity Functions of DA White Dwarfs from the Palomar Green Survey. *ApJS* **156**, 47-68.

- [72] Luyten W.J. (1950): Apparent Magnitudes and Color Indices for Seventy-Four White Dwarfs and Degenerate Stars. *ApJ* **112**, 212.
- [73] Luyten W.J. (1955): Luyten Five Tenths Catalogue. Minneapolis: Lund Press.
- [74] Luyten W.J. (1957): A Catalogue of 9867 Stars in the Southern Hemisphere with Proper-Motions Exceeding 0.2" Annually. Minneapolis: Lund Press.
- [75] Luyten W.J. (1963): Bruce proper motion survey, The general catalogue. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- [76] Luyten W.J. (1979a): LHS Catalogue. A Catalogue of Stars with Proper Motions Exceeding 0,5" Annually. Minneapolis: University of Minnesota Press, 2nd edition.
- [77] Luyten W.J. (1979b): New Luyten Catalogue of Stars with Proper Motions Larger than Two-Tenths of an Arcsecond. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- [78] Marsh M.C., Barstow M.A., Buckley D.A., Burleigh M.R., Holberg J.B., Koester D., O'Donoghue D., Penny A.J., Sansom A.E. (1997): An EUV-selected sample of DA white dwarfs from the ROSAT All-Sky Survey - I. Optically derived stellar parameters. *MNRAS* **286**, 369-383.
- [79] Mestel L. (1952): On the theory of white dwarf stars. *MNRAS* **112**, 583.
- [80] Mihalas D. (1978): Stellar atmospheres /2nd edition/. W. H. Freeman and Co., San Francisco.
- [81] Ostlie D.A., Carroll B.W. (1996): An Introduction to Modern Stellar Astrophysics. Addison Wesley Publishing Company, 2nd edition.
- [82] Pauli E.-M., Napiwotzki R., Altmann M., Heber U., Odenkirchen M., Kerber F. (2003): 3D kinematics of white dwarfs from the SPY project. *A&A* **400**, 877-890.
- [83] Pauli E.-M., Napiwotzki R., Heber U., Altmann M., Odenkirchen M. (2006): 3D kinematics of white dwarfs from the SPY project. II. *A&A* **447**, 173-184.
- [84] Reid I.N. (2005): High-Velocity White Dwarfs and Galactic Structure. *ARA&A* **43**, 247-292.
- [85] Reid I.N., Liebert J., Schmidt G.D. (2001): Discovery of a Magnetic DZ White Dwarf with Zeeman-Split Lines of Heavy Elements. *ApJ* **550**, L61-L63.
- [86] Rose W.K. (1998): Advanced Stellar Astrophysics. Cambridge University Press, Cambridge.
- [87] Russell H. N. (1914): *Nature* **93**, 252.

- [88] Salim S., Gould A. (2002): Classifying Luyten Stars Using an Optical-Infrared Reduced Proper-Motion Diagram. *ApJ* **575**, L83-L86.
- [89] Salim S., Gould A. (2003): Improved Astrometry and Photometry for the Luyten Catalog. II. Faint Stars and the Revised Catalog. *ApJ* **582**, 1011-1031.
- [90] Salpeter E.E. (1955): The Luminosity Function and Stellar Evolution. *ApJ* **121**, 161.
- [91] Scalo J.M. (1986): The initial mass function of massive stars in galaxies Empirical evidence. Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., 451-466.
- [92] Schatzman E.L. (1958): White Dwarfs. North-Holland Pub. Co., Amsterdam.
- [93] Schmidt M. (1959): The Rate of Star Formation. *ApJ* **129**, 243.
- [94] Schmidt M., Green R.F. (1983): Quasar evolution derived from the Palomar bright quasar survey and other complete quasar surveys. *ApJ* **269**, 352-374.
- [95] Schmidt G.D., Liebert J., Harris H.C., Dahn C.C., Leggett S.K. (1999): Discovery of a Highly Magnetic White Dwarf with Strong Carbon Features. *ApJ* **512**, 916-919.
- [96] Sion E.M., Greenstein J.L., Landstreet J.D., Liebert J., Shipman H.L., Wegner G.A. (1983): A proposed new white dwarf spectral classification system. *ApJ* **269**, 253-257.
- [97] Sion E.M., Fritz M.L., McMullin J.P., Lallo M.D. (1988): Kinematical tests of white dwarf formation channels and evolution. *AJ* **96**, 251-274.
- [98] Torres S., García-Berro E., Isern J., Figueras F. (2005): Simulating Gaia performances on white dwarfs. *MNRAS* **360**, 1381-1392.
- [99] van Maanen A. (1917): Two Faint Stars with Large Proper Motion. *PASP* **29**, 258.
- [100] Vennes S., Thejll P.A., Génova-Galvan R., Dupuis J. (1997): Hot White Dwarfs in the Extreme Ultraviolet Explorer Survey. II. Mass Distribution, Space Density, and Population Age. *ApJ* **480**, 714.
- [101] Vennes S., Thejll P.A., Wickramasinghe D.T., Bessell M.S. (1996): Hot White Dwarfs in the Extreme Ultraviolet Explorer Survey. I. Properties of a Southern Hemisphere Sample. *ApJ* **467**, 782.
- [102] Voss B., Koester D., Napiwotzki R., Christlieb N., Reimers D. (2007): High-resolution UVES/VLT spectra of white dwarfs observed for the ESO SN Ia progenitor survey. II. DB and DBA stars. *A&A* **470**, 1079-1088.
- [103] Walker I.R., Mihos J.Ch., Hernquist L. (1996): Quantifying the Fragility of Galactic Disks in Minor Mergers. *ApJ* **460**, 121.

- [104] Wegner G., Nelan E.P. (1987): Ultraviolet and visual spectroscopy of DB white dwarfs. *ApJ* **319**, 916-929.
- [105] Winget D.E., van Horn H.M., Tassoul M., Fontaine G., Hansen C.J., Carroll B.W. (1982a): Hydrogen-driving and the blue edge of compositionally stratified ZZ Ceti star models. *ApJ* **252**, L65-L68.
- [106] Winget D.E., Robinson E.L., Nather R.D., Fontaine G. (1982b): Photometric observations of GD 358 - DB white dwarfs do pulsate. *ApJ* **262**, L11-L15.
- [107] Wolff B., Jordan S., Koester D. (1996): DA white dwarfs in pointed observations from the ROSAT archive. *A&A* **307**, 149.
- [108] Wood M.A. (1992): Constraints on the age and evolution of the Galaxy from the white dwarf luminosity function. *ApJ* **386**, 539-561.
- [109] Wood M.A. (1995): White Dwarfs, ed. Koester D. a Werner K. (New York: Springer), **41**.