

**UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH  
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA**

**SPEKTROSKOPICKÁ AKTIVITA  
SYMBIOTICKEJ DVOJHVIEZDY AG DRACONIS**

**Diplomová práca**

**2018**

**Bc. Jaroslav MERC**

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach  
Prírodovedecká fakulta



# Spektroskopická aktivita symbiotickej dvojhviezdy AG Draconis

Diplomová práca

**Študijný odbor:** Fyzika

**Študijný program:** Teoretická fyzika a astrofyzika

**Školiace pracovisko:** Katedra teoretickej fyziky a astrofyziky

**Vedúci práce:** doc. RNDr. Rudolf Gális, PhD.

Košice 2018

Bc. Jaroslav Merc

## **Pod'akovanie**

Týmto by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej práce, doc. RNDr. Rudolfovi Gálishovi, PhD. za pomoc, cenné rady a pripomienky a za čas, ktorý mi venoval pri písaní tejto práce. Zároveň sa chcem poďakovať mojej rodine a priateľke, ktorí mi boli a sú nielen počas písania tejto práce oporou a podporou.



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach  
Prírodovedecká fakulta

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Bc. Jaroslav Merc  
**Študijný program:** Teoretická fyzika a astrofyzika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** 4.1.1. fyzika  
**Typ záverečnej práce:** Diplomová práca  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický
- Názov:** Spektroskopická aktivita symbiotickej dvojhviezdy AG Draconis  
**Názov EN:** Spectroscopic activity of the symbiotic binary AG Draconis  
**Cieľ:** Cieľom práce je štatistická a periódová analýza spektroskopických pozorovaní symbiotického systému AG Draconis so zameraním na dlhodobé zmeny vlastností vybraných emisných spektrálnych čiar.  
**Literatúra:** Kenyon, S. J., 1986, The symbiotic stars, Cambridge University Press, Cambridge  
Warner, B.: 1995, Cataclysmic Variable Stars, Cambridge University Press, Cambridge  
Hellier, C.: 2001, Cataclysmic Variable Stars - How and Why they Vary, Springer, Chichester  
**Anotácia:** Predložená práca sa zaoberá spektroskopickým výskumom symbiotickej premennej hviezdy AG Draconis. Premennosť tohto objektu sa vyznačuje striedaním období pokoja a aktivity, ktoré sú charakterizované sériami jednotlivých vzplanutí opakujúcich sa s približne ročnou periódou. Výnimočné množstvo pozorovaní za posledných 125 rokov prispelo k objasneniu množstva fyzikálnych javov prebiehajúcich v tomto objekte. Napriek tomu však zostáva mnoho ďalších, ktoré na svoje vysvetlenie a popis ešte len čakajú. Cieľom tejto práce je štúdium spektroskopických dát systému AG Dra so zameraním na dlhodobé zmeny vlastností vybraných emisných spektrálnych čiar využitím moderných metód štatistickej a periódovej analýzy.  
**Kľúčové slová:** Interagujúce dvojhviezdy, symbiotické premenné hviezdy, pulzácie, korelačná analýza, periódová analýza, spektroskopia, fotometria.  
**Vedúci:** doc. RNDr. Rudolf Gális, PhD.  
**Ústav :** ÚFV - Ústav fyzikálnych vied  
**Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce:** bez obmedzenia

**Dátum schválenia:** 03.10.2016

Dr.h.c. prof. RNDr. Alexander Feher, DrSc.  
riaditeľ ústavu

## Abstrakt

Predložená práca sa zaoberá spektroskopickým výskumom symbiotickej dvojhviezdy AG Draconis. Tento systém pravidelne prechádza obdobiami pokoja a aktivity, ktoré pozostávajú z individuálnych vzplanutí. Po siedmych rokoch pokoja prešiel na začiatku roka 2015 tento symbiotický systém do nového aktívneho obdobia, počas ktorého boli doposiaľ pozorované tri vzplanutia. V práci boli analyzované nové fotometrické a spektroskopické pozorovania AG Dra. Z analýzy vyplynulo, že všetky tri vzplanutia aktuálneho obdobia aktivity môžu byť klasifikované ako vedľajšie, *horúce* vzplanutia symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. Vlastnosti aktuálneho obdobia boli detailne porovnané s predošlými, čo zvýraznilo jeho výnimočnosť. Nové spektroskopické pozorovania spracované v práci boli použité aj na spresnenie periódy orbitálneho pohybu tejto symbiotickej dvojhviezdy. Na základe týchto výsledkov boli analyzované orbitálne variácie fotometrických a spektroskopických vlastností AG Dra a ich dôsledky pre analýzu vývoja teploty horúcej zložky tejto symbiotickej sústavy za posledných 40 rokov.

**Kľúčové slová:** interagujúce dvojhviezdy, symbiotické premenné hviezdy, pulzácie, korelačná analýza, periódová analýza, spektroskopica, fotometria.

## Abstract

The presented diploma thesis deals with spectroscopic research of the symbiotic binary star AG Draconis. The system regularly undergoes through stages of quiescence and activity that consists of individual outbursts. After seven years of quiescence, in the beginning of 2015, the symbiotic system entered the new active stage, during which three outbursts have been observed so far. The new photometric and spectroscopic observations of AG Dra obtained during its recent activity stage were analysed in this thesis. The analysis showed that all three outbursts of the recent stage of activity were minor, *hot* outburst of the symbiotic binary AG Dra. The recent stage of the activity was compared to the previous ones, which highlights its exceptional character. New spectroscopic observations processed in the presented thesis were also used to determine the period of orbital movement. Based on these results, the orbital variability of the photometric and spectroscopic properties of AG Dra were analysed, as well as their consequences for the analysis of the temperature evolution of the hot component in AG Dra during last 40 years.

**Key words:** interacting binaries, symbiotic stars, pulsations, correlation analysis, period analysis, spectroscopy, photometry.

# Obsah

<b>Zoznam obrázkov</b>	<b>8</b>
<b>Zoznam tabuliek</b>	<b>9</b>
<b>Zoznam skratiek a značiek</b>	<b>10</b>
<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Symbiotické premenné hviezdy</b>	<b>15</b>
1.1 Zložky symbiotických dvojhviezd . . . . .	17
1.2 Klasifikácia symbiotických dvojhviezd . . . . .	18
1.3 Symbiotická aktivita a premennosť . . . . .	19
<b>2 AG Draconis</b>	<b>21</b>
2.1 Výskum AG Dra v optickej oblasti . . . . .	27
2.2 Výskum AG Dra v iných oblastiach spektra . . . . .	29
<b>3 Pozorovací materiál</b>	<b>33</b>
3.1 Fotometrický pozorovací materiál . . . . .	33
3.2 Spektroskopický pozorovací materiál . . . . .	34
<b>4 Spracovanie pozorovacieho materiálu</b>	<b>36</b>
4.1 Normalizácia spektier . . . . .	37
4.2 Ekvivalentné šírky spektrálnych čiar . . . . .	37
4.2.1 Chyby určenia ekvivalentných širok . . . . .	39
4.3 Integrálne toky žiarenia v spektrálnych čiarach . . . . .	40
4.4 Radiálne rýchlosti . . . . .	41
4.4.1 Radiálne rýchlosti chladnej zložky . . . . .	42
4.5 Ďalšie parametre spektrálnych čiar . . . . .	43

<b>5</b>	<b>Výsledky analýzy a diskusia</b>	<b>44</b>
5.1	Radiálne rýchlosti chladnej zložky AG Dra . . . . .	45
5.2	Orbitálna závislosť fotometrických a spektroskopických vlastností . . .	49
5.2.1	Vplyv orbitálneho pohybu na pomer $\text{He II}/\text{H}_\beta$ . . . . .	52
5.2.2	Absorpčná komponenta emisnej spektrálnej čiary $\text{H}_\beta$ . . . . .	54
5.3	Teplota horúcej zložky AG Dra . . . . .	55
5.3.1	Zanedbanie toku žiarenia spektrálnej čiary $\text{He I}$ . . . . .	57
5.3.2	Ďalšie vplyvy . . . . .	58
5.3.3	Vývoj teploty bieleho trpaslíka v sústave AG Dra . . . . .	59
5.4	Aktuálne obdobie aktivity AG Dra . . . . .	62
5.4.1	Fotometrické vlastnosti . . . . .	63
5.4.2	Spektroskopické vlastnosti . . . . .	65
5.5	Krátkodobé variácie AG Dra v optickej oblasti . . . . .	74
	<b>Záver</b>	<b>79</b>
	<b>Referencie</b>	<b>82</b>
	<b>A Pozorovací materiál</b>	<b>93</b>
A.1	Fotometrické merania . . . . .	93
A.2	Spektroskopické merania . . . . .	94
	<b>B Ionizačná energia atómov a iónov</b>	<b>95</b>
	<b>C Softvérové prostredia CORRLAB, RADIFIT a EMISPECT</b>	<b>96</b>
C.1	CORRLAB . . . . .	96
C.2	RADIFIT . . . . .	98
C.3	EMISPECT . . . . .	99



# Zoznam obrázkov

1.1	Schematický model symbiotickej dvojhviezdy . . . . .	17
2.2	Historická svetelná krivka AG Dra počas rokov 1889-2018 . . . . .	24
3.3	Ukážka optického spektra AG Dra . . . . .	35
4.4	Normalizácia spektra na priebeh kontinua . . . . .	38
4.5	Vlastnosti emisných spektrálnych čiar . . . . .	39
4.6	Priepustnosť vybraných fotometrických filtrov . . . . .	40
5.7	Periodogramy radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra . . . . .	46
5.8	Syntetické krivky radiálnych rýchlostí AG Dra . . . . .	48
5.9	Fotometrické svetelné krivky AG Dra v $U$ , $B$ a $V$ filtroch . . . . .	50
5.10	Orbitálne fázové diagramy . . . . .	51
5.11	Vplyv orbitálnych variácií na pomer $\text{He II}/\text{H}\beta$ . . . . .	53
5.12	Profily emisných čiar $\text{H}\beta$ počas rôznych orbitálnych fáz AG Dra . . . . .	54
5.13	Dôsledky zjednodušenia na výpočet teploty horúcej zložky AG Dra . . . . .	58
5.14	Vývoj teploty horúcej zložky AG Dra . . . . .	61
5.15	Svetelné krivky AG Dra počas obdobia aktivity G . . . . .	63
5.16	Profily študovaných emisných čiar v spektre AG Dra . . . . .	66
5.17	Ekvivalentné šírky študovaných spektrálnych čiar v období 1976-2018 . . . . .	67
5.18	Závislosť ekvivalentných šírok od jasnosti AG Dra v $B$ filtri . . . . .	69
5.19	Tabuľky korelačných koeficientov . . . . .	71
5.20	Krivky ekvivalentných šírok spektrálnych čiar počas vzplanutia G1 . . . . .	72
5.21	Krátkodobé fotometrické variácie AG Dra . . . . .	76
5.22	Svetelná krivka AG Dra získaná počas noci 4. apríla 2018 . . . . .	77
5.23	Rýchle zmeny ekvivalentných šírok spektrálnych čiar . . . . .	78
C.24	Logá softvérov CORRLAB a RADIFIT. . . . .	96
C.25	Užívateľské prostredie programu CORRLAB . . . . .	97

C.26	Užívateľské prostredie programu RADIFIT . . . . .	99
C.27	Užívateľské prostredie programu EMISPECT . . . . .	100

## Zoznam tabuliek

1.1	Najznámejšie a najjasnejšie symbiotické hviezdy . . . . .	16
4.1	Parametre fotometrických filtrov . . . . .	41
5.1	Pokojné a aktívne obdobia symbiotickej sústavy AG Dra . . . . .	64
A.1	Spracované fotometrické pozorovania AG Dra . . . . .	93
A.2	Spracované spektroskopické pozorovania AG Dra . . . . .	94
B.1	Ionizačná energia atómov a iónov . . . . .	95

# Zoznam skratiek a značiek

**a kol.** - a kolektív

**a pod.** - a podobne

**AAVSO** - Americká asociácia pozorovateľov premenných hviezd (ang. *The American Association of Variable Star Observers*)

**AGB** - z angličtiny „asymptotic giant branch“, hviezda z asymptotickej vetvy obrov

**And** - skratka súhvezdia Androméda

**ang.** - anglicky

**ARAS** - združenie amatérskych pozorovateľov spektier (ang. *Astronomical Ring for Access to Spectroscopy*)

**AU** - astronomická jednotka, jednotka vzdialenosti používaná v astronómii, 1 AU = 149 597 870 700 m

**Aql** - skratka súhvezdia Orol

**Aqr** - skratka súhvezdia Vodnár

**Å** - angström, jednotka dĺžky

**BD** - astrometrický katalóg hviezd Bonner Durchmusterung

**Car** - skratka súhvezdia Kýl

**Cet** - skratka súhvezdia Veľryba

**CoBE** - skratka družice (ang. *Cosmic Background Explorer*)

**CrB** - skratka súhvezdia Severná koruna

**Cru** - skratka súhvezdia Južný kríž

**Cyg** - skratka súhvezdia Labuť

**Dra** - skratka súhvezdia Drak

**erg** - jednotka energie v CGS systéme, 1 erg =  $10^{-7}$ J

**ESA** - Európska vesmírna agentúra (ang. *European Space Agency*)

**EXOSAT** - skratka družice (ang. *European X-ray Observatory Satellite*)

**FUSE** - skratka družice (ang. *Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*)

**FUV** - ďaleké ultrafialové žiarenie

**GSC** - katalóg hviezd Guide Star Catalog

**HIP** - katalóg hviezd Hipparcos catalogue

**IR** - infračervený

**IRAS** - skratka družice (ang. *InfraRed Astronomical Satellite*); katalóg hviezd pozorovaných družicou IRAS

**IUE** - skratka družice (ang. *International Ultraviolet Explorer*)

**JD** - juliánsky dátum

**Jy** - jansky, jednotka spektrálnej hustoty toku používaná v rádioastronómii

**L<sub>☉</sub>** - svietivosť Slnka,  $1 L_{\odot} = 3,8280 \times 10^{26} \text{ W}$

**Lyn** - skratka súhvezdia Rys

**M<sub>☉</sub>** - hmotnosť Slnka,  $1 M_{\odot} = 1,9886 \times 10^{30} \text{ kg}$

**mag** - magnitúda, jednotka magnitúdy

**napr.** -napríklad

**NASA** - Národný úrad pre letectvo a vesmír (ang. *National Aeronautics and Space Administration*)

**norm** - normalizovaný

**Oph** - skratka súhvezdia Hadonos

**Pav** - skratka súhvezdia Páv

**Peg** - skratka súhvezdia Pegas

**pc** - parsek, jednotka vzdialenosti používaná v astronómii,  $1 \text{ pc} = 3,0857 \times 10^{16} \text{ m}$

**R<sub>☉</sub>** - polomer Slnka,  $1 R_{\odot} = 6,9570 \times 10^8 \text{ m}$

**ROSAT** - skratka družice (ang. *Röntgen Satellite*)

**RX** - katalóg objektov pozorovaných družicou ROSAT

**SAO** - katalóg hviezd z Smithsonian Astrophysical Observatory

**SED** - spektrálna energetická distribúcia

**Sge** - skratka súhvezdia Šíp

**SWIFT** - skratka družice (ang. *Neil Gehrels Swift Observatory*, predtým *Swift Gamma-Ray Burst Mission*)

**Tel** - skratka súhvezdia Ďalekohľad

**tzv.** - takzvaný

**UV** - ultrafialový

**Vul** - skratka súhvezdia Líška

**XMM-Newton** - skratka družice (ang. *X-ray Multi-Mirror Mission*)

# Úvod

Interagujúce premenné hviezdy patria pravdepodobne k tomu najzaujímavejšiemu, čo paleta premenných hviezd ponúka. Zložky takýchto systémov sa navzájom výrazne ovplyvňujú, dochádza v nich k prenosu hmoty medzi zložkami a s takouto interakciou sú spojené zaujímavé pozorovateľné efekty. Symbiotické systémy sú zaujímavé nielen vzhľadom na ich aktivitu, ale aj na samotné spektrá týchto systémov. K pozorovanému toku žiarenia totiž prispievajú tri zdroje: dve hviezdy, ktoré sa výrazne líšia teplotou a cirkumbinárna hmlovina, v ktorej sa tvoria výrazné emisné čiary. Chladnou zložkou je zvyčajne červený alebo žltý obor s teplotou rádovo v tisícoch kelvinov. Horúcou zložkou je väčšinou biely trpaslík, ktorého teplota je bežne vyššia než 100 000 K.

AG Draconis patrí bezpochyby medzi najznámejšie a najčastejšie pozorované symbiotické dvojhviezdy. Prvé fotografické pozorovania systému AG Dra siahajú až do 19. storočia a vzhľadom na vysokú jasnosť a vhodnú polohu na oblohe je objekt pozorovaný systematicky dodnes. Vďaka takto výnimočnému množstvu pozorovaní za posledných takmer 130 rokov sa znalosti o tomto konkrétnom systéme i celej triede symbiotických dvojhviezd značne rozšírili. Napriek tomu, ešte aj v súčasnej dobe kozmických observatórií a veľkých pozemských ďalekohľadov, zostáva mnoho otázok otvorených a veľa javov nevysvetlených. Aj samotná AG Dra prináša s každým ďalším pozorovaným aktívnym obdobím nové otázky. Po dvojici vzplanutí v rokoch 2006 - 2008 bola táto sústava v období pokoja. To ukončila séria zatiaľ troch vzplanutí, z ktorých prvé bolo pozorované v prvej polovici roka 2015.

Predložená diplomová práca sa zaoberá spektroskopickým výskumom AG Dra a je rozdelená do niekoľkých kapitol. Prvá kapitola sa venuje symbiotickým hviezdám, podrobne diskutuje zaradenie týchto objektov do klasifikácie premenných hviezd a popisuje zložky týchto systémov, ako aj ich základné parametre. Uvedená je i klasifikácia symbiotických systémov. Časť tejto kapitoly sa zaoberá typickými pozorovateľnými prejavmi symbiotických dvojhviezd a ich premennosťou. Druhá kapitola podrobne popisuje študovanú symbiotickú dvojhviezdu AG Dra. V kapitole sú zhrnuté všetky

zistené parametre tejto sústavy a samostatná časť je venovaná symbiotickej aktivite AG Dra. Podrobne sú popísané periodicity pozorované v tomto systéme aj striedanie aktívnych a pokojných období. Druhá časť podáva prehľad publikovaných výsledkov pozorovaní AG Dra v rôznych oblastiach elektromagnetického spektra, od rádiovkej po röntgenovú oblasť.

Tretia kapitola podáva informácie o pozorovacom materiáli použitom v tejto diplomovej práci. Podrobne sú popísané zdroje ako fotometrických, tak aj spektroskopických dát. Informácie o spracovaní pozorovacieho materiálu sú podrobne zosumarizované v štvrtej kapitole. Táto kapitola môže zároveň slúžiť aj ako návod na redukciu a spracovanie fotometrického, ako aj spektroskopického materiálu pre ďalších záujemcov o danú problematiku.

Dosiahnuté výsledky sú uvedené v piatej kapitole. V prvej časti diskutujeme výsledky analýzy radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra, ktoré sme získali na základe merania polôh absorpčných čiar v spektre tejto dvojhviezdy. Jedným z prezentovaných výsledkov je spresnenie periódy orbitálneho pohybu, ktorej hodnotu využívame v ďalších častiach práce. Podrobne sa zaoberáme orbitálnou závislosťou fotometrických a spektroskopických vlastností AG Dra a jej dôsledkami pre pochopenie rozloženia hmoty v okolí tejto dvojhviezdy a pre odhady ďalších parametrov systému. Ďalšia časť je zameraná na vývoj teploty horúcej zložky systému za posledných takmer 40 rokov. Aby sme mohli študovať reálne zmeny teploty v dôsledku aktivity systému, je nutné presne identifikovať a redukovať efekty, ktoré spôsobujú zmenu pozorovaných parametrov, a ktoré súvisia s orbitálnym pohybom dvojhviezdy. Z tohto dôvodu samostatnú časť analýzy venujeme odhaleniu vplyvu orbitálneho pohybu na odhad teploty horúcej zložky. Rovnako konfrontujeme efekty, ktoré sú spôsobené často používanými aproximáciami vo výpočtoch teploty bieleho trpaslíka. Prezentujeme rektifikované odhady teploty horúcej zložky AG Dra. Významná časť práce sa venuje aktuálnemu obdobiu aktivity AG Dra, ktoré začalo v roku 2015. Diskutujeme fotometrické i spektroskopické vlastnosti tohto symbiotického systému počas aktuálneho aktívneho obdobia a venujeme sa aj porovnaniu jednotlivých vzplanutí v tomto období s predošlými pozorovaniami. V závere kapitoly sa zaoberáme krátkodobými variáciami AG Dra v optickej oblasti.

# Kapitola 1

## Symbiotické premenné hviezdy

Premenné hviezdy patria medzi najzaujímavejšie objekty stelárnej astrofyziky. Existuje mnoho typov premenných hviezd, ktorých zmeny jasnosti sú spôsobené z rôznych geometrických (zákryty, rotácia a iné) alebo fyzikálnych (zmeny polomeru, svietivosti a podobne) dôvodov. Rozsah týchto zmien je značne rôznorodý, od tisícín (napr. rotujúce premenné hviezdy) až po desiatky (supernovy) magnitúd. Podobne aj časové škály, na ktorých sa tieto zmeny dejú, pokrývajú interval od desaťtisícín sekundy (pulzary) až po milióny a miliardy rokov, ktoré súvisia s evolúciou samotných hviezd (Mikulášek a Zejda, 2013). Zmeny jasnosti sa môžu opakovať pravidelne (napr. cefeidy, zákrytové systémy) alebo nepravidelne (napr. symbiotické hviezdy), prípadne môže nastať iba jediná zmena jasnosti (vzplanutia nov a supernov). Dodajme, že okrem fotometrických variácií sa premenné hviezdy môžu prejavovať aj zmenami ich spektrálnych vlastností.

Medzi fyzikálne premenné hviezdy sa zaraďujú aj rôzne typy interagujúcich, väčšinou dvojhviezdnych systémov. Symbiotické premenné hviezdy niektorí autori zaraďujú k tzv. kataklizmatickým premenným hviezdám, v iných prácach tvoria samostatnú, príbuznú kategóriu. Tento typ objektov je charakterizovaný najmä náhlymi vzplanutiami v dôsledku termonukleárnych reakcií v povrchových vrstvách alebo vo vnútri hviezd a výtryskami hmoty. Medzi kataklizmatické premenné hviezdy sa ďalej zaraďujú supernovy, novy, rekurentné novy a trpasličie novy. V ďalšom texte sa zameriame na popis symbiotických systémov, veľa vlastností však majú tieto objekty spoločných.

Náhle zmeny jasnosti (vzplanutia) symbiotických premenných hviezd boli zaznamenané už začiatkom 20. storočia. Napríklad premennosť prototypu klasických symbiotických premenných hviezd s opakujúcimi sa vzplanutiami, hviezdy Z Andromedae, bola objavená už okolo roku 1900. Ako špecifickú skupinu premenných hviezd ich však



po prvýkrát vyčlenil až Merrill (1944). V súčasnosti poznáme už viac ako 200 symbiotických systémov (Allen, 1984a; Belcyński a kol., 2000) a to nielen v našej Galaxii. Pre väčšinu je prijatý dvojhviezdny model. Najznámejšie a najjasnejšie symbiotické hviezdy sú uvedené v tabuľke 1.1.

**Tab. 1.1:** Najznámejšie a najjasnejšie symbiotické hviezdy (Percy 2007).

Objekt	Magnitúda <sup>a</sup> [mag]	Spektrálny typ <sup>b</sup>	Periódka [d]
Z And	10,5 (7,0 - 12,0)	M2 III + B1eq	756,85
EG And	7,2 (7,1 - 7,8)	M2 IIIe	482,57
R Aqr	7,7 (5,8 - 12,4)	M7 IIIpe	16 071
CH Cyg	8,8 (5,6 - 8,5)	M7 IIIab + Be	5750
CI Cyg	11,1 (9,9 - 13,1)	M5 III + Bep	855,25
AG Dra	9,7 (7,9 - 10,3)	K3 IIIep	548,65
AR Pav	10,6 (7,4 - 13,6)	M3 III	605
AG Peg	8,7 (6,0 - 9,4)	M3 III + WN6	816,5
BL Tel	7,2 (7,1 - 9,4)	M + F5 Iab/b	778,6
RR Tel	6,5 (6,5 - 16,5)	M3.5-7 + WN3-6.5	387

*Poznámky:* <sup>a</sup>Priemerná magnitúda vo filtri *V*. V zátvorke je uvedený interval magnitúd, v ktorom sa jasnosť daného objektu môže meniť.

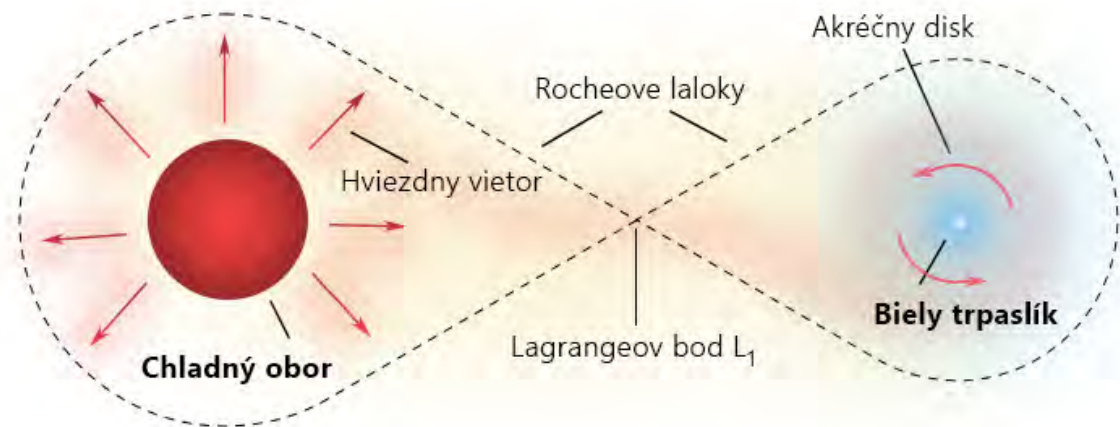
<sup>b</sup>Spektrálny typ chladnej zložky a horúcej zložky, ak je známy.

Samotná definícia symbiotických systémov je však, najmä v súčasnosti, problematická. V minulosti boli ako symbiotické klasifikované také objekty, ktorých optické spektrá vykazovali prítomnosť kontinua hviezdy neskorého spektrálneho typu s typickými absorpčnými štruktúrami ako pásy TiO a neutrálnych kovov a modrého kontinua s čiarami neutrálneho vodíka H I. Takéto spektrum svedčí o prítomnosti dvoch objektov s veľmi odlišnými teplotami. Okrem toho však ich spektrá vykazovali výrazné emisné čiary aj viacnásobne ionizovaných prvkov, napr. He I, He II, [O III], ktoré sa typicky pozorujú v planetárnych hmlovinách a tiež svedčia o prítomnosti horúceho zdroja (Allen, 1984b; Kenyon, 1986; Mikołajewska, 2003; Luna et al., 2013).

Niekedy však emisné čiary môžu byť menej výrazné alebo vôbec nepozorovateľné (Mukai a kol., 2016; Sokoloski a kol., 2017), a preto je táto definícia dnes už nedostatočná. Luna a kol. (2013) preto navrhli novú definíciu pre symbiotické sústavy ako dvojhviezdy, v ktorých obor prenáša dostatočné množstvo hmoty na bieleho trpaslíka, aby táto interakcia spôsobila pozorovateľnú aktivitu v niektorej spektrálnej oblasti.

## 1.1 Zložky symbiotických dvojhviezd

Schematický model symbiotickej dvojhviezdy je zobrazený na obrázku 1.1. Podľa všeobecne prijímaného modelu sa tieto dvojhviezdne sústavy skladajú z chladnej vyvinutej hviezdy - obra spektrálneho typu K alebo M (zriedkavejšie G), ktorý dominuje v spektre na dlhších vlnových dĺžkach. Hmotnosti týchto obrov pokrývajú interval  $(0,6 - 3,2) M_{\odot}$ , pričom maximum distribúcie ich hmotností sa nachádza okolo  $1,6 M_{\odot}$  (Mikołajewska, 2003).



Obr. 1.1: Schematický model symbiotickej dvojhviezdy.

Druhou zložkou symbiotických sústav je najčastejšie horúci biely trpaslík<sup>1</sup>, ktorý dominuje v modrej až UV oblasti spektra. Špecifikom týchto bielych trpaslíkov je ich vysoká teplota  $T_{\text{eff}} > 10^5 \text{ K}$  a svietivosť  $L > (10^2 - 10^4) L_{\odot}$  (Skopal, 2012). Hmotnosť prevažnej väčšiny bielych trpaslíkov v symbiotických sústavách sa nachádza v intervale  $(0,4 - 0,8) M_{\odot}$ . Aj keď najviac ich má hmotnosť okolo  $0,6 M_{\odot}$  (Mikołajewska, 2007), existujú aj symbiotické systémy s hmotnejším bielym trpaslíkom, ktorého hmotnosť sa blíži k Chandrasekharovej medznej hodnote (Sokoloski a kol., 2006b; Luna a Sokoloski, 2007). Takéto systémy boli navrhnuté aj ako progenitory supernov typu Ia (Patat a kol., 2007; Chiotellis a kol., 2012; Dilday a kol., 2012; Meng, 2016)

Keďže chladnou zložkou symbiotických sústav je obor, dvojhviezda musí byť dostatočne rozsiahla, aby sa do nej takáto vyvinutá hviezda vmestila. Z tohto dôvodu majú symbiotické sústavy, na rozdiel od iných interagujúcich systémov, orbitálne periódy trvajúce rádovo stovky až tisícky dní (Belczyński a kol., 2000; Sokoloski a kol., 2017).

<sup>1</sup>Zriedkavejšie je horúcou zložkou symbiotických sústav hviezda hlavnej postupnosti alebo neutónova hviezda (napr. Masetti a kol., 2007; Corbet a kol., 2008; Enoto a kol., 2014).

Orbitálne periódy presne poznáme pre takmer polovicu symbiotických systémov.

Vzhľadom na fakt, že vzdialenosti medzi zložkami symbiotických sústav sú veľké (ide o otvorené systémy so vzájomnou vzdialenosťou rádovo od AU po stovky AU), chladný obor zvyčajne nevyplní svoj Rocheov lalok a nedochádza tak k prenosu hmoty cez Lagrangeov bod  $L_1$  ako v iných typoch kataklizmatických premenných hviezd. V symbiotických systémoch dochádza k prenosu hmoty z obra na horúcu zložku väčšinou prostredníctvom hviezdneho vetra (Allen, 1984b; Kenyon a Webbink, 1984; Sokoloski, 2003; Mikołajewska, 2007).

Hviezdny vietor chladného obra je tiež zdrojom hmoty pre spoločnú cirkumbinárnu obálku (tzv. symbiotickú hmlovinu), ktorá je čiastočne alebo úplne ionizovaná horúcou zložkou (Kenyon, 1986). Práve v tejto obálke vznikajú pozorované emisné spektrálne čiary. Stále však nie je úplne jasné, v koľkých symbiotických sústavách je hviezdny vietor jediný spôsob prenosu hmoty, v koľkých obor vyplní svoj Rocheov lalok a v koľkých je dôležitý hybridný mechanizmus „pretečenia“ hviezdneho vetra cez Rocheov lalok (Mohamed a Podsiadlowski, 2007; Mukai, 2017).

## 1.2 Klasifikácia symbiotických dvojhviezd

Symbiotické sústavy sa ďalej delia na dva podtypy. Chladnou zložkou systémov typu D (ang. *dust*) je väčšinou pulzujúca premenná hviezda typu Mira obklopená opticky hrubou prachovou obálkou (Mikołajewska, 2007). Ich orbitálne periódy môžu dosahovať aj desiatky rokov (typicky  $\geq 50$  rokov). Symbiotické systémy typu S (ang. *stellar*) sú menšie sústavy s orbitálnymi periódami niekoľko stoviek dní (typicky  $\leq 15$  rokov, no väčšina má  $P_{\text{orb}} \approx (200 - 600)$  dní), ktoré obsahujú normálne červené obry spektrálneho typu M. V niektorých systémoch typu S je chladnou zložkou žltý obor spektrálneho typu K alebo G. Zo známych symbiotických premenných je až 80% práve typu S (Belczyński a kol., 2000). Elektrónová stĺpcová koncentrácia hmlovín v systémoch typu S ( $N_e \approx 10^9 \text{ cm}^{-1}$ ) je približne o dva rády vyššia ako v symbiotických dvojhviezdach typu D (Schmid a Nussbaumer, 1993).

Podľa charakteru vzplanutí možno symbiotické premenné hviezdy rozdeliť do troch kategórií:

- **Rekurentné symbiotické novy** – sústavy vykazujúce opakované vzplanutia, ktorých amplitúda je podobná vzplanutiam rekurentných nov (napr. T CrB, RS Oph a iné).

- **Symbiotické novy** – dvojhviezdy, ktorých jasnosť klesá po vzplanutí veľmi pomaly niekoľko rokov až desiatky rokov. Ide o malú skupinu objektov: RR Tel, HM Sge, V1016 Cyg, V1329 Cyg, AG Peg<sup>2</sup> a PU Vul.
- **Klasické symbiotické hviezdy** – v aktívnom období vykazujú vzplanutia aj o niekoľko magnítúd, na časových škálach niekoľkých mesiacov. Typickými predstaviteľmi sú napríklad hviezdy Z And, AG Dra, CH Cyg a mnohé ďalšie.

### 1.3 Symbiotická aktivita a premennosť

Typickým prejavom klasických symbiotických premenných hviezd je striedanie období pokoja a búrlivej aktivity. V pokojnom období sú procesy úniku hmoty, akrecie a ionizácie vo vzájomnej rovnováhe, čo vedie k uvoľňovaniu energie na približne konštantnej úrovni (Skopal, 2012). Pozorované zmeny jasnosti majú malú amplitúdu (na úrovni desiatín magnítúdy) a prebiehajú na časových škálach orbitálnych períód symbiotických dvojhviezd (Friedjung a kol., 1998). Nussbaumer a kol. (1988) ukázali, že v obdobiach pokoja sa symbiotické sústavy správajú ako dvojhviezdy, v ktorých horúci zdroj ožaruje chladného obra. Prítomnosť rozsiahlej a čiastočne opticky hrubej hmloviny môže spôsobovať sínusoidálne variácie svetelných kriviek symbiotických sústav (Beliakina, 1979; Friedjung a kol., 1998; Skopal, 2008).

Naopak, pre obdobia aktivity sú typické výrazné zmeny jasnosti (vzplanutia), ako aj ďalších pozorovateľných veličín v rôznych spektrálnych oblastiach. Vzplanutia trvajú niekoľko týždňov až roky a systém spravidla zjasnie o 1 až 2 magnítúdy. Morfológia období aktivity (počet a tvar jednotlivých vzplanutí, ich trvanie, atď.) sa však aj v prípade konkrétnej symbiotickej dvojhviezdy môže výrazne s časom meniť. Vzplanutia sú poháňané buď uvoľňovaním gravitačnej potenciálnej energie počas akrecie hmoty, kvázi-ustáleným spaľovaním na vodík bohatej hmoty vo vrstve na povrchu bieleho trpaslíka, alebo kombináciou oboch mechanizmov (Sokoloski a kol., 2017; Mukai, 2017). Možným zdrojom vzplanutí môžu byť aj nestability v akréčných diskoch, aké boli pozorované v niektorých kataklizmatických premenných hviezdach.

Sokoloski a kol. (2017) navyše uvádzajú, že každá dvojhviezda skladajúca sa z obra a bieleho trpaslíka časť svojho života prejavuje známky povrchového termonukleárneho horenia a časť nie. Z tohto dôvodu rozdelili takéto interagujúce systémy na

---

<sup>2</sup>AG Peg začala v roku 2015 vykazovať aktivitu typickú pre klasické symbiotické hviezdy (Ramsay a kol., 2016; Skopal a kol., 2017). Je možné, že aj ďalšie klasické symbiotické dvojhviezdy (ako Z And alebo AG Dra) prešli v minulosti fázou symbiotickej novy.

„spaľujúce“ (ang. *burning*) a „nespaľujúce“ (ang. *non-burning*). Okrem iných pozorovateľných prejavov, priebeh spaľovania tiež určuje svietivosť a teplotu horúcej zložky systému. Keďže termonukleárne spaľovanie uvoľňuje 40 až 50 krát viac energie na nukleón v porovnaní s akréciou, biele trpaslíky s vysokou svietivosťou a teplotou sú pravdepodobne poháňané povrchovým termonukleárnym horením. Je nutné podotknúť, že ak takéto horenie neprebieha, je ťažké odhaliť tieto systémy pomocou optických spektroskopických prehliadok. Výrazná variabilita však môže byť pozorovaná v UV (Luna a kol., 2013; Mukai a kol., 2016).

V pozorovaniach symbiotických sústav sa navyše často prejavujú aj ďalšie efekty nesúvisiace s prenosom hmoty (Mikołajewska, 2007). Odhliadnuc od periodických zmien v dôsledku orbitálneho pohybu, obe zložky môžu vykazovať vlastnú variabilitu. Táto premennosť sa môže diať na časových škálach minút (napr. flickering alebo kvázi-periodické oscilácie horúcej zložky), mesiacov a rokov (radiálne pulzácie obra či poloprávne variácie obra), ako aj desaťročí (novám podobné erupcie na horúcej zložke, slnečnému cyklu podobné zmeny obra alebo zákryty circumstelárnym prachom).

Hustota symbiotických systémov v priestore nie je zatiaľ známa dostatočne presne (Mukai a kol., 2016). Pravdepodobne existuje niekoľko desiatok symbiotických systémov do vzdialenosti 1 kpc, čo by znamenalo, že ich hustota je nižšia ako hustota kataklizmatických premenných hviezd (Mukai, 2017). Súčasný katalóg symbiotických hviezd sú však založené najmä na detekcii emisných čiar v ich spektrách, a preto preferujú najmä spaľujúce symbiotické hviezdy. Z tohto dôvodu môže existovať veľká, skrytá a zatiaľ nepreskúmaná populácia symbiotických hviezd, akými sú napr. SU Lyn či 4 Dra (Mukai a kol., 2016).

# Kapitola 2

## AG Draconis

AG Draconis (BD +67° 922; GSC 04195-00254; IRAS 16013+6656; RX J1601.6+6648; SAO 16931; HIP 78512) patrí medzi najznámejšie a najlepšie preskúmané symbiotické systémy. Ide o klasickú symbiotickú premennú hviezdu typu S (Friedjung a kol., 1998). Prvé fotografické pozorovania siahajú až do 19. storočia a objekt je vzhľadom na vhodnú polohu na oblohe, pomerne vysokú jasnosť a nízku extinkciu v danom smere systematicky pozorovaný dodnes.

### Zložky a vlastnosti symbiotickej dvojhviezdy AG Dra

Chladnou zložkou tohto dvojhviezdneho systému je žltý obor spektrálneho typu K3 III (Shenavrin a kol., 2011), s nízkou metalicitou  $[Fe/H] = -1,3$ , s efektívnou teplotou  $T_{\text{eff}} = 4\,300\text{ K}$  (Smith a kol., 1996), svietivosťou  $L \approx 300 L_{\odot}$  (Tomov a kol., 2000) a hmotnosťou  $1,5 M_{\odot}$  (Kenyon a Fernandez-Castro, 1987). Vzhľadom na spektrálny typ obra sa AG Dra radí k žltým symbiotickým hviezdám. Svietivosť obra môže byť vyššia ako je to štandardné pre triedu svietivosti III (Huang a kol., 1994; Mikołajewska a kol., 1995; Zhu a kol., 1999).

Smith a kol. (1996) zaradili obra kvôli nadabundancii ťažších prvkov (najmä Ba a Sr; Lambert, 1985) medzi tzv. báriové hviezdy, ktoré majú v porovnaní s klasickými K obrami intenzívnejší hviezdny vietor. V prípade AG Dra je únik hmoty na úrovni  $(1 - 2,5) \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$ . Báriové hviezdy majú tiež svietivosť v priemere vyššiu ako štandardné hviezdy rovnakej triedy svietivosti. Polomer obra odhadli Skopal (2005) na  $33 \pm 11 R_{\odot}$  a Zamanov a kol. (2007) na  $35 R_{\odot}$ . Ak predpokladáme polomer Rocheovej sféry obra v dvojhviezdnej sústave  $170 R_{\odot}$  (Ogley a kol., 2002), môžeme usúdiť, že ide o otvorený systém, a teda nemôže dochádzať k akrecii cez vnútorný libračný bod  $L_1$  (Sion a kol., 2012). Tento fakt je v súlade s tým, že polomery obrov v symbiotických

systémov sú často viac ako 2 až 2,5-krát menšie ako polomery ich Rocheovských sfér (Fekel a kol., 2003; Mikołajewska, 2003). Rotačnú rýchlosť obra určili Medeiros a Mayor (1999) na  $(5,9 \pm 1,0) \text{ km s}^{-1}$ .

Druhou zložkou systému AG Dra je horúci biely trpaslík s vysokou teplotou  $(0,8 - 1,5) \times 10^5 \text{ K}$  (Mikołajewska a kol., 1995; Greiner a kol., 1997; González-Riestra a kol., 1999; Sion a kol., 2012) a vysokou svietivosťou  $(1 - 5) \times 10^3 L_{\odot}$  (Shore a kol., 2010). Hmotnosť bieleho trpaslíka je približne  $(0,4 - 0,6) M_{\odot}$  (Mikołajewska a kol., 1995; González-Riestra a kol., 1999) a polomer  $(0,1 - 0,2) R_{\odot}$  (Sion a kol., 2012; Tomov a kol., 2013). Smith a kol. (1996) na základe obohatenia atmosféry K obra o prvky produkované *s*-procesom<sup>1</sup> usúdili, že horúca zložka bola kedysi vyvinutou hviezdou nachádzajúcou sa na asymptotickej vetve obrov.

Celý symbiotický systém je v dôsledku unikajúceho hviezdneho vetra obra obklopený cirkumbinárnou obálkou, ktorá je čiastočne ionizovaná žiarením bieleho trpaslíka. Zostáva otvorenou otázkou, či sa okolo horúcej zložky symbiotickej sústavy AG Dra nachádza akréčný disk, keďže doposiaľ neboli publikované žiadne pozorovania potvrdzujúce jeho prítomnosť.

AG Dra je otvorená dvojhviezda s orbitálnou periódou  $\approx 550$  dní (Meinunger, 1979; Fekel a kol., 2000; Hric a kol., 2014). Excentricita dráhy je veľmi blízka nule (Gális a kol. 1999). Vzdialenosť medzi bielym trpaslíkom a obrom určil Garcia (1986) na  $400 R_{\odot}$ . V sústave nedochádza k vzájomným zákrytom zložiek. Inklinácia sústavy bola určená na  $i = 40^{\circ} - 70^{\circ}$  (Mikołajewska a kol., 1995; Schmid a Schild, 1997).

### Poloha AG Dra v priestore

AG Dra má rovníkové súradnice:  $\alpha_{2000} = 16^h 01^m 41^s,011$ ,  $\delta_{2000} = +66^{\circ} 48' 10'',14$ . Vzdialenosť tohto objektu nie je zatiaľ určená jednoznačne. Merania pomocou družice Hipparcos poskytli iba dolný limit vzdialenosti 1 kpc. Mikołajewska a kol. (1995) určili vzdialenosť na 2,5 kpc, Skopal (2005) na  $1,1 \pm 0,4$  kpc, Sion a kol. (2012) na 1,5 kpc a Tomov a kol. (2000) na 1,7 kpc. Pozorovania družice Gaia by mali byť dostatočne presné, aby problém určenia vzdialenosti AG Dra vyriešili<sup>2</sup>. Vzhľadom na nízku metalicitu, vysokú radiálnu rýchlosť ( $v_r = -148 \text{ km s}^{-1}$ ) a galaktickú šírku ( $b = 41^{\circ}$ )

<sup>1</sup>Séria termonukleárných procesov, pri ktorých dochádza k pomalým záchytnom neutrónov jadrami ťažkých prvkov. Takéto procesy prebiehajú hlavne v AGB hviezdach a vytvára sa pomocou nich približne polovica prvkov ťažších ako železo.

<sup>2</sup>V prvom vydaní katalógu dát z družice Gaia (DR1) zo 14. septembra 2016 vzdialenosť pre AG Dra publikovaná nebola, druhé vydanie (DR2) sa očakáva 25. apríla 2018.

patrí AG Dra pravdepodobne k starej populácii galaktického hala (Schmid a Nussbaumer, 1993).

### Farebný exces pre AG Dra

Farebný exces AG Dra publikovali viacerí autori. Väčšina z nich vychádza z meraní UV kontinua alebo emisných čiar v UV oblasti, z ktorých vyplýva, že  $E(B-V) \leq 0,06$  (Viotti a kol., 1984, Kafatos a kol., 1993, Leibowitz a Formigini, 1992). V súčasnosti je v literatúre najpoužívanejšia hodnota  $E(B-V) = 0,05$  (Mikołajewska a kol., 1995), ktorú autori získali opätovnou analýzou veľkého množstva IUE spektier. Birriel a kol. (2000) určili  $E(B-V) = 0,08$  fitovaním UV spektra získaného pomocou Hopkins Ultraviolet Telescope.

Na druhej strane, dnes sú k dispozícii rozsiahle mapy medzihviezdného prachu, ktoré vznikli kombináciou meraní z družíc IRAS a CoBE (Schlegel a kol., 1998 a korekcie Schlafly a Finkbeiner, 2011). Z nich je možné pre rôzne objekty určovať hodnoty farebných excesov. Pre AG Dra bola z týchto máp určená hodnota farebného excesu  $E(B-V) = 0,036 \pm 0,002$  (Merc a kol., 2017). Túto hodnotu používame aj ďalej v práci.

### Symbiotická aktivita AG Dra

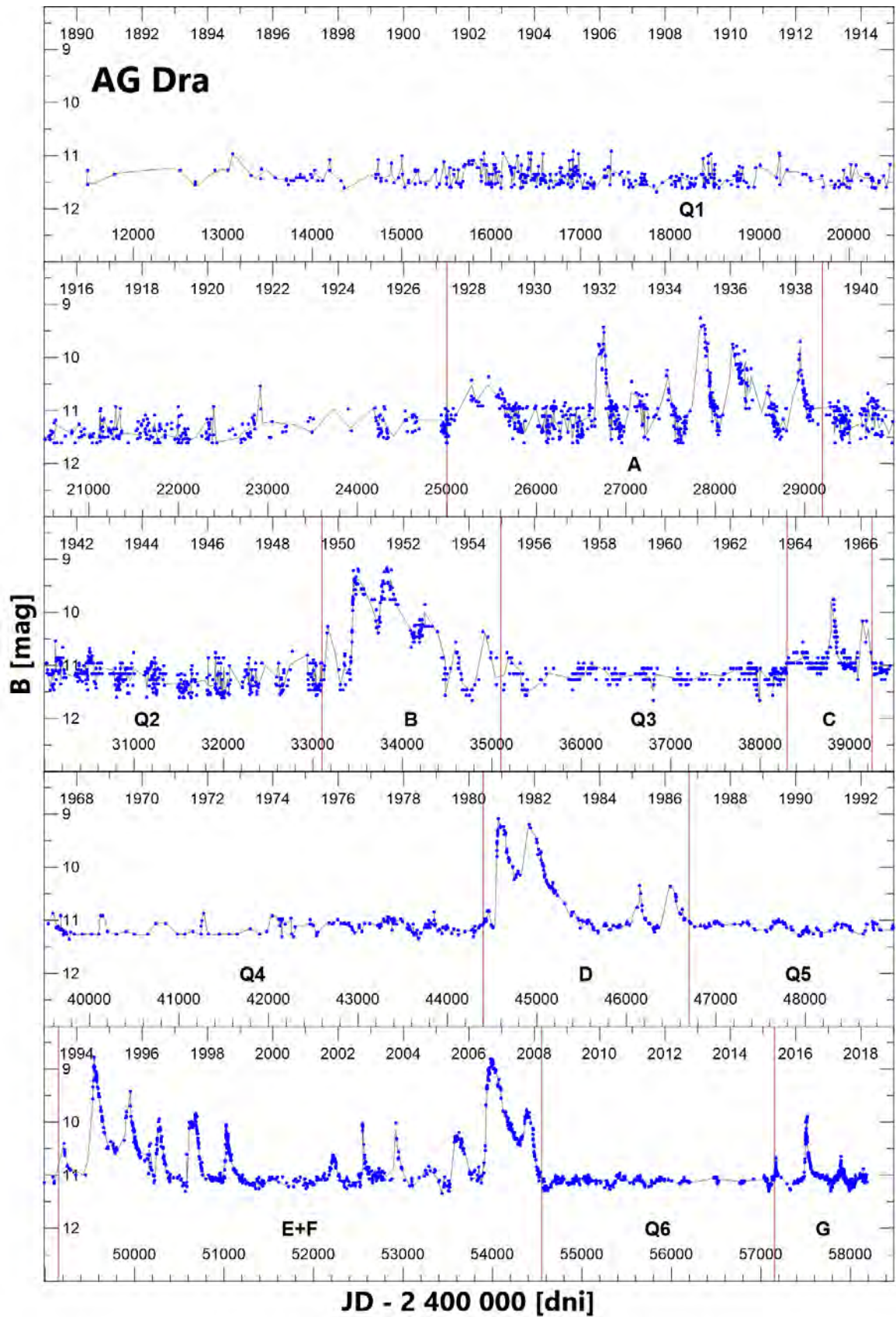
Historická svetelná krivka AG Dra (vo filtri  $B$  na obrázku 2.2) potvrdzuje fotometrickú aktivitu charakteristickú pre klasické symbiotické systémy (typu  $Z$  And) so striedaním sa aktívnych a pokojných období. Aktívne obdobia AG Dra sa opakujú približne po 9-15 rokoch. Počas 129 rokov pozorovaní bolo zaznamenaných 6-7 (v závislosti na interpretácii aktívneho obdobia  $E+F$ ) aktívnych období, ktoré začali v rokoch 1936, 1951, 1966, 1980, 1994, 2006 a 2015 (Merc a kol., 2017).

Jednotlivé vzplanutia v aktívnych obdobiach nastávajú približne po 360 dňoch, ale táto hodnota sa mení v rozsahu od 300 do 400 dní, bez zrejme dlhodobého trendu (Gális a kol., 2017). Amplitúda jednotlivých vzplanutí (v porovnaní s jasnosťou počas období pokoja<sup>3</sup>) môže byť výrazne odlišná. V prvom priblížení možno rozlíšiť dva typy vzplanutí: hlavné a vedľajšie. Hlavné, veľmi výrazné vzplanutia sa vyskytujú na začiatku aktívnych období a ich amplitúda dosahuje hodnoty až 3,6 mag vo filtri  $U$ , 2,3 mag v  $B$  filtri a 1,4 mag vo  $V$  filtri (Leedjäv a kol., 2016). Tieto vzplanutia sa zvyčajne vyskytujú v dvojiciach, medzi ktorými jasnosť symbiotickej sústavy AG Dra

---

<sup>3</sup>Dlhodobé priemerné hodnoty jasnosti AG Dra počas období pokoja sú nasledujúce: 11,4 mag vo filtri  $U$ , 11,1 mag v  $B$  filtri a 9,8 mag vo  $V$  filtri.





Obr. 2.2: Historická svetelná krivka AG Dra počas rokov 1889-2018 v *B* filtri rozdelená zvislými čiarami na aktívne (A - G) a pokojné obdobia (Q1 - Q6). Pre zvýraznenie priebehu jasnosti sú body preložené interpolačnou krivkou (metóda spline).

zostáva i naďalej zvýšená v porovnaní s priemernou úrovňou pokojných období.

Hlavné vzplanutia môžu (ale aj nemusia) byť nasledované menej výraznými vzplanutiami, ktorých amplitúdy sú v intervaloch: (0,8 - 2,7) mag vo filtri  $U$ , (0,3 - 1,3) mag v  $B$  filtri a (0,2 - 0,8) mag vo  $V$  filtri. Medzi týmito vzplanutiami jasnosť klesá až na úroveň pokojných období. V niektorých prípadoch sa medzi nimi dokonca pozorujú variácie typické pre obdobia pokoja symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. Doteraz bolo zaznamenaných celkovo 35 vzplanutí.

V roku 2015 vstúpil systém do zatiaľ posledného aktívneho obdobia, ktoré pokračuje aj v súčasnosti. Je preto možné, že na jar 2018 sa zopakuje ďalšie zo série vzplanutí, alebo systém prejde do obdobia pokoja. Podrobnejšie aktuálne obdobie aktivity diskutujeme v kapitole 5.4.

### Periodické variácie AG Dra

Okrem výrazných zmien jasnosti AG Dra počas vzplanutí, pozorovania odhalili prítomnosť fotometrických variácií aj počas období pokoja tejto symbiotickej sústavy. Najviac sa prejavovali na kratších vlnových dĺžkach a mali (polo)pravidelný charakter s periódou blízkou orbitálnej perióde dvojhviezdy AG Dra. Prvú efemeridu pre fotometrické minimá vo filtri  $U$  publikoval Meinunger (1979).

Friedjung a kol. (1998) detailne analyzovali svetelné krivky AG Dra vo filtroch  $U$ ,  $B$  a  $V$  počas obdobia pokoja v rokoch 1986 - 1994 a potvrdili prítomnosť kvázisínusoidálnych variácií vo filtri  $U$  s orbitálnou periódou tohto symbiotického systému. Keďže horúca zložka v AG Dra neprispieva k celkovej jasnosti vo filtri  $U$  počas období pokoja viac ako 10%<sup>4</sup>, na interpretáciu variácií svetelných kriviek vo filtri  $U$  navrhli vysvetlenie, že sú spôsobené zmenami viditeľnosti oblasti ionizácie plynnej obálky obklopujúcej dvojhviezdu, ku ktorým dochádza počas orbitálneho cyklu. Zmeny tvaru maxím vo filtri  $U$  a ich polohy vo fázovom diagrame nasvedčujú, že dochádza k zmenám odchýlok od osovej symetrie ionizovaných oblastí hviezdneho vetra z chladnej zložky. Gális a kol. (1999) publikovali pre fotometrické minimá AG Dra vo filtri  $U$  orbitálnu efemeridu:

$$T_{\text{fot.min}} [\text{d}] = 2443629,17 + 549,73 \times E \quad (2.1) \\ \pm 2,30 \quad \pm 1,59$$

---

<sup>4</sup>Tento výsledok je založený na zistených vlastnostiach horúcej zložky (polomer a teplota), ktoré boli odvodené na základe analýzy UV (Mikołajewska a kol., 1995) a röntgenových pozorovaní (Greiner a kol., 1997).

Hodnota orbitálnej periódy bola určená ako výsledok iteračnej periódovej analýzy radiálnych rýchlostí, ktoré boli odvodené na základe meraní absorpčných čiar chladného obra v systéme AG Dra. Porovnanie so súčasnými pozorovaniami ukazuje, že táto efemerida bola veľmi dobre určená.

Periódová analýza svetelných kriviek vo filtroch *B* a *V* však odhalila prítomnosť novej periódy v symbiotickej sústave AG Dra s hodnotou okolo 350 dní (Friedjung a kol., 1998). Tento objav bol prekvapujúci hlavne z toho hľadiska, že tieto pozorovania boli vedeckej obci dlhodobo k dispozícii a analýze svetelných variácií sa už predtým venovalo viacero autorov<sup>5</sup>. Prítomnosť periódy s hodnotou okolo 350 dní bola definitívne potvrdená analýzou radiálnych rýchlostí založených na meraniach absorpčných čiar v spektre AG Dra (Gális a kol. 1999; Fiedjung a kol., 2003).

Orbitálna perióda sa prejavuje najmä počas období pokoja na kratších vlnových dĺžkach (filter *U*). Variácie s periódou okolo 350 dní, s ktorou sú modulované počas aktivity svetelné krivky vo všetkých filtroch, sa v obdobiach pokoja prejavujú iba na dlhších vlnových dĺžkach. Z toho vyplýva, že súvisia s fyzikálnym mechanizmom spojeným s chladnou zložkou systému AG Dra a navyše, fyzikálne procesy prebiehajúce v atmosfére chladného obra alebo v jeho blízkosti modulujú správanie systému v štádiách aktivity. Na základe zistených fotometrických a spektroskopických vlastností Gális a kol. (1999) interpretovali periódu 350 dní ako periódu radiálnych pulzácií obra v symbiotickej sústave AG Dra a pre maximum jeho expanznej rýchlosti publikovali efemeridu:

$$T_{\text{exp}} [\text{d}] = 2448133,23 + 355,27 \times E \quad (2.2)$$

$$\pm 6,97 \quad \pm 1,82$$

Formigini a Leibowitz (2012) previedli periódovú analýzu fotometrických pozorovaní AG Dra a detegovali periódu s hodnotou 373,5 dní. Túto periódu autori interpretujú ako synodickú rotačnú periódu obra vo vzťahu ku bielemu trpaslíkovi (t.j. pre dané miesto na povrchu obra je biely trpaslík v hornej kulminácii každých 373,5 dňa). Aby bola možná takáto synodická doba pre orbitálnu periódu dvojhviezdy okolo 550 dní, musí obor rotovať retrográdne s periódou 1160 dní, ktorú autori tiež okrajovo zaznamenali.

Následné periódové analýzy však prítomnosť periódy 1 160 dní vo fotometrických ani spektroskopických pozorovaniach AG Dra nepotvrdili (Hric a kol. 2014). Navyše, takáto perióda nie je typickou hodnotou rotačných periód obrov v symbiotických

---

<sup>5</sup>Pre úplnosť dodajme, že prítomnosť o niečo dlhšej periódy (378,5 dní) uvádza vo svojej práci Bastian (1998), založenej na analýze vizuálnych pozorovaní AG Dra.

systémoch (napr. tabuľka 2 v práci Formiggini a Leibowitz, 2012) a tiež vysvetlenie retrográdnej orientácie rotácie obra v takej otvorenej dvojhviezdnej sústave ako je AG Dra je z evolučného hľadiska problematické. Dodajme, že detekovaná perióda 373,5 dní je veľmi blízka priemernému časovému intervalu, s ktorým sa opakujú vzplanutia v jednotlivých obdobiach aktivity.

Komplexná a detailná periódová analýza všetkých dostupných fotometrických, ako aj spektroskopických dát potvrdila, že v systéme AG Dra sú prítomné iba dve reálne periódy s hodnotami okolo 550 a 350 dní (Hric a kol., 2014). Analýza aktívnych období tiež odhalila prítomnosť periódy s hodnotou približne 360-365 dní, ktorá je však iba mediánom časových intervalov medzi jednotlivými vzplanutiami. Výsledkom periódovej analýzy boli aj dlhšie periódy s hodnotami 1 330, 1 580, 2 350 a 5 500 dní, no tieto súvisia s komplexnou morfológiou svetelných kriviek AG Dra počas aktívnych období a nepredstavujú reálne zmeny v tejto symbiotickej dvojhviezde.

Interpretácia periódy okolo 350 dní ako periódy pulzácií chladného obra (spektrálneho typu K) prítomného v symbiotickej dvojhviezde AG Dra však naráža na problém v porovnaní s inými pulzujúcimi obrami rovnakého spektrálneho typu. Henry a kol. (2000) prezentovali výsledky fotometrického a spektroskopického výskumu 187 obrov spektrálnych typov G, K a M0. Radiálne pulzácie obrov boli pozorované pre spektrálne typy od M až po K2, horúcejšie obry pravdepodobne pulzujú neradiálne. Pre väčšinu obrov v tejto štúdií však periódy i amplitúdy ich pulzácií dosahovali o rád menšie hodnoty, ako sa pozoruje v prípade AG Dra. Perióda  $\approx 355$  dní detekovaná v AG Dra je podobná, akú pozorovali pri niektorých osamotených K obroch Hatzes a Cochran (1998), avšak amplitúda je aj v tomto prípade približne o rád väčšia. Z toho vyplýva, že v porovnaní s výsledkami získanými pre osamotené obry spektrálneho typu K, by pulzácie chladnej zložky AG Dra vykazovali anomálne vlastnosti (Fekel a kol., 2000). Fyzikálna interpretácia periódy okolo 350 dní detegovanej ako vo fotometrických, tak aj spektroskopických pozorovaniach AG Dra tak i naďalej zostáva otvorená.

## 2.1 Výskum AG Dra v optickej oblasti

Prítomnosť emisných čiar neutrálneho vodíka a ionizovaného hélia v optickom spektre AG Dra si po prvýkrát povšimli Janssen a Vyssotsky (1943). Ich zistenia potvrdil Wilson (1943, 1945), ktorý navyše pozoroval absorpčné spektrum obra a identifikoval aj emisné čiary neutrálneho hélia. Roman (1953) upozornil na existenciu modrého kontinua. Premennosť AG Dra bola prvýkrát popísaná v práci Sharov (1954). Na základe

týchto pozorovacích vlastností bola AG Dra zaradená medzi symbiotické hviezdy.

Prvé *UBV* fotoelektrické fotometrické pozorovania AG Dra publikovali Eggen (1964) a Beliakina (1965, 1969). Neskôr Robinson (1969) publikoval zozbierané historické fotografické pozorovania z rokov 1890 - 1965 získané na Harvard College Observatory. Ďalšie pozorovania z fotografických platní získaných v rámci Sonnenberg Sky Patrol a pokrývajúcich obdobie 1947 - 1982 publikoval Luthardt (1983). Od roku 1974 bola dvojhviezda AG Dra pozorovaná najmä fotoelektricky v *UBV* systéme. Veľké množstvo systematických fotoelektrických a CCD fotometrických pozorovaní publikovali Skopal a kol. (2002, 2004, 2007, 2012), Leedjäv a kol. (2004) a Hric a kol. (2014). Detailnú analýzu historických svetelných kriviek AG Dra previedli Hric a kol. (2014), ktorí svetelnú krivku rozdelili na pokojné (Q1 - Q6) a aktívne (A, B, C, D, E+F) obdobia. Nové pozorovacie dáta popisujeme v kapitole 3. Vďaka rozsahu týchto pozorovaní patrí AG Dra k najdlhšie skúmaným symbiotickým systémom.

Zaujímavé je bezpochyby dlhé obdobie pokoja Q1 (obrázok 2.2), ktoré trvalo minimálne od začiatku pozorovaní v roku 1889 až do roku 1927 (resp. možno do roku 1932). Tento efekt môže byť dôsledkom nedostatočného pokrytia tohoto obdobia kvalitnými pozorovaniami (fotometrické dáta boli získané z fotografických platní), ale môže ísť aj o prípad, kedy skutočne nedochádzalo k vzplanutiam a vývoj AG Dra by tak mohol byť podobný symbiotickej nove AG Peg. V prípade tohto objektu klasická symbiotická aktivita začala až v roku 2015, teda po 165 rokoch pokojného obdobia postupného klesania jasnosti po vzplanutí novy (Ramsay a kol., 2016; Skopal a kol., 2017). Vzplanutie AG Dra ako novy by podľa tohto scenára nastalo niekedy pred rokom 1855 (Greiner a kol., 1997). Ak by sa takéto prepojenie potvrdilo, mohli by sme sa domnievať, že aktivita klasických symbiotických hviezd (typu Z And), pri ktorých dochádza k termonukleárnemu spaľovaniu na povrchu bieleho trpaslíka môže byť dôsledkom predošlého vzplanutia symbiotickej novy.

Optické spektrum AG Dra je superpozíciou troch zložiek: spektra chladného obra s výraznými absorpčnými čiarami v červenej spektrálnej oblasti, modrého kontinua, ktorého zdrojom je horúca zložka dvojhviezdy (biely trpaslík) a emisných čiar, ktoré vznikajú v rozsiahlej obálke v okolí dvojhviezdy. Spektrum, podobne ako jasnosť systému sa mení v závislosti od fázy orbitálneho pohybu, no hlavne od aktivity tohto interagujúceho systému. Absorpčné čiary v optickom spektre AG Dra boli identifikované v práci Lutz a kol. (1987). Munari a kol. (2009) uvádzajú, že počas vzplanutia v roku 2006 sa okrem tradičných emisných čiar H, He I a He II v spektre AG Dra pozorovali aj čiary Mg II, Si II, Ti II a Fe II.

V rámci predchádzajúceho štúdia sme sa zaoberali porovnaním vlastností aktivity AG Dra a prototypu symbiotických premenných hviezd Z And v optickej oblasti (Merc, 2016). Vybrali sme približne 3 000 dní dlhé časové intervaly zo svetelných kriviek vo filtroch  $U$ ,  $B$  a  $V$  a kriviek ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlenej emisnej čiary päťkrát ionizovaného kyslíka O VI oboch hviezd. Pomocou kroskorelačnej analýzy sme ukázali, že fotometrické, ako aj spektroskopické správanie oboch systémov je podobné (korelačné koeficienty boli vyššie ako 0,8 pre svetelné krivky a 0,5 pre krivky ekvivalentných širok). Takáto významná korelácia môže naznačovať podobnosť v povahe horúcich zložiek a v mechanizme vzplanutí oboch symbiotických systémov. Zároveň umožňuje použiť model kombinovanej novy (spájajúci fyzikálne mechanizmy vzplanutí trpasličích a klasických nov) navrhnutý pre Z And (Sokoloski a kol., 2006a) aj na vysvetlenie vzplanutí AG Dra (Leedjäv a kol., 2016).

Výsledky štúdia optických spektier AG Dra boli tiež publikované v prácach Kaler (1987), Iijima a kol. (1987), Mikołajewska a kol. (1995), Smith a kol. (1996), Tomov a Tomova (1997, 2002), Viotti a kol. (1998), González-Riestra a kol. (1999, 2008), Ikeda a kol. (2004), Leedjäv a kol. (2004, 2016), Munari a kol. (2009), Shore a kol. (2010) a ďalších.

## 2.2 Výskum AG Dra v iných oblastiach spektra

Aj keď AG Dra nie je úplne typickou symbiotickou hviezdou (nízka metalicita, spektrálna trieda obra K, atď.), patrí k tým najjasnejším symbiotickým systémom, a preto sa na jeho výskum v priebehu posledných desaťročí zameralo viacero pozorovacích programov v rôznych oblastiach spektra elektromagnetického žiarenia, od rádiovej až po röntgenovú oblasť.

### Rádiové žiarenie

Do roku 2000 bola AG Dra v rádiovej oblasti detegovaná iba počas *horúcich* vzplanutí (Mikołajewska, 2002). Počas *chladného* vzplanutia v roku 1982 hviezda v rádiovej oblasti pozorovateľná nebola (Seaquist a Taylor, 1990). Podobne nebola detekovateľná ani počas obdobia pokoja v roku 1991 (Seaquist a kol., 1993). Nízka početnosť rádiových pozorovaní AG Dra neumožňuje urobiť detailnejšiu analýzu vzťahu rádiového toku a optických emisných čiar. Je však zrejmé, že nutnou podmienkou detekcie termálnej rádiovkej emisie je prítomnosť pomerne veľkého množstva ionizovaného vodíka (H II) v tomto symbiotickom systéme.

V roku 2000 Oglej a kol. (2002) detegovali na vlnovej dĺžke 6 cm rádiové žiarenie skladajúce sa z dvoch zložiek s celkovým tokom  $\approx 1$  mJy. Vzhľadom na rozloženie týchto zložiek voči osi dvojhviezdnej sústavy, ako aj ich vzájomnú vzdialenosť, Mi-kołajewska (2002) navrhla, že detegované rádiové žiarenie súvisí s výtryskami hmoty uvoľnenými počas série vzplanutí v rokoch 1995 - 1998. Podobne, aj vysoké rádiové toky pozorované v roku 1986 (Seaquist a Taylor, 1990; Torbett a Campbell, 1987) by mohli byť dôsledkom výrazných vzplanutí zo začiatku osemdesiatych rokov.

Bipolárna rádiová emisia by mohla naznačovať, že pochádza z rýchlych kolimovaných výtryskov, podobne ako v iných symbiotických hviezdach (napr. MWC 560, CH Cyg, R Aqr, Hen3-1341, RS Oph; Belczyński a kol., 2000; Leedjärv, 2002). Takéto výtrysky sú zvyčajne spájané s prítomnosťou akréčných diskov, ktorého existenciu v prípade AG Dra sa dosiaľ nepodarilo potvrdiť. Hydrodynamické simulácie (Gawryszczak a kol., 2002, 2003) však ukazujú, že vietor obra v symbiotických systémoch typu S by mohol byť významne ovplyvňovaný gravitáciou bieleho trpaslíka a sústredovaný do orbitálnej roviny. Následkom toho by mohlo vznikáť výrazné zvýšenie koncentrácie plynu v orbitálnej rovine, dôsledkom čoho by boli podobné pozorovateľné efekty ako v prípade akréčného disku (Leedjärv a kol., 2004).

### Infračervené žiarenie

V oblasti IR žiarenia sú pozorovateľné najmä prejavy chladnej zložky symbiotických sústav. Vďaka tomu je možné určiť niektoré fyzikálne parametre obra a prispieť tak k dekonvolúcii zloženého spektra (pozostávajúceho zo spektra chladnej zložky, horúcej zložky a obálky) symbiotických hviezd (Skopal, 2005). Infračervené svetelné krivky boli publikované v prácach Munari a kol. (1992), Kamath a Ashok (1999), Taranova (2000) a Shenavrin a kol. (2011). IR merania AG Dra boli použité k určeniu spektrálnej klasifikácie obra, ktoré však stále nie je definitívna<sup>6</sup>.

Modelovaním IR a UV kontinua Skopal (2005) ukázal, že stredná elektrónová teplota v symbiotickej hmlovine AG Dra sa mení s fázou aktivity. Počas období pokoja a menej výrazných vzplanutí sa pohybuje na úrovni  $T_e \approx (18\,000 - 22\,000)$  K, no počas hlavných vzplanutí dosahuje hodnoty až  $T_e \approx (35\,000 \pm 5\,000)$  K. Podobné výsledky

<sup>6</sup>Wilson (1943) určil spektrálny typ dG7, Smith a Bopp (1981) G7e, Huang (1982) K0 Ib, Roman (1953), Lutz (1977) a Lutz a kol. (1987) K1 III, Doroshenko a Nikolov (1967), Boyarchuk (1969), Andrillat (1982), Kenyon a Webbink (1984) a Shenavrin a kol. (2011) K3 III, Viotti a kol. (1983) K3-5 III, Kenyon a Fernandez-Castro (1987) horúcejší ako K4 III a Beliakina (1969) K5 III. Dnes sa väčšina autorov zhoduje na spektrálnom type K1-3 III.

dostali aj Young a kol. (2006). Rovnako sa mení aj elektrónová optická hĺbka: počas pokojných období je  $\tau_e = 0,056 \pm 0,006$ , no počas aktívnych období narastie na hodnotu  $\tau_e = 0,64 \pm 0,11$  (Sekeráš a Skopal, 2012). Nárast s aktivitou je pravdepodobne spôsobený zvýšeným vetrom horúcej zložky.

### Ultrafialové žiarenie

V UV oblasti dominuje horúca zložka symbiotického systému. Pozorovania v tejto spektrálnej oblasti sú významné pre výskum parametrov kompaktného objektu. V UV oblasti boli pozorovania AG Dra získané hlavne pomocou družíc IUE a FUSE.

González-Riestra a kol. (1999) na základe dostupných IUE pozorovaní ukázali, že symbiotická sústava AG Dra vykazuje dva typy vzplanutí, ktoré sa líšia teplotou horúcej zložky. Počas „*chladných*“ vzplanutí má kompaktná zložka teplotu približne 90 000 K, čo je teplota nižšia ako priemerná teplota počas období pokoja. Počas týchto vzplanutí sa pseudoatmosféra bieleho trpaslíka ochladí, pričom jej polomer sa zväčší 2 až 6 násobne (Leedjäv a Burmeister, 2012). Naopak, počas „*horúcich*“ vzplanutí teplota horúcej zložky AG Dra zostáva nezmenená alebo sa dokonca zvyšuje. Zároveň, počas vzplanutí *horúceho* typu bola UV aj optická jasnosť nižšia ako počas *chladných* vzplanutí (Cikala a kol., 2011). V práci Leedjäv a kol. (2016) sme ukázali, že typ vzplanutí sa dá rozlíšiť aj prostredníctvom štúdia správania sa výrazných emisných čiar v optickej oblasti spektra. Z výsledkov našej analýzy tiež vyplynulo, že hlavné vzplanutia na začiatku aktívnych období (napr. 1981 - 1983, 1994 - 1996, 2006 - 2008) sú zvyčajne *chladného* typu.

Sion a kol. (2012) modelovali FUSE spektrum AG Dra a ukázali, že ak by v systéme bol prítomný akréčný disk, pravdepodobne by prispieval iba veľmi nevýrazne k FUV toku žiarenia. Young a kol. (2005, 2006) pozorovali v spektre AG Dra okrem iných aj vysoko ionizované zakázané emisné čiary (Ca VII, Fe VII, Mg V, Mg VI, Mg VII, Ne V, Ne VII, S IV, S VI, Si VII, s ionizačným potenciálom medzi 99 a 205 eV), ktorých pôvod zostáva neznámy. Čiary Mg VI a Mg VII pozorovali v spektre symbiotickej sústavy AG Dra aj Eriksson a kol. (2006).

### Röntgenové žiarenie

AG Dra patrí medzi prototypy tzv. supermäkkých röntgenových zdrojov žiarenia. Vďaka vhodnej polohe a nízkej extinkcii v danom smere je najjasnejším röntgenovým zdrojom v rámci symbiotických hviezd (Anderson a kol., 1981; Greiner a kol., 1997; González-Riestra a kol., 1999, 2008). Pozorovania AG Dra v tejto spektrálnej oblasti



získali sondy HEAO-2 (Einstein Observatory), EXOSAT, ROSAT, Chandra, XMM-Newton a SWIFT.

Viotti a kol. (1984) a Greiner a kol. (1997) zistili, že počas vzplanutí sú optické a UV toky žiarenia korelované. Pozorovania v röntgenovej oblasti spektra však ukázali, že toky v tejto spektrálnej oblasti sú s UV a optickými tokmi v antikorelácii a röntgenová jasnosť symbiotického systému AG Dra sa počas vzplanutí výrazne znižuje (Viotti a kol. 1995; Greiner a kol. 1997; González-Riestra a kol. 2008; Skopal a kol. 2009). V prípade *chladných* vzplanutí by to mohlo byť spôsobené expanziou a ochladením sa pseudoatmosféry bieleho trpaslíka. González-Riestra a kol. (2008) však pozorovali antikoreláciu röntgenového toku s UV a optickým tokom AG Dra bez ohľadu na typ a veľkosť vzplanutia. Vymiznutie röntgenového toku by preto malo skôr súvisieť so zvýšenou opacitou hmloviny pre vysokoenergetické fotóny (Viotti a kol., 2007). Skopal (2012) modelovaním SED počas vzplanutia i pokojného obdobia AG Dra ukázal, že dôvodom antikorelácie je pravdepodobne vietor horúcej zložky, ktorý je počas aktívnych fáz v symbiotických dvojhviezdach výraznejší (Tomov a Tomova, 2002; Skopal, 2006). Dôsledkom väčšieho počtu častíc hviezdneho vetra nastáva aj väčší počet ionizácií/rekombinácií. To má za následok zníženie počtu pôvodných röntgenových fotónov, ktorých energia je takto transformovaná do UV a optickej oblasti ako žiarenie hmloviny (Skopal a kol., 2009).

Paltani (2004) analyzoval niekoľko zdrojov röntgenového žiarenia využitím pozorovaní družice ROSAT. V prípade AG Dra detegoval periódu  $P = 234$  s. V ďalších pozorovaniach družice ROSAT však táto perióda zaznamenaná nebola, a preto usúdil, že ak by bola reálna, musí sa objavovať iba v niektorých obdobiach. Ďalšie pozorovania zatiaľ reálnosť tejto periódy nepotvrdili.

Röntgenové a UV pozorovania boli použité aj na určenie teploty horúcej zložky AG Dra. Využitím pozorovaní družice ROSAT Greiner a kol. (1997) odvodili hodnotu teploty  $(160\,000 \pm 20\,000)$  K. Mikołajewska a kol. (1995) využitím FUV dát z IUE určili teplotu na  $(80\,000 - 150\,000)$  K. González-Riestra a kol. (1999) určili teplotu horúcej zložky na  $(109\,600 \pm 5\,400)$  K. Sion a kol. (2012) analyzovali a modelovali spektrum AG Dra z FUSE a získali teplotu iba 80 000 K.

# Kapitola 3

## Pozorovací materiál

### 3.1 Fotometrický pozorovací materiál

Historické fotometrické pozorovania symbiotickej dvojhviezdy AG Dra boli získané z nasledujúcich prác: fotografické pozorovania z prác Robinson (1969) a Luthardt (1983), fotoelektrické a CCD pozorovania z prác Beliakina (1965, 1969), Gális a kol. (1999), Skopal a kol. (2002, 2004, 2007, 2012), Leedjäv a kol. (2004), Munari a kol. (2009) a Hric a kol. (2014). Pozorovania z ďalších 7 pozorovacích nocí publikovali Munari a kol. (2015, 2016, 2017). V predloženej diplomovej práci používame tieto dáta za účelom analýzy dlhodobých zmien a trendov v aktivite AG Dra, ako aj pre porovnanie súčasnej aktivity tohto symbiotického systému s jeho správaním sa v minulosti.

Nový pozorovací materiál pochádza z *AAVSO International Database*<sup>1</sup> (Kafka, 2018). Celkovo bolo analyzovaných 8 152 pozorovaní vo filtroch  $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $R$  a  $I$ , získaných počas 827 pozorovacích nocí v období od JD 2 453 883 (28. máj 2006) do JD 2 458 223 (15. apríl 2018).

Ďalšie fotometrické dáta pre potreby tejto práce získal M. Vrašťák (2018) počas 127 pozorovacích nocí (celkovo 504 pozorovaní vo filtroch  $U$ ,  $B$ ,  $V$  a  $R$ ) v období od JD 2 457 575 (5. júl 2016) do JD 2 458 223 (14. apríl 2018) a S. Karpov (2017), ktorý pozoroval 261 nocí vo filtri  $B$  (1 475 pozorovaní) od JD 2 456 869 (30. júl 2014) do JD 2 458 031 (4. október 2017). Pozorovanie AG Dra vo filtri  $B$  pre výskum krátkodobých zmien svetelnej krivky sme získali pomocou 65 cm ďalekohľadu Astronomického ústavu Akadémie vied Českej republiky v Ondřejove (JD 2 458 213; 4. apríl 2018).

Poznamenajme, že fotometrický pozorovací materiál od začiatku apríla 2017 bol

---

<sup>1</sup><https://www.aavso.org/>

získaný ako súčasť našej pozorovacej kampane<sup>2</sup>, ktorú sme iniciovali s cieľom zachytiť aktuálne prebiehajúce obdobie aktivity (G) symbiotickej sústavy AG Dra a zároveň po prvýkrát sledovať vývoj tejto interagujúcej dvojhviezdy s prakticky jednodňovým časovým rozlíšením.

## 3.2 Spektroskopický pozorovací materiál

Historické merania ekvivalentných širok a integrálnych tokov žiarenia v študovaných výrazných emisných čiarach prítomných v spektre symbiotickej sústavy AG Dra boli prevzaté z prác: Kaler (1987), Iijima a kol. (1987), Mikołajewska a kol. (1995), Tomov a Tomova (1999, 2000), Munari a kol. (2009), Shore a kol. (2010), Genovali (2010). Hodnoty radiálnych rýchlostí založených na meraniach polôh absorpčných čiar boli získané z prác: Mikołajewska a kol. (1995), Smith a kol. (1996), Tomov a Tomova (1997), Fekel a kol. (2000) a Iijima a Viotti (2003).

Časť spektroskopických dát použitých v tejto práci sme získali na observatóriu v Tartu, v Estónsku. Spektrá s nižším rozlíšením ( $R = 6\,000, 7\,000$ ) pokrývajú časový interval od JD 2 450 702 (11. september 1997) do JD 2 455 651 (31. marec 2011). Spektrá s vyšším rozlíšením ( $R = 20\,000$ ) boli na tomto observatóriu získané medzi JD 2 451 325 (26. máj 1999) a JD 2 456 392 (9. apríl 2013). Pozorovací materiál bol získaný 1,5 metrovým ďalekohľadom vybaveným mriežkovým spektrografom s vymeniteľnou difrakčnou mriežkou umiestneným v Cassegrainovom ohnisku. Metodiku pozorovania aj informácie o použitej pozorovacej technike detailne popisujú práce Leedjärv a kol. (2004) a Leedjärv a Burmeister (2012). Celkovo 515 spektier s nižším rozlíšením už bolo analyzovaných v našej práci Leedjärv a kol. (2016). V tejto diplomovej práci sme ich analyzovali znovu za účelom štúdia teplotného vývoja horúcej zložky AG Dra a pre porovnanie s jeho súčasnou aktivitou. Spektrá s vyšším rozlíšením (celkovo 109 spektier) boli analyzované po prvýkrát.

Ďalšie spektrá pokrývajúce obdobie od JD 2 453 145 (19. máj 2004) do JD 2 458 219 (10. apríl 2018) pochádzajú z observatória Astronomického ústavu Akadémie vied Českej republiky v Ondřejove. Celkovo 74 spektier bolo získaných Perkovým ďalekohľadom (2 m), ktorý je vybavený spektrografom v coudé ohnisku ( $R = 13\,000$ ).

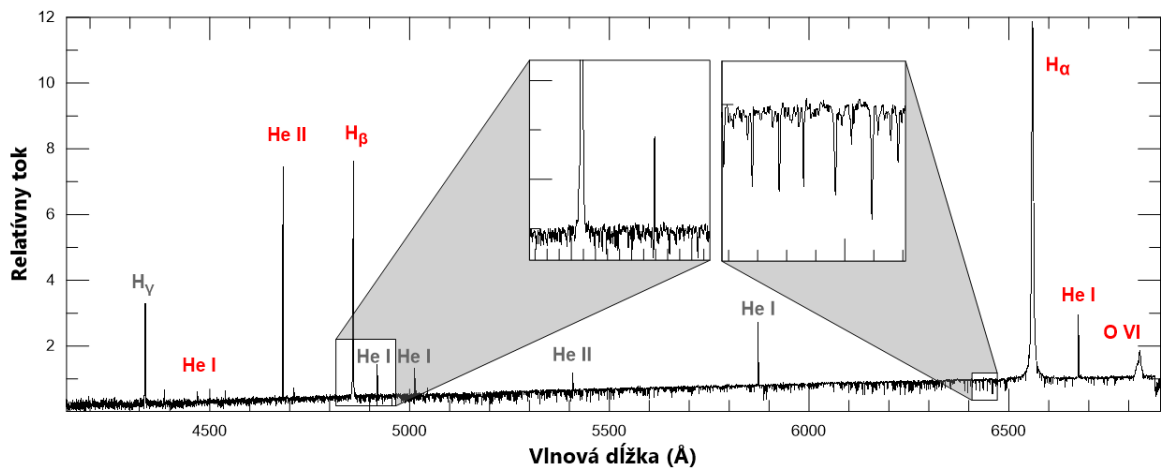
Súčasnú obdobie aktivity zachytávajú najmä spektrá z databázy *Astronomical*

---

<sup>2</sup>Výzvy na pozorovanie AG Dra boli zverejnené na: <https://www.aavso.org/aavso-alert-notice-572> a [http://www.astrosurf.com/aras/Aras\\_DataBase/Symbiotics/Campaigns/2017\\_AGDr.pdf](http://www.astrosurf.com/aras/Aras_DataBase/Symbiotics/Campaigns/2017_AGDr.pdf)

*Ring for Access to Spectroscopy database (ARAS)*<sup>3</sup>. V práci sme použili celkovo 213 spektier získaných medzi JD 2 457 110 (28. marec 2015) a JD 2 458 201 (23. marec 2018). Aj napriek tomu, že spektrá boli získané amatérskymi astronómami pomocou malých ďalekohľadov (25–35 cm,  $R = 1\,800$ – $11\,000$ ), ako ukázala naša analýza predstavujú cenný zdroj informácií o aktivite symbiotickej dvojhviezdy AG Dra.

V predloženej diplomovej práci boli analyzované aj dve spektrá s vysokým rozlíšením získané na Canada–France–Hawaii Telescope (CFHT; 3,58 m) pomocou Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars ( $R = 68\,000$ ) a na Nordic Optical Telescope (NOT; 2,56 m) využitím prístroja Fibrefed Echelle Spectrograph ( $R = 46\,000$ ). Tieto dáta boli získané v JD 2 456 906 (6. september 2014; CFHT) a JD 2 457 176 (3. jún 2015; NOT).



**Obr. 3.3:** Ukážka optického spektra symbiotickej dvojhviezdy AG Dra získaného dňa 26. februára 2018 pozorovateľom Timom Lesterom zapojeným do pozorovacej kampane. Červenou farbou sú označené emisné čiary, na ktoré sme sa zamerali v predloženej práci.

V práci sme sa zamerali na významné emisné čiary pozorované v optických spektrách symbiotickej dvojhviezdy AG Dra (obrázok 3.3): vodíkové čiary Balmerovej série  $H_\beta$  (4861 Å) a  $H_\alpha$  (6563 Å), čiary neutrálneho hélia He I (4471 Å) a He I (6678 Å), čiaru jedenkrát ionizovaného hélia He II (4686 Å) a Ramanovsky rozptýlenú čiaru päťkrát ionizovaného kyslíka O VI (6825 Å). Je nutné podotknúť, že čiara neutrálneho hélia He I na vlnovej dĺžke 4471 Å nebola súčasťou spektrálnych oblastí pozorovaných na Tartu Observatory a spektrá s vyšším rozlíšením z tohoto observatória a z observatória v Ondřejeve zachytávali iba červenú časť optickej oblasti spektra.

<sup>3</sup>[http://www.astrosurf.com/aras/Aras\\_DataBase/Symbiotics.htm](http://www.astrosurf.com/aras/Aras_DataBase/Symbiotics.htm)

# Kapitola 4

## Spracovanie pozorovacieho materiálu

Získaný fotometrický pozorovací materiál sme spracovali využitím vlastných skriptov pripravených pre analytické prostredie MATLAB v nasledujúcich krokoch:

- vytvorenie denných priemerov pozorovaní v jednotlivých fotometrických filtroch,
- kontrola a odstránenie tých priemerných hodnôt, ktoré sa nachádzali mimo  $3\sigma$  intervalu danej časti svetelnej krivky,
- určenie priemerného času pozorovania z časov pozorovaní v jednotlivých filtroch v danej noci a jeho oprava o heliocentrickú korekciu,
- vytvorenie zoznamu pozorovaní v tvare tabuľky priemerný čas pozorovania a priemerné hodnoty jasnosti v jednotlivých filtroch.

Fotometrické pozorovania symbiotickej dvojhviezdy AG Dra získané na observatóriu Astronomického ústavu v Ondřejove sme redukovali štandardným postupom využitím programu MUNIWIN (verzia 2.1).

V našej analýze sme používali spektrá (popísané v kapitole 3), ktoré už boli kalibrované na vlnové dĺžky samotnými pozorovateľmi na základe postupov špecifických pre danú pozorovaciu zostavu. Spektroskopické pozorovania sme pred analýzou vlastností spektrálnych čiar spracovali v nasledujúcich krokoch:

- normalizácia spektier vzhľadom na kontinuum,
- zistenie pomeru signálu ku šumu v študovaných spektrálnych oblastiach,
- určenie ekvivalentných šírok, polôh a intenzít vybraných emisných čiar,
- vypočítanie chýb určenia ekvivalentných šírok,
- určenie integrálnych tokov žiarenia v spektrálnych čiarach a ich chýb,
- výpočítanie radiálnych rýchlostí z polôh týchto emisných čiar,

- určenie radiálnych rýchlostí získaných z polôh absorpčných čiar červeného obra a ich chýb, oprava radiálnych rýchlostí o heliocentrickú korekciu.

V nasledujúcich podkapitolách uvádzame detailnú metodiku spracovania spektier AG Dra, ktorá v tejto podobe môže slúžiť aj ako návod na spracovanie spektroskopického materiálu pre ďalších záujemcov o danú problematiku. Dodržaním uvedenej metodiky sa zabráni vnášaniu rozptylu do odvodených spektroskopických údajov v dôsledku drobných odchýlok v postupe či v použitých hodnotách fyzikálnych parametrov.

## 4.1 Normalizácia spektier

Na určenie ekvivalentných šírok spektrálnych čiar (a následne integrálnych tokov v týchto čiarach), je potrebné spektrum normalizované na priebeh kontinua. Normalizáciu spektra prevedieme nasledujúcim spôsobom:

$$F_{\lambda}^{norm} = \frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda}^c} \quad (4.1)$$

kde  $F_{\lambda}^{norm}$  je relatívny tok žiarenia na danej vlnovej dĺžke normalizovaného spektra,  $F_{\lambda}$  je pozorovaný tok žiarenia na danej vlnovej dĺžke a  $F_{\lambda}^c$  je pozorovaný tok kontinua na danej vlnovej dĺžke (obrázok 4.4a). V prípade normalizovaného spektra (obrázok 4.4b) platí:

$$F_{\lambda}^{norm,c} = 1 \quad (4.2)$$

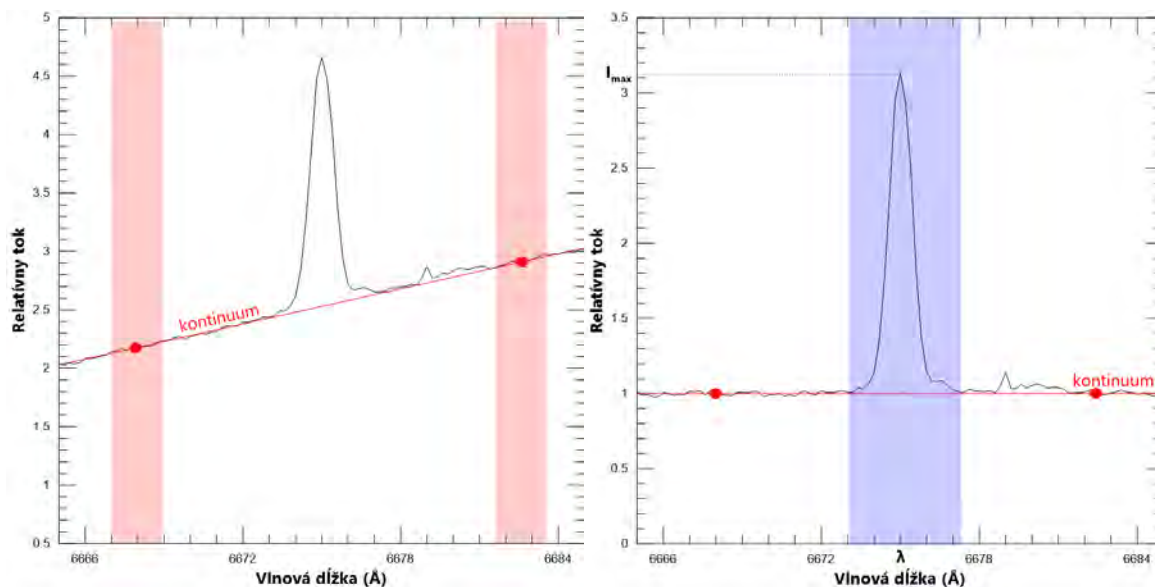
Ďalej v práci uvažujeme normalizované spektrum a pre jednoduchosť sme index *norm* vynechali.

Na normalizáciu spektier v tejto práci využívame skript pre programovací jazyk Python „specnorm.py“<sup>1</sup>, ktorý výrazne modifikoval a rozšíril Tõnis Eenmäe (Tartu Observatory) a mierne upravil autor tejto diplomovej práce. Automatická normalizácia je súčasťou nášho vlastného softvéru na automatické meranie vlastností emisných spektrálnych čiar EMISPECT, ktorý je stručne popísaný v prílohe C.3.

## 4.2 Ekvivalentné šírky spektrálnych čiar

Pozorované profily spektrálnych čiar sú ovplyvnené mnohými fyzikálnymi parametrami prostredia, v ktorom žiarenie vzniká alebo cez ktoré prechádza. Ekvivalentná šírka spektrálnej čiary je však veličina, ktorá nie je závislá na skutočnom profile čiary

<sup>1</sup><http://python4esac.github.io/plotting/specnorm.html>



(a) Určenie priebehu lokálneho kontinua.

(b) Normalizované spektrum.

**Obr. 4.4:** Normalizácia spektra na priebeh kontinua.

a je závislá iba od množstva atómov, ktoré absorbujú (alebo emitujú) v danej spektrálnej čiare. Predstavuje šírku čiary s pravouhlým profilom (v rovnakom mieste spektra, ako skutočná čiara), v ktorej dochádza k úplnej absorpcii, a ktorá má rovnakú plochu, ako skutočná čiara (obrázok 4.5a).

Definičný vzťah pre ekvivalentnú šírku spektrálnej čiary (nachádzajúcej sa v intervale  $(\lambda_1, \lambda_2)$ ) môžeme zapísať v nasledujúcom tvare:

$$W_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{F_\lambda^c - F_\lambda}{F_\lambda^c} d\lambda \quad (4.3)$$

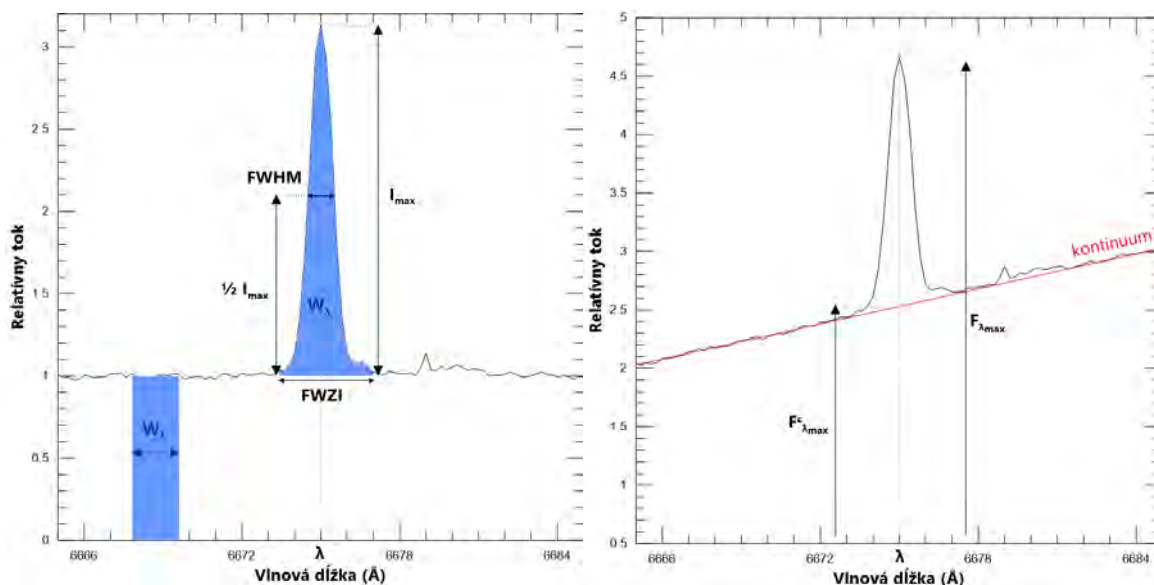
kde  $F_\lambda^c$  je tok v kontinuu na vlnovej dĺžke  $\lambda$  a  $F_\lambda$  je pozorovaný tok na vlnovej dĺžke  $\lambda$ , pričom  $F_\lambda = F_\lambda^c$  pre  $\lambda \leq \lambda_1$  a  $\lambda \geq \lambda_2$ . Po zjednodušení približne platí (Vollmann a Eversberg, 2006):

$$W_\lambda \approx \Delta\lambda \left(1 - \frac{\bar{F}}{\bar{F}^c}\right) \quad (4.4)$$

kde  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ ,  $\bar{F}^c$  je priemerný tok v kontinuu a  $\bar{F}$  je priemerný pozorovaný tok v intervale  $(\lambda_1, \lambda_2)$ .

Určovať ekvivalentné šírky spektrálnych čiar je možné v rôznych astronomických programoch. V tejto práci sme využili softvér PLOTSPECTRA<sup>2</sup> a vlastný program EMISPECT, stručne popísaný v prílohe C.3.

<sup>2</sup><https://goo.gl/caybSH>



(a) Normalizované spektrum.

(b) Nenormalizované spektrum.

**Obr. 4.5:** Vlastnosti emisných spektrálnych čiar. Jednotlivé veličiny sú detailne popísané v príslušnom texte.

### 4.2.1 Chyby určenia ekvivalentných širok

Chyba určenia ekvivalentných širok spektrálnych čiar je silne závislá najmä od „kvality“ spektra, ktorá je vyjadrená pomerom signálu k šumu v spektrálnej oblasti skúmanej čiary. Vollmann a Eversberg (2006) odvodili vzťah pre určenie chyby ekvivalentnej šírky nasledovne:

$$\sigma(W_\lambda) = \sqrt{1 + \frac{\overline{F^c}}{\overline{F}} \frac{\Delta\lambda - W_\lambda}{S/N}} \quad (4.5)$$

kde  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  je šírka čiary a  $S/N$  je pomer signálu k šumu v danej spektrálnej oblasti. Využitím rovnice 4.4 môžeme v rovnici 4.5 vyjadriť pomer tokov pomocou ekvivalentnej šírky:

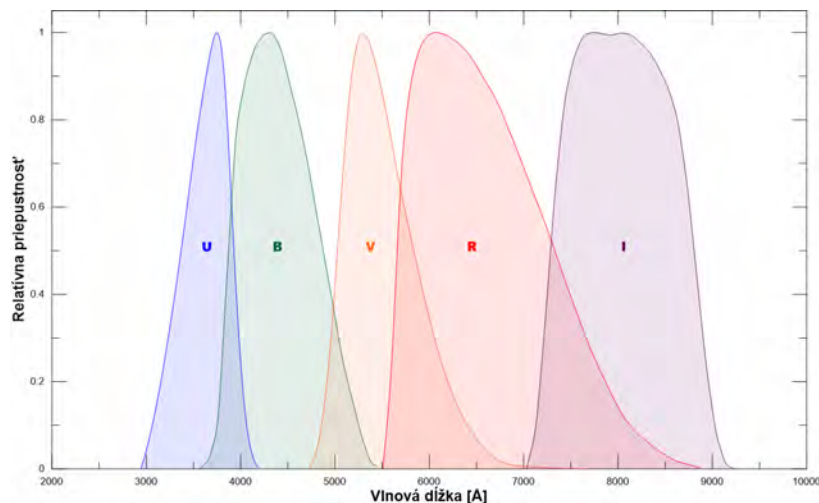
$$\sigma(W_\lambda) = \sqrt{1 + \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda - W_\lambda} \frac{\Delta\lambda - W_\lambda}{S/N}} \quad (4.6)$$

Na určenie hodnoty  $S/N$  v ľubovoľnom intervale vlnových dĺžok  $(\lambda_a, \lambda_b)$  možno použiť vzťah (Stoehr a kol., 2008):

$$S/N = \frac{\sqrt{6}}{1,482602} \frac{\text{median}\{F_\lambda^c\}_{\lambda \in (\lambda_a, \lambda_b)}}{\text{median}\{|2F_\lambda^c - F_{\lambda - (\lambda_b - \lambda_a)}^c - F_{\lambda + (\lambda_b - \lambda_a)}^c|\}_{\lambda \in (\lambda_a, \lambda_b)}} \quad (4.7)$$

Pre určenie  $S/N$  v mieste skúmanej spektrálnej čiary, sme vybrali dve rovnako veľké spektrálne oblasti, v ktorých sa nenachádzali žiadne spektrálne čiary, a ktoré sa nachádzali naľavo a napravo od skúmanej spektrálnej čiary. V týchto oblastiach sme





**Obr. 4.6:** Priepustnosť vybraných fotometrických filtrov (Mann a von Braun, 2015).

určili hodnoty S/N podľa vzťahu 4.7 a hodnotu pomeru signálu ku šumu v mieste skúmanej čiary sme určili ako ich priemer (červené oblasti na obrázku 4.4a).

### 4.3 Integrálne toky žiarenia v spektrálnych čiarach

Na určenie integrálnych tokov žiarenia v spektrálnych čiarach je potrebné relatívne toky previesť do absolútnych hodnôt vyjadrených vo fyzikálnych jednotkách. Na túto kalibráciu sme využili fotometrické pozorovania, ktoré sa prevádzajú vždy v istom frekvenčnom intervale definovanom priepustnosťou príslušného filtra (obrázok 4.6). Tok žiarenia kontinua  $F_{\lambda_f}^c$  na vlnovej dĺžke  $\lambda_f$  fotometrického filtra  $f$  vypočítame:

$$F_{\lambda_f}^c = C_{\lambda_f} 10^{0.4(R_{\lambda_f} E(B-V) - m_{\lambda_f})} \quad (4.8)$$

kde  $C_{\lambda_f}$  je tok žiarenia spektroskopického štandardu na vlnovej dĺžke  $\lambda_f$  v jednotkách  $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$ ,  $R_{\lambda_f}$  je koeficient medzihviezdnej absorpcie,  $E(B - V)$  je farebný exces skúmaného objektu, ktorý spolu s koeficientom  $R_{\lambda_f}$  opravuje pozorovanú magnitúdu v danom filtri  $m_{\lambda_f}$  o medzihviezdnu absorpciu. Hodnoty týchto koeficientov sú zhrnuté v tabuľke 4.1.

Vo všeobecnosti sa vlnová dĺžka maximálnej priepustnosti použitého filtra a vlnová dĺžka študovanej spektrálnej čiary nemusia zhodovať. Ak použijeme fotometrický systém pozostávajúci z viacerých filtrov, v prvom priblížení môžeme tok žiarenia na danej vlnovej dĺžke určiť pomocou tokov žiarenia vo filtroch, medzi ktorými sa študovaná spektrálna čiara nachádza. Využitím lineárnej interpolácie vypočítame tok žiarenia

**Tab. 4.1:** Parametre fotometrických filtrov. Pre každý filter je uvedená stredná vlnová dĺžka  $\lambda_0$ , absolútny tok žiarenia  $C_\lambda$  z práce Mann a von Braun (2015) a koeficient medzihviezdnej absorpcie  $R_\lambda$  z krivky z práce Fitzpatrick (2004). V poslednom stĺpci sú uvedené vzťahy pre výpočet toku žiarenia kontinua v daných fotometrických filtroch pre symbiotickú dvojhviezdu AG Dra, ktoré sú vypočítané využitím hodnoty extinkcie  $E(B - V) = 0,036$  (Merc a kol., 2017).

Filter	$\lambda_0$ [Å]	$C_\lambda$ [ $10^{-9}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ Å $^{-1}$ ]	$R_\lambda$	$F_\lambda^c$ pre AG Dra [ $10^{-9}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$ Å $^{-1}$ ]
Johnson <b>U</b>	3 620	4,264 ± 0,0220	4,8044	$F_U^c = 4,991509 \times 10^{-0,4U}$
Johnson <b>B</b>	4 412	6,459 ± 0,0320	4,0573	$F_B^c = 7,378044 \times 10^{-0,4B}$
Johnson <b>V</b>	5 529	3,735 ± 0,0190	3,0228	$F_V^c = 4,124158 \times 10^{-0,4V}$
Cousins <b>R</b>	6 615	2,215 ± 0,0120	2,2646	$F_R^c = 2,385732 \times 10^{-0,4R}$
Cousins <b>I</b>	8 047	1,163 ± 0,0070	1,6518	$F_I^c = 1,227726 \times 10^{-0,4I}$
Johnson <b>J</b>	12 603	0,310 ± 0,0030	0,7388	$F_J^c = 0,317601 \times 10^{-0,4J}$
Johnson <b>H</b>	16 552	0,113 ± 0,0010	0,4467	$F_H^c = 0,114667 \times 10^{-0,4H}$
Johnson <b>K</b>	22 094	0,040 ± 0,0005	0,2606	$F_K^c = 0,040343 \times 10^{-0,4K}$

kontinua  $F_\lambda^c$  na vlnovej dĺžke  $\lambda$  spektrálnej čiary:

$$F_\lambda^c = \frac{\lambda - \lambda_{f-}}{\lambda_{f+} - \lambda_{f-}} (F_{\lambda_{f+}}^c - F_{\lambda_{f-}}^c) + F_{\lambda_{f-}}^c \quad (4.9)$$

kde  $\lambda_{f-}$  je efektívna vlnová dĺžka fotometrického filtra s kratšou vlnovou dĺžkou a  $\lambda_{f+}$  s dlhšou vlnovou dĺžkou ako je vlnová dĺžka spektrálnej čiary  $\lambda$ .  $F_{\lambda_{f+}}^c$  a  $F_{\lambda_{f-}}^c$  sú toky žiarenia kontinua v týchto dvoch filtroch.

Ak je ekvivalentná šírka vyjadrená v Å, integrálny tok žiarenia v danej čiare (s vlnovou dĺžkou  $\lambda$ ) dostaneme, ak vynásobíme tok žiarenia kontinua na vlnovej dĺžke čiary ekvivalentnou šírkou skúmanej čiary:

$$F_\lambda = F_\lambda^c W_\lambda \quad (4.10)$$

Integrálny tok žiarenia v spektrálnej čiare dostávame vo fyzikálnych jednotkách erg cm $^{-2}$  s $^{-1}$ .

## 4.4 Radiálne rýchlosti

Na určenie hodnôt radiálnych rýchlostí sa využíva Dopplerov efekt. Ak sa skúmaný objekt pohybuje voči pozorovateľovi a jeho rýchlosť má zložku v radiálnom smere, pre-

javí sa to zmenou polohy spektrálnej čiary (absorpčnej alebo emisnej), ktorú môžeme vyjadriť ako:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 \quad (4.11)$$

kde  $\lambda$  je pozorovaná vlnová dĺžka a  $\lambda_0$  laboratórna vlnová dĺžka skúmanej spektrálnej čiary. Radiálnu rýchlosť  $v_r$  objektu (v prípade  $v_r \ll c$ ) potom môžeme určiť zo vzťahu:

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

kde  $c$  je rýchlosť svetla. V prípade, že sa objekt pohybuje smerom k pozorovateľovi, vlnová dĺžka sa zmenší (spektrálne čiary sa posunú smerom do modrej oblasti). Tento jav sa zvyčajne označuje ako modrý posun. V opačnom prípade, ak sa objekt pohybuje smerom od pozorovateľa, vlnová dĺžka sa zväčší, pozorujeme tzv. červený posun.

Polohy spektrálnych čiar sme určovali pomocou vlastných programov EMISPECT a RADIFIT štyrmi rôznymi spôsobmi:

- určením polohy maxima (minima) spektrálnej čiary,
- určením polohy stredu čiary v danej výške profilu (napríklad v polovici výšky profilu),
- určením takej vlnovej dĺžky, ktorá delí integrálny tok v čiare na polovicu,
- preložením spektrálnej čiary Gaussovým, Lorentzovým alebo Voightovým profilom.

V prípade, ak by bola daná spektrálna čiara úplne symetrická, všetky metódy nám dávajú rovnaké výsledky.

#### 4.4.1 Radiálne rýchlosti chladnej zložky

Radiálne rýchlosti chladného obra v symbiotickej sústave AG Dra sme určovali z absorpčných spektrálnych čiar v červenej časti optického spektra. Pre tieto účely sme vytvorili program RADIFIT, ktorý je bližšie popísaný v prílohe C.2. Na rozdiel od emisných čiar, pre ktoré sme určovali radiálne rýchlosti pre jednu konkrétnu spektrálnu čiaru, v tomto prípade sme využili desiatky absorpčných čiar (najmä čiary Fe I, Ti I, V I, Ca I a Ni I), ktoré boli dostatočne symetrické a zároveň neboli prekryté inými čiarami. Pre tieto absorpčné čiary sme určili ich polohy a z nich sme vypočítali priemerný posun a pomocou vzťahu 4.12 zodpovedajúcu hodnotu radiálnej rýchlosti chladného obra v AG Dra.

## 4.5 Ďalšie parametre spektrálnych čiar

### Intenzita spektrálnych čiar

Intenzita spektrálnej čiary zodpovedá výške normalizovaného profilu. V prípade nenormalizovaného spektra (obrázok 4.5b) platí:

$$I_{\max} = \frac{F_{\lambda_{\max}}}{F_{\lambda_{\max}}^c} \quad (4.13)$$

### Šírka profilu spektrálnych čiar v polovici výšky (FWHM)

Hodnotu FWHM môžeme určiť ako z normalizovaného tak i nenormalizovaného spektra (obrázok 4.5a). Získaná hodnota FWHM by mala byť opravená o inštrumentálne rozšírenie podľa vzťahu:

$$\text{FWHM}_{\text{corr}} = \sqrt{\text{FWHM}_{\text{obs}}^2 - \text{FWHM}_{\text{inst}}^2} \quad (4.14)$$

kde  $\text{FWHM}_{\text{inst}}$  zodpovedá teoretickému maximálnemu rozlíšeniu  $\Delta\lambda_S$  spektroskopu. Rozlíšenie je väčšinou udávané veličinou  $R$ , ktorá je definovaná pomocou vzťahu:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda_S} \quad (4.15)$$

$\text{FWHM}_{\text{inst}}$  teda vypočítame ako:

$$\text{FWHM}_{\text{inst}} = \frac{\lambda}{R} \quad (4.16)$$

### Šírka profilu spektrálnych čiar pri nulovej intenzite (FWZI)

V prípade hodnoty FWZI ide o šírku profilu spektrálnej čiary na úrovni kontinua. Táto hodnota korešponduje s hranicami integrovania v rovnici 4.3:

$$\text{FWZI} = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (4.17)$$

V astronomickej praxi existujú a ďalšie spôsoby definície šírky spektrálnej čiary. V niektorých prípadoch totiž potrebujeme poznať šírku profilu spektrálnej čiary v inej výške profilu, ako v prípade FWHM alebo FMZI. Definícia šírky spektrálnej čiary v týchto prípadoch však zostáva podobná.

Šírka spektrálnej čiary (FW) sa väčšinou udáva v  $\text{\AA}$ , niekedy je prepočítaná do jednotiek rýchlosti ( $\text{km s}^{-1}$ ) využitím Dopplerovho vzťahu:

$$\text{FW} [\text{km s}^{-1}] = \frac{c}{\lambda} \text{FW} [\text{\AA}] \quad (4.18)$$

# Kapitola 5

## Výsledky analýzy a diskusia

Ako ukázali výsledky nášho predchádzajúceho výskumu (Leedjäv a kol., 2016), ako aj výsledky prezentované v tejto diplomovej práci, ekvivalentné šírky študovaných emisných čiar sa výrazne menia počas vzplanutí symbiotickej sústavy AG Dra. Tieto variácie sú spôsobené skutočnými zmenami fyzikálnych parametrov symbiotickej dvojhviezdy a jej zložiek (zmeny teploty horúcej zložky, ako zdroja ionizujúceho žiarenia, zmeny rozloženia, hustoty a optických vlastností symbiotickej hmloviny). Pre štúdium parametrov symbiotickej hmloviny sú napríklad veľmi dôležité emisné čiary He II a  $H_{\beta}$  (Skopal a kol., 2017). Pomer ich ekvivalentných šírok tiež používame pre štúdium teplotného vývoja horúcej zložky AG Dra počas obdobia jej aktivity.

Študované emisné čiary však majú svoj pôvod v odlišných častiach symbiotickej hmloviny a oblasti ich tvorby majú rozličný tvar a veľkosť. Rôzna pozorovateľnosť týchto oblastí počas orbitálneho pohybu zložiek symbiotickej dvojhviezdy spôsobuje zmeny pozorovaných ekvivalentných šírok študovaných emisných čiar s orbitálnym cyklom. Ak chceme študovať zmeny fyzikálnych vlastností symbiotickej dvojhviezdy AG Dra spôsobených iba jej aktivitou, je potrebné jednotlivé príspevky k pozorovaným zmenám spektroskopických vlastností presne identifikovať a redukovať tie, ktoré súvisia s orbitálnym pohybom dvojhviezdy.

Základným parametrom orbitálneho pohybu dvojhviezdy je jeho perióda. S orbitálnou periódou sa menia ako fotometrické, tak aj spektroskopické vlastnosti AG Dra. Keďže svetelné krivky tejto symbiotickej sústavy sú výrazne ovplyvnené jej aktivitou, ideálnym nástrojom na určenie orbitálnej periódy AG Dra sú krivky radiálnych rýchlostí chladnej zložky tejto interagujúcej dvojhviezdy.

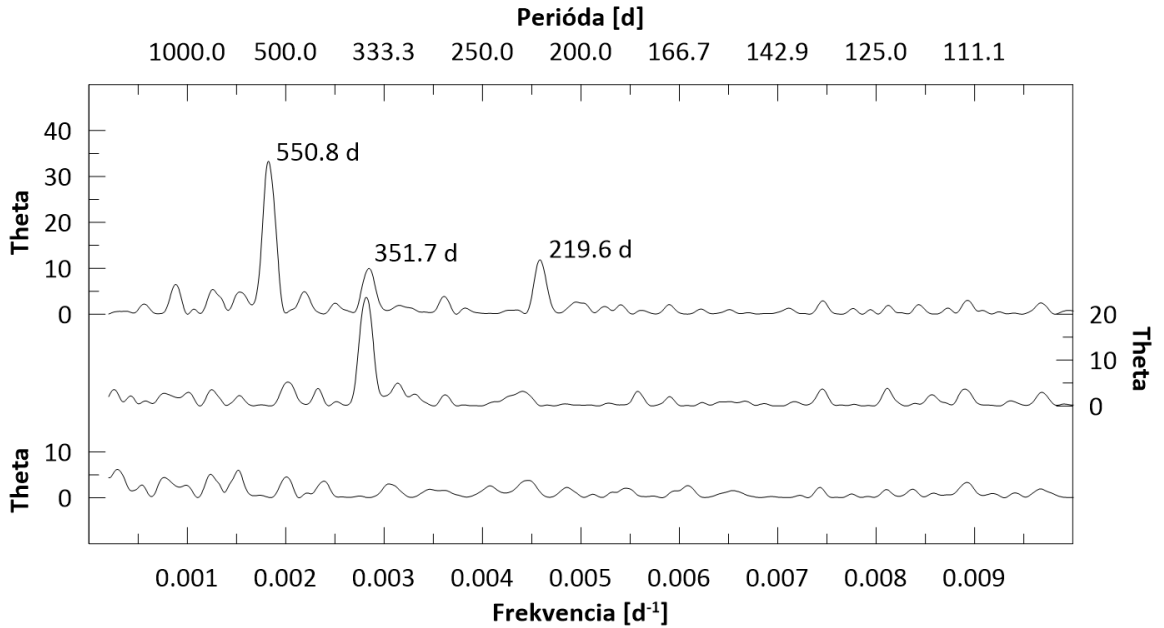
## 5.1 Radiálne rýchlosti chladnej zložky AG Dra

Hodnoty radiálnych rýchlostí založených na meraniach polôh absorpčných čiar vznikajúcich v atmosfére chladnej zložky symbiotickej dvojhviezdy AG Dra boli získané z prác, ktoré sú popísané v kapitole 3.2. Celkovo bolo takto získaných 135 meraní radiálnych rýchlostí, ktoré relatívne rovnomerne pokrývajú časové obdobie viac ako 8 000 dní (JD 2 445 071,9 – 2 453 151,6) s dobrým prekrytím jednotlivých súborov pozorovaní. V prípade všetkých zdrojov išlo o presné merania radiálnych rýchlostí, ktorých chyby sa pohybovali v intervale  $(0,4 - 0,8) \text{ km s}^{-1}$ .

Zo spektroskopického materiálu AG Dra, ktorý je popísaný v kapitole 3.2 sme vybrali spektrá s dostatočným rozlíšením (spektrá získané pomocou CFHT a NOT, 59 spektier získaných na observatóriu Astronomického ústavu v Ondřejove a 49 spektier z databázy ARAS). Tieto sme spracovali postupom popísaným v kapitole 4 a získali sme 110 meraní radiálnych rýchlostí, ktoré pokrývajú časové obdobie JD 2 453 145,4 – 2 458 044,3. Vzhľadom na fakt, že pozorovania z databázy ARAS boli získané vo veľmi krátkom časovom období a vzhľadom na komplexnosť problému nulovej úrovne radiálnych rýchlostí (viď ďalej) pre veľký počet zapojených observatórií, tieto merania (okrem jedného) v ďalšej analýze zatiaľ použité neboli. Chyby použitých 62 hodnôt radiálnych rýchlostí boli v intervale  $(0,1 - 2,1) \text{ km s}^{-1}$ .

V prípade meraní radiálnych rýchlostí získaných na rôznych observatóriách a pomocou rôznych spektrografov je bežné, že tieto merania majú voči sebe posunuté nulové úrovne radiálnych rýchlostí. Tento problém sme vyriešili metódou minimalizácie sumy štvorcov rezíduí meraní po odstránení syntetickej krivky radiálnych rýchlostí kombinujúcej ako orbitálny pohyb, tak aj pulzácie obra (viď ďalej) od jednotlivých súborov meraní radiálnych rýchlostí. Najdený posun nulovej úrovne mal voči radiálnym rýchlostiam z práce Smith a kol. (1996) hodnotu:  $+0,98 \text{ km s}^{-1}$  pre dáta z práce Mikolajewska a kol. (1995),  $+1,50 \text{ km s}^{-1}$  pre dáta z práce Fekel a kol. (2000),  $+0,40 \text{ km s}^{-1}$  pre dáta z Iijima a Viotti (2003) a  $-1,54 \text{ km s}^{-1}$  pre naše nové merania radiálnych rýchlostí chladnej zložky symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. Analyzovaný súbor dát predstavoval celkovo 197 meraní radiálnych rýchlostí pokrývajúcich časový interval takmer 12 800 dní alebo 35 rokov (JD 2 445 071,9 – 2 457 864,3).

Periódová analýza radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra bola prevedená iteračnou metódou, ktorá je detailne popísaná v práci Gális a kol. (1999). Nultý krok iteračného procesu periódovej analýzy poskytol len dve reálne periódy (obrázok 5.7, krivka  $a$ ): 550,8 dňa, ktorá súvisí s orbitálnym pohybom a je vo veľmi dobrej zhode



**Obr. 5.7:** Periodogramy radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra. Krivky zobrazujú výsledky periódovej analýzy: pôvodných hodnôt radiálnych rýchlostí (a), po odstránení variácií s orbitálnou periódou (b) a po odstránení variácií s orbitálnou a pulzačnou periódou (c).

s periódou fotometrických variácií AG Dra počas období pokoja vo filtri *U* a 351,7 dňa, ktorá je blízka perióde fotometrických variácií v období pokoja vo filtroch *B* a *V* a pravdepodobne súvisí s pulzáciami chladnej zložky tejto symbiotickej sústavy. Dodajme, že v periodograme sa objavuje aj ďalšia perióda 219,6 dňa, ktorá je však iba jednoročným aliasom<sup>1</sup> orbitálnej periódy. Po odstránení variácií s orbitálnou periódou z pôvodných hodnôt radiálnych rýchlostí AG Dra bol z periodogramu odstránený aj tento jednoročný alias orbitálnej periódy a periódová analýza detegovala len kratšiu (pulzačnú) periódu 353,8 dňa (obrázok 5.7, krivka *b*). Po odstránení variácií s orbitálnou, ako aj pulzačnou periódou periódová analýza nedetegovala žiadnu ďalšiu reálnu periódu (obrázok 5.7, krivka *c*).

Iteračnou metódou boli postupne spresnené parametre orbitálnej, ako aj pulzačnej závislosti radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra. Výsledkom sú nasledujúce parametre orbitálnej závislosti:  $\gamma = (-147,0 \pm 0,1) \text{ km s}^{-1}$ ,  $K_{\text{orb}} = (4,9 \pm 0,1) \text{ km s}^{-1}$ ,

<sup>1</sup>Ak sa v rozložení pozorovaní objektu s reálnou periódou  $P$  vyskytujú isté pravidelnosti s periódicitou  $P_{\text{sample}}$ , tieto sú detegované periódovou analýzou ako aliasy, falošné periódy s hodnotami danými vzťahom  $1/P_{\text{alias}} = 1/P \pm 1/P_{\text{sample}}$ . Napr. ak sa objekt kvôli vhodnej pozorovateľnosti zaznamenáva iba v istých obdobiach roka, vo výsledných periodogramoch sú detegované jednoročné aliasy reálnej periódy objektu.

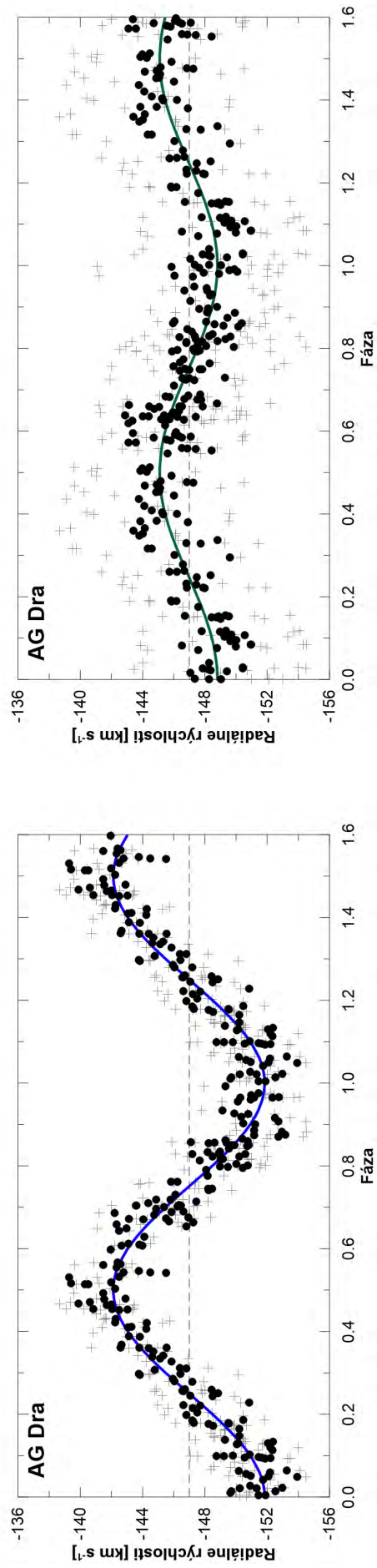
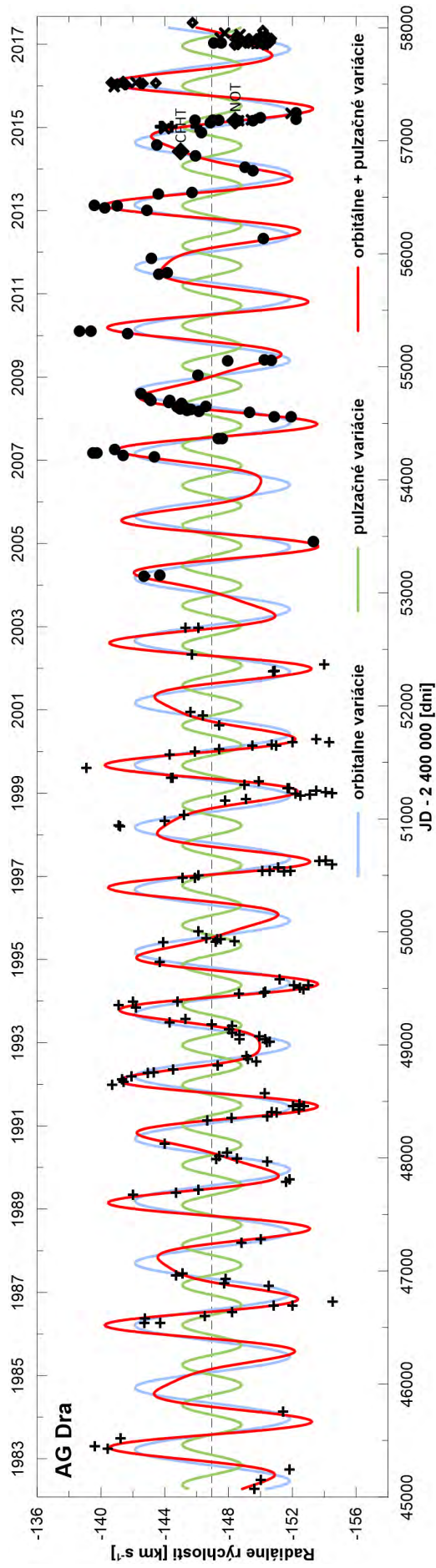
$P_{\text{orb}} = (550,8 \pm 0,4)$  dňa,  $\text{JD}_{\text{min,orb}} = (2\,451\,200,1 \pm 2,3)$  dňa. Výsledné parametre pulzačnej závislosti sú nasledujúce:  $\gamma = (-147,0 \pm 0,1) \text{ km s}^{-1}$ ,  $K_{\text{pul}} = (1,9 \pm 0,1) \text{ km s}^{-1}$ ,  $P_{\text{pul}} = (353,6 \pm 0,4)$  dňa,  $\text{JD}_{\text{min,pul}} = (2\,451\,296,0 \pm 4,1)$  dňa, kde  $\gamma$  je radiálna rýchlosť ťažiska dvojhviezdy,  $K_{\text{orb}}$ ,  $P_{\text{orb}}$ ,  $\text{JD}_{\text{min,orb}}$  a  $K_{\text{pul}}$ ,  $P_{\text{orb}}$ ,  $\text{JD}_{\text{min,orb}}$  sú amplitúdy, periódy a okamihy minima orbitálnych a pulzačných variácií radiálnych rýchlostí AG Dra.

Syntetické krivky zostrojené na základe uvedených parametrov sú spolu s hodnotami radiálnych rýchlostí zobrazené v obrázku 5.8: modrou je vykreslená syntetická krivka orbitálnych variácií, zelenou syntetická krivka pulzačných variácií a červenou kombinovaná syntetická krivka orbitálnych a pulzačných variácií. Použité symboly sú nasledujúce: plusy - historické dáta prebrané z literatúry, plné krúžky - nové dáta použité v periódovej analýze (zvlášť sú vyznačené dáta z CFHT a NOT), ostatné symboly - dáta (zväčša z databázy ARAS), ktoré neboli použité v procese hľadania periód. V obrázku 5.8 sú tiež vykreslené diagramy radiálnych rýchlostí fázované s orbitálnou ( $P_{\text{orb}} = 550,8$  dňa) a pulzačnou ( $P_{\text{pul}} = 353,6$  dňa) periódou. V týchto diagramoch krížiky predstavujú pôvodné hodnoty radiálnych rýchlostí, plné symboly radiálne rýchlosti po odstránení recipročných variácií (pre diagram fázovaný s orbitálnou periódou boli odstránené pulzačné variácie, pre diagram fázovaný s pulzačnou periódou boli odstránené orbitálne variácie). Ako vidieť, analýza radiálnych rýchlostí samostatne pre orbitálne a pulzačné variácie výrazne zlepšila (hlavne pre pulzačnú fázovú krivku) rozptyl bodov a tým pomohla k presnejšej definícii týchto variácií radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra.

Ďalším parametrom orbitálnej dráhy dvojhviezdy je excentricita. Gális a kol. (1999) analýzou orbitálnych variácií radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra zistili, že excentricita dráhy tejto symbiotickej dvojhviezdy je blízka nule ( $e = 0,06$ ). Diagram radiálnych rýchlostí fázovaných s orbitálnou periódou (obrázok 5.8), potvrdzuje, že dáta sú veľmi dobre preložené sinusoidálnou syntetickou krivkou. Možno teda konštatovať, že na časových škálach pozorovaní (fázový diagram zobrazuje vyše 23 orbitálnych cyklov) je orbitálna dráha AG Dra stabilná a veľmi blízka kruhovej.

Podobný výsledok sme dostali pre radiálne rýchlosti fázované s pulzačnou periódou. Aj keď je v tomto prípade rozptyl dát väčší, radiálne rýchlosti po odstránení orbitálnych variácií majú tiež sinusoidálny priebeh. To by zodpovedalo prípadným radiálnym pulzáciám chladného obra prítomného v symbiotickej sústave AG Dra.





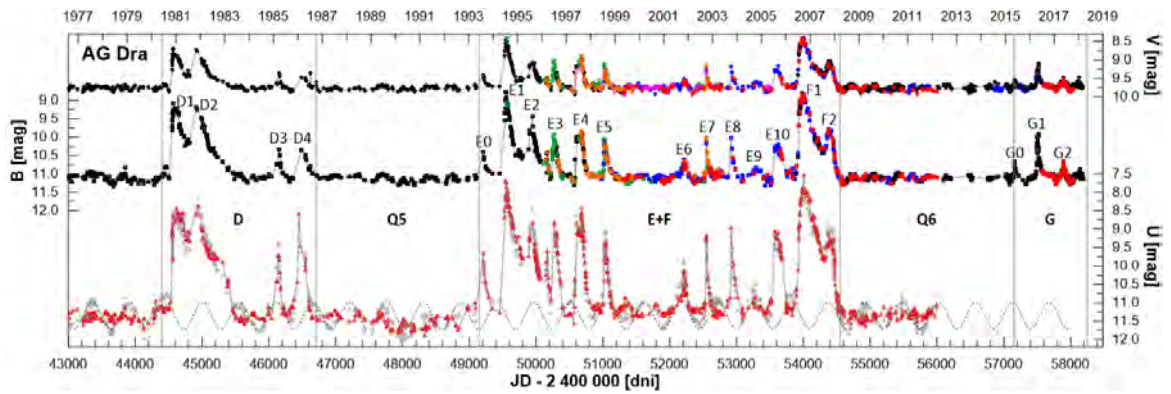
**Obr. 5.8:** Syntetické křivky radiálních rychlostí AG Dra a diagramy radiálních rychlostí fázované s orbitálníou ( $P_{\text{orb}} = 550,8$  dňa, vľavo) a pulzačnou ( $P_{\text{pul}} = 353,6$  dňa, vpravo) periódou. Detailný popis je uvedený v texte.

## 5.2 Orbitálna závislosť fotometrických a spektroskopických vlastností AG Dra

Fotometrické variácie AG Dra počas období pokoja sú najvýraznejšie vo filtri  $U$  s amplitúdou približne 0,6 mag. Smerom k dlhším vlnovým dĺžkam amplitúda týchto variácií klesá a vo filtri  $V$  je to len 0,2 mag. Ako ukázali výsledky periódovej analýzy Friedjunga a kol. (1998), zmeny jasnosti AG Dra v pokojnom období Q5 (1986-1994) boli v  $U$  filtri periodické a opakovali sa približne s orbitálnou periódou ( $\approx 550$  dní). Vo filtroch  $B$  a  $V$  boli detegované tiež periodické variácie, no s kratšou periódou ( $\approx 350$  dní), ktoré Friedjung a kol. (1998) interpretovali ako pulzácie chladnej zložky symbiotickej sústavy AG Dra.

Príspevok bieleho trpaslíka k žiareniu vo filtri  $U$  v období pokoja by nemal byť väčší ako 10%, s ohľadom na teploty a polomery vyplývajúce z výsledkov Mikołajewska a kol. (1995) a Greiner a kol. (1997), ktoré sú založené na analýze UV spektier z IUE a röntgenových pozorovaní z družice ROSAT. Z tohto dôvodu Friedjung a kol. (1998) navrhli, že fotometrické variácie AG Dra počas období pokoja vo filtri  $U$  sú dôsledkom rôznej pozorovateľnosti ionizovanej oblasti symbiotickej hmloviny počas orbitálneho pohybu dvojhviezdy. Dodajme, že hmlovina je formovaná z čiastočne opticky hrubého vetra obra a ionizovaná energetickým žiarením bieleho trpaslíka (Friedjung a kol., 1998; Skopal, 2001, 2008). Takúto interpretáciu podporuje i prítomnosť výrazného Balmerovho kontinua v optických spektrách AG Dra. Fotometrické variácie počas období pokoja nie sú vo filtri  $U$  úplne symetrické a menia sa od cyklu k cyklu orbitálneho pohybu. Asymetria variácií jasnosti naznačuje odchýlky od axiálnej symetrie ionizovaných častí chladného hviezdneho vetra a pozorované zmeny sú pravdepodobne spôsobené nestálosťou vetra chladnej zložky.

Pre štúdium fotometrických zmien AG Dra sme svetelnú krivku v  $U$  filtri v období pokoja preložili sínusoidou s periódou 550,8 dňa, ktorú sme dostali ako výsledok analýzy radiálnych rýchlostí absorpčných čiar v spektre tejto symbiotickej dvojhviezdy (kapitola 5.1). Získanú syntetickú krivku sme odčítali od skutočnej svetelnej krivky AG Dra vo filtri  $U$ . Takto získané rezíduá sú pomocou červených symbolov vykreslené spolu s pôvodnými svetelnými krivkami v  $U$ ,  $B$  a  $V$  filtroch na obrázku 5.9. Syntetická svetelná krivka AG Dra vo filtri  $U$ , ktorá vlastne predstavuje ideálny prípad symetrickej cirkumbinárnej hmloviny, je vykreslená v tomto obrázku pomocou prerušovanej čiary. Počas pokojných období Q4 a Q6 rezíduá vykazujú iba nevýrazné, stochastické

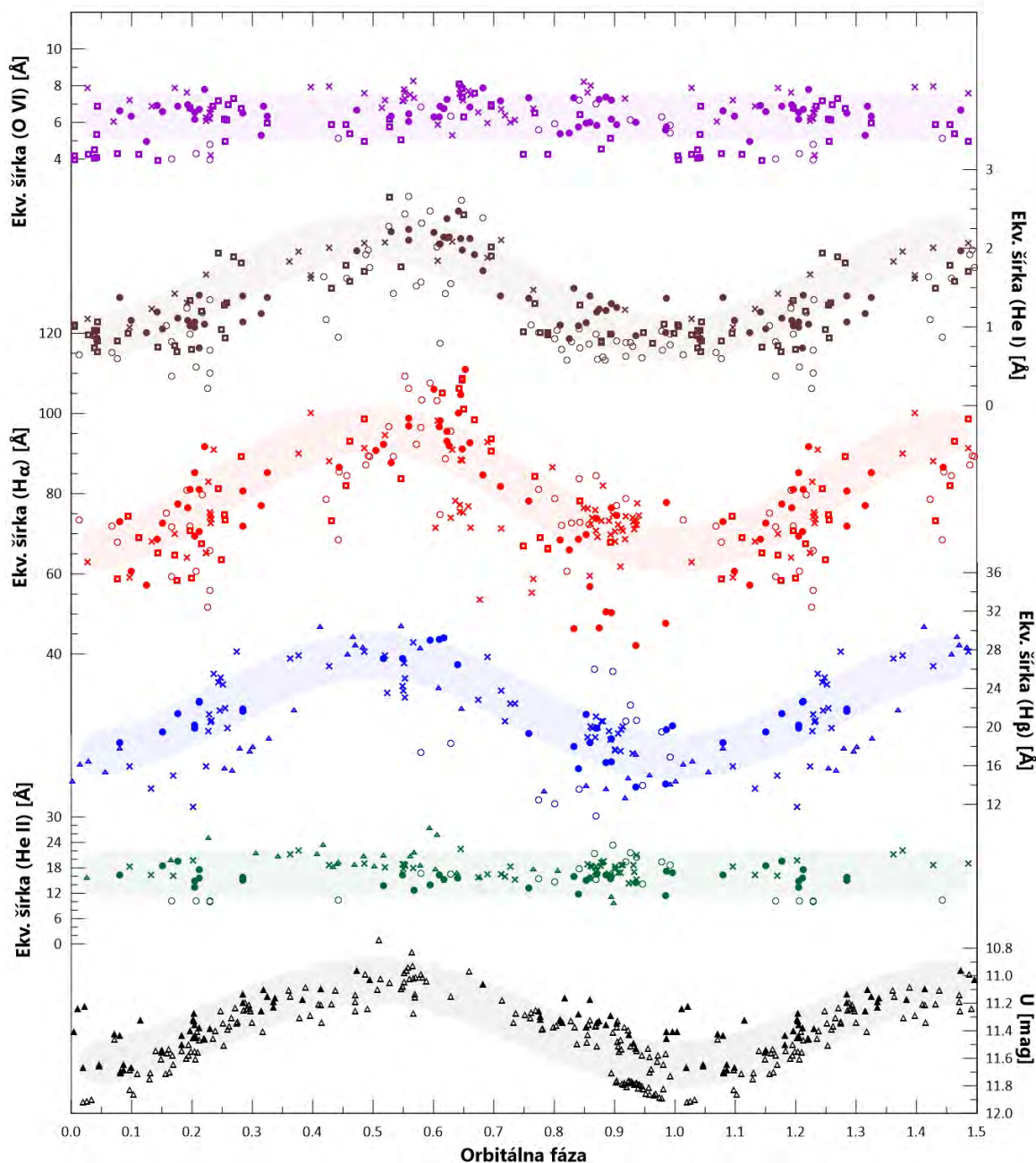


**Obr. 5.9:** Fotometrické svetelné krivky symbiotickej sústavy AG Dra v  $U$ ,  $B$  a  $V$  filtroch. Rezíduá vo filtri  $U$  (červené symboly) boli získané odčítaním syntetickej krivky (prerušovaná čiara) zodpovedajúcej orbitálnym variáciám AG Dra počas období pokoja od skutočnej svetelnej krivky (šedé symboly).

zmeny, čo potvrdzuje, že fotometrické variácie AG Dra v týchto obdobiach mali pravidelný a symetrický tvar. Rezíduá v pokojnom období Q5 sú výraznejšie, periodické alebo semiperiodické, čo naznačuje výraznejšie odchýlky od osovej symetrie ionizovaných častí chladného hviezdneho vetra, ako už bolo spomínané vyššie. Dodajme tiež, že prevedená rektifikácia svetelných kriviek AG Dra zmenila amplitúdy jednotlivých vzplanutí tejto symbiotickej premennej hviezdy. Na jednej strane takmer zaniklo nevýrazné vzplanutie E9, na druhej strane by pravdepodobne došlo k zvýrazneniu vzplanutia G2 (vzhľadom na priebeh fotometrických dát v  $B$  a  $V$  filtri), ktoré nastalo počas fotometrického minima orbitálnych variácií.

Dlhodobu však bolo diskutované, či aj ekvivalentné šírky výrazných emisných čiar v spektrách AG Dra vykazujú podobné variácie s orbitálnym pohybom tejto symbiotickej dvojhviezdy. Keďže charakteristiky emisných čiar sa výrazne menia s aktivitou AG Dra, je nevyhnutné hľadať takéto variácie v dátach z pokojných období (Gális a kol., 2016). Pre analýzu tejto závislosti sme zozbierali všetky dostupné spektroskopické pozorovania získané počas pokojných období (Q4, Q\*, Q6). Diagramy ekvivalentných širok študovaných emisných čiar a jasnosti AG Dra vo filtri  $U$  počas období pokoja fázované s orbitálnou periódou 550,8 dňa sú vykreslené na obrázku 5.10.

Z našej analýzy vyplýva, že ekvivalentné šírky emisných čiar neutrálneho vodíka ( $H_\alpha$  a  $H_\beta$ ) a neutrálneho hélia He I ( $6678 \text{ \AA}$ ) skutočne vykazujú variácie s orbitálnym pohybom AG Dra, pričom tieto variácie sú korelované so zmenami jasnosti vo filtri  $U$  počas pokojných období tejto symbiotickej dvojhviezdy. Tieto nízko excitované spektrálne čiary pravdepodobne vznikajú v rozsiahlej oblasti symbiotickej hmloviny,



**Obr. 5.10:** Orbitálne fázové diagramy ekvivalentných širok študovaných emisných čiar a fotometrickej jasnosti AG Dra vo filtri  $U$  počas období pokoja. Prázdne trojuholníčky zachytávajú pokojné obdobie Q4 (JD 2 442 960 - JD 2 444 512). Plné krúžky zodpovedajú prechodnému pokojnému obdobiu Q\* (JD 2 451 200 - 2 452 100) medzi aktívnymi obdobiami E a F. Pomocou prázdnych krúžkov a štvorcov sú zobrazené dáta z pokojného obdobia Q6 (JD 2 454 550 - 2 457 150). Krížiky zachytávajú dve krátke obdobia medzi vzplanutiami počas aktívneho obdobia G. Použité dáta boli získané na Tartu Observatory (krúžky), z databázy ARAS (krížiky), na observatóriu Astronomického ústavu v Ondřejove (štvorce) a z práce Kaler (1987) (trojuholníky).



ktorá vyžaruje aj kontinuum v blízkej UV a optickej spektrálnej oblasti. Na druhej strane, vysoko excitovaná emisná čiara He II (4686 Å) ani Ramanovsky rozptýlená čiara kyslíka O VI (6825 Å) sa s orbitálnym pohybom dvojhviezdy prakticky nemení. Tieto emisné čiary by mali mať svoj pôvod v blízkosti horúcej zložky AG Dra.

### 5.2.1 Vplyv orbitálneho pohybu na pomer He II/H<sub>β</sub>

Zo získaných výsledkov analýzy závislosti ekvivalentných širok emisných čiar He II (4686 Å) a H<sub>β</sub> od orbitálneho pohybu AG Dra (obrázok 5.10) vyplýva, že aj ich pomer sa mení s orbitálnou fázou. Tieto zmeny sú v antikorelácii s fotometrickými zmenami AG Dra vo filtri *U* počas pokojných období. Na základe metódy prezentovanej v práci Iijima (1981), sme pomer ekvivalentných širok čiar He II a H<sub>β</sub> používali ako indikátor teploty horúcej zložky AG Dra (Leedjäv a kol., 2004, 2016; Merc a kol., 2017). Keďže ekvivalentná šírka emisnej čiary H<sub>β</sub> a tým aj pomer He II/H<sub>β</sub> závisia na orbitálnej fáze, aj takto odvodená teplota horúcej zložky AG Dra sa zdanlivo mení s orbitálnym pohybom tejto dvojhviezdy.

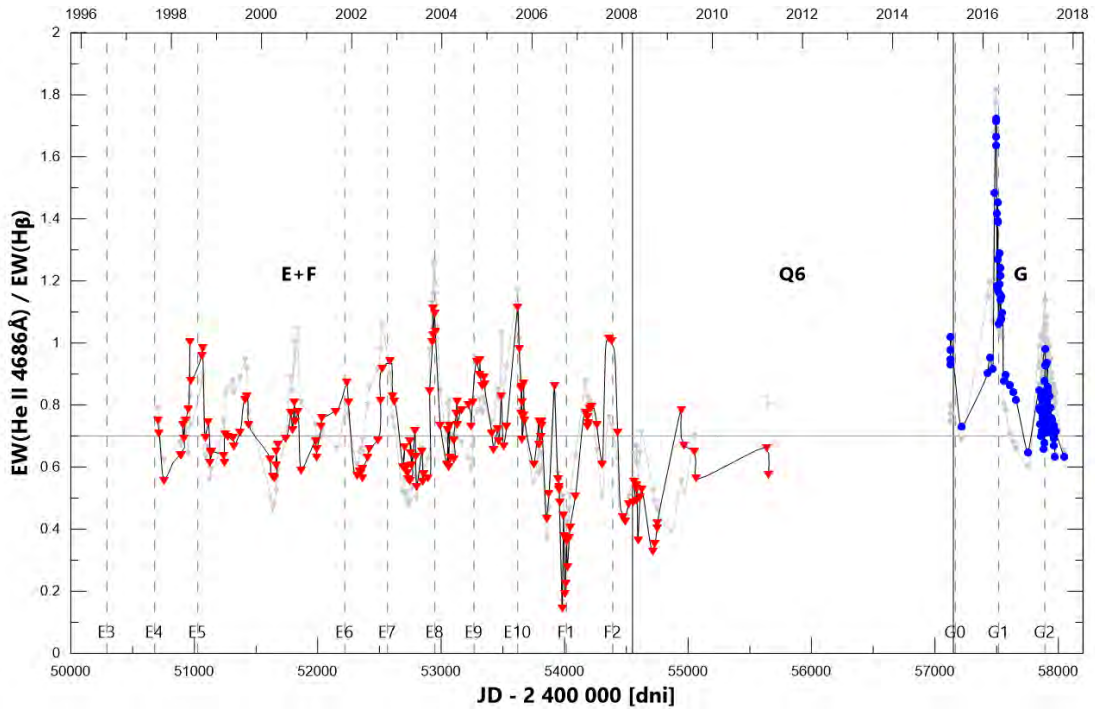
Ak chceme študovať skutočné zmeny teploty bieleho trpaslíka prítomného v symbiotickom systéme AG Dra (napr. v dôsledku aktivity), je nutné rozlíšiť jednotlivé efekty v pozorovaných variáciách pomeru He II/H<sub>β</sub>. Poznamenajme, že v rozšírenej verzii odhadu teploty horúcej zložky symbiotickej dvojhviezdy (kapitola 5.3) je potrebné poznať aj hodnotu ekvivalentnej šírky emisnej čiary He I (4471 Å), ktorá tiež závisí od orbitálneho pohybu. Variácie ekvivalentných širok emisných čiar H<sub>β</sub> a He I (4471 Å) počas pokojných období AG Dra sme preložili syntetickými krivkami (sínusoidami s pevne danou orbitálnou periódou 550,8 dňa, vid' kapitola 5.1). Získané syntetické krivky sú popísané nasledujúcimi funkciami:

$$\Delta EW_{4471} = -0,170 \cos(2\pi \Phi), \quad (5.1)$$

$$\Delta EW_{H_{\beta}} = -5,228 \cos(2\pi \Phi). \quad (5.2)$$

kde  $\Phi$  je orbitálna fáza. Rezíduá sme získali odpočítaním nájdených syntetických kriviek od pôvodných hodnôt ekvivalentných širok. Priemerné hodnoty rezíduí sú: 1,30 Å pre He I a 22,19 Å pre H<sub>β</sub>.

V nasledujúcom kroku sme takto rektifikované hodnoty ekvivalentných širok H<sub>β</sub> použili na výpočet nového pomeru He II/H<sub>β</sub>, nezaťažného orbitálnymi zmenami týchto emisných čiar. Rektifikované pomery sú spolu s originálnymi vykreslené na obrázku 5.11. Ich vzájomné porovnanie nám ukázalo výrazné zmeny v globálnom správaní sa



**Obr. 5.11:** Pomer ekvivalentných širok emisných čiar  $H_{\beta}$  a He II ( $4686 \text{ \AA}$ ) v spektre AG Dra po odčítaní orbitálnych variácií spektrálnej čiar  $H_{\beta}$ . Dáta z Tartu Observatory sú zobrazené červenými trojuholníkmi a dáta z databázy ARAS modrými krúžkami. Pôvodné hodnoty sú vykreslené pomocou šedých symbolov. Zvislé plné čiary označujú hranice obdobia pokoja Q6 a aktívnych období E+F a G. Zvislé prerušované čiary ďalej vyznačujú polohy jednotlivých vzplanutí AG Dra. Počas obdobia 1997-2011 bol dlhodobý priemer pomeru  $\text{He II}/H_{\beta} = 0,7$  (plná vodorovná čiara.)

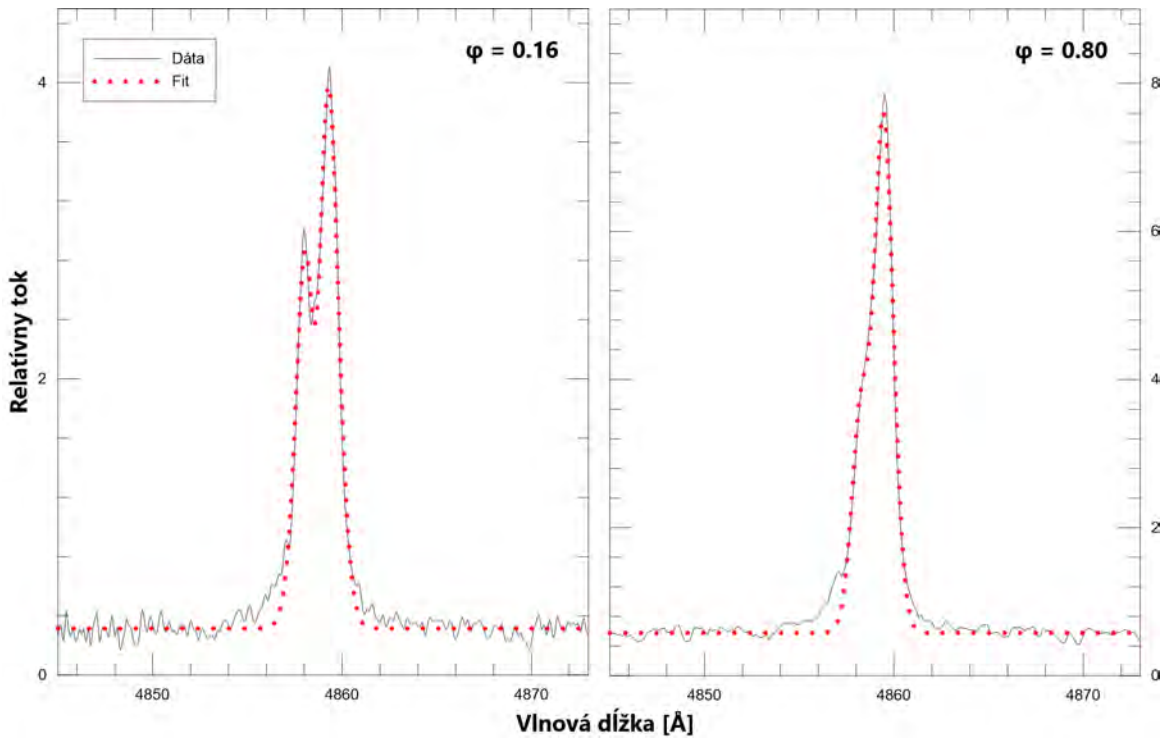
pomeru  $\text{He II}/H_{\beta}$ , ako aj zmeny jeho hodnoty počas jednotlivých vzplanutí.

Výsledky rektifikácie pomeru  $\text{He II}/H_{\beta}$  vzhľadom na orbitálne variácie môžeme zosumarizovať nasledovne: amplitúda zmien pomeru ekvivalentných širok  $\text{He II}/H_{\beta}$  sa pre väčšinu vzplanutí znížila. Ak použijeme tento pomer ako indikátor teploty horúcej zložky symbiotickej sústavy AG Dra, znamenalo by to, že jej hodnota bola počas vzplanutí nižšia ako dávali pôvodné dáta. Výnimkou sú len vzplanutia E5, E6, E9 a G0, počas ktorých teplota bieleho trpaslíka vzrástla. Počas hlavného *chladného* vzplanutia F1 sa pozorovaný pokles pomeru  $\text{He II}/H_{\beta}$  ešte viac prehĺbil a klesol na hodnotu 0,12. To by predstavovalo minimálnu hodnotu teploty bieleho trpaslíka AG Dra za celé sledované obdobie. Vzplanutie F2 (ktoré bolo súčasťou dvojitého vzplanutia F1-F2) bolo v skutočnosti *horúcim* vzplanutím. Tiež možno sledovať dramatický pokles teploty bieleho trpaslíka počas a po poslednom vzplanutí G2.

### 5.2.2 Absorpčná komponenta emisnej spektrálnej čiary $H_\beta$

Detailnou analýzou profilov výrazných emisných čiar v spektre AG Dra sme zistili, že profil spektrálnej čiary He II je počas celého orbitálneho pohybu viac menej symetrický, zatiaľ čo profily spektrálnych čiar neutrálneho vodíka  $H_\alpha$  a  $H_\beta$ , ako aj neutrálneho hélia He I v niektorých orbitálnych fázach (najmä počas a po dolnej konjunkcii obra, teda keď je obor najbližšie k pozorovateľovi) sú výrazne ovplyvnené prítomnosťou absorpčnej komponenty. Prítomnosť tejto komponenty pravdepodobne súvisí s hviezdny vetrom obra. Ako príklad uvádzame profily emisnej čiary  $H_\beta$  (obrázok 5.12) vykreslené vo fázach orbitálneho pohybu 0,16 a 0,80.

Prítomnosť absorpčnej komponenty znižuje určenú hodnotu ekvivalentnej šírky ovplyvnených spektrálnych čiar, čo má vplyv aj na pomer  $\text{He II}/H_\beta$ , ktorý je zdanlivo týmto efektom zvyšovaný. Aby bolo možné odhadnúť celkovú emisiu v spektrálnej čiare  $H_\beta$ , preložili sme profil tejto emisnej čiary dvojicou Gaussových funkcií: jednou pre emisnú a jednou pre absorpčnú komponentu. Analýza 71 profilov emisnej čiary



**Obr. 5.12:** Profily emisnej čiary  $H_\beta$  počas rôznych orbitálnych fáz symbiotickej dvojhviezdy AG Dra (0,16 - panel vľavo a 0,80 - panel vpravo). Čierne čiary zodpovedajú pôvodným dátam, preloženie pomocou dvojitej Gaussovej funkcie je zobrazené červenými bodkami. Fáza orbitálneho pohybu 0,0 zodpovedá okamihu, kedy sa obor nachádza v dolnej konjunkcii (pred bielym trpaslíkom).

$H_\beta$  s rozlíšením  $R \approx 11\,000$  v rôznych orbitálnych fázach nám ukázala, že absorpčná komponenta je prítomná v profile tejto spektrálnej čiary počas celého orbitálneho pohybu AG Dra a jej parametre sú v rámci chýb určenia takmer nezávislé od orbitálnej fázy tejto symbiotickej dvojhviezdy. V prípade všetkých analyzovaných spektier určená ekvivalentná šírka emisnej čiary  $H_\beta$  môže byť prítomnosťou absorpčnej komponenty znížená až o približne 20 - 25%. To potom ovplyvní aj odhady teploty horúcej zložky AG Dra, ktorá môže byť nadhodnotená o 10 - 14% (ak použijeme zjednodušenú metódu z práce Iijima (1981), ktorá je bližšie popísaná v kapitole 5.3).

Možno teda konštatovať, že prítomnosť absorpčnej komponenty v profile emisnej čiary  $H_\beta$  spôsobuje viac menej konštantný pokles určenia hodnoty jej ekvivalentnej šírky a nemá teda výrazný vplyv na celkový časový priebeh pomeru  $He\ II/H_\beta$  a tým ani na celkový vývoj teploty horúcej zložky AG Dra určenej na základe tohto pomeru. Poznamenajme, že tieto výsledky boli ovplyvnené aktivitou AG Dra v danom období a výrazná emisia počas vzplanutí dokáže absorpčnú komponentu niekedy takmer úplne prekryť. Na detailnú štúdiu závislosti parametrov absorpčnej komponenty od orbitálnej fázy by sme potrebovali pozorovací spektroskopický materiál, ktorý bol získaný iba počas obdobia pokoja tejto symbiotickej dvojhviezdy.

### 5.3 Teplota horúcej zložky AG Dra

Určenie teploty centrálnych hviezd v planetárnych hmlovinách a bielych trpaslíkov v symbiotických systémoch je dôležité pre pochopenie fyzikálnych javov prebiehajúcich v týchto objektoch. V prípade AG Dra boli v UV oblasti pozorované dva typy vzplanutí - *chladné* a *horúce* (González-Riestra a kol., 1999), v závislosti od teploty horúcej zložky tohto interagujúceho systému. Štúdium vývoja teploty horúcej zložky je preto kľúčové pre hlbšie pochopenie fyzikálnych mechanizmov spôsobujúcich vzplanutia tejto symbiotickej dvojhviezdy.

Existuje viacero metód ako odhadnúť teplotu horúcej zložky v symbiotických systémoch. Jednou z možností je modelovanie priebehu röntgenového spektra pomocou spektrálnej distribúcie absolútne čierneho telesa. To však vyžaduje satelitné pozorovania daného objektu, keďže zemská atmosféra je pre röntgenové žiarenie nepriehľadná. Pozorovania symbiotických systémov v röntgenovej oblasti sú však zriedkavé. Greiner a kol. (1996) a González-Riestra a kol. (1999) použili na odhad teploty horúcej zložky AG Dra pomer tokov výraznej emisnej čiary  $He\ II$  (1640 Å) a FUV kontinua na vlnovej



dĺžke 1340 Å. Rovnako ako v prípade röntgenových pozorovaní, nie je možné zaobísť sa bez satelitných meraní.

Horúca zložka symbiotických dvojhviezd svojím energetickým žiarením spôsobuje (čiastočnú) ionizáciu hmoty cirkumbinárnej hmloviny a teda jej teplotu môžeme určiť na základe pozorovaných ionizačných vlastností. Dolný limit teploty ionizačného zdroja môžeme získať využitím rovnice z práce Muerset a Nussbaumer (1994). Pre vzťah medzi teplotou ionizujúceho zdroja  $T_{\text{hot}}$  a energiou potrebnou na ionizáciu atómov do  $i$ -teho ionizačného stavu  $\chi_i$  (v jednotkách eV) uvádzajú jednoduchý empirický vzťah:

$$T_{\text{hot}} = \alpha \chi_i \quad (5.3)$$

kde konštanta úmernosti  $\alpha = 1\,000 \text{ K eV}^{-1}$ . Ionizačné energie vybraných atómov a iónov sú uvedené v prílohe v tabuľke B.1. Podľa tejto rovnice, existencia iónov s najvyššou ionizačnou energiou určuje dolný limit pre teplotu zdroja ionizujúceho žiarenia. Napríklad minimálna teplota pre tvorbu čiar O VI je približne 114 000 K. Ak je teplota ionizačného zdroja nižšia ako táto hodnota, nedostatok päťkrát ionizovaných atómov kyslíka vedie ku vymiznutiu Ramanovsky rozptýlenej čiary kyslíka O VI (6825 Å). Tento efekt bol skutočne pozorovaný počas *chladného* vzplanutia F1 symbiotickej sústavy AG Dra (Leedjäv a kol., 2016).

V našej nedávnej práci sme ukázali, že typy vzplanutí AG Dra je možné rozlíšiť aj na základe vlastností výrazných emisných čiar v optickej časti spektra (Leedjäv a kol., 2016). Zanstra (1931) ako prvý prezentoval metódu na odhad teploty centrálnych hviezd v planetárnych hmlovinách využitím intenzít Balmerových spektrálnych čiar a monochromatických jasností centrálnej hviezdy na rovnakých frekvenciách. Táto metóda bola ďalej rozšírená v práci Harman a Seaton (1966) zahrnutím emisných čiar He I a He II. Vlastnosti emisných čiar vodíka a hélia možno použiť na určenie teploty centrálnych hviezd aj samostatne. Prvá takáto metóda bola navrhnutá v práci Ambartsumyan (1932) a Stoy (1933) a neskôr upravená viacerými autormi (napr. Kaler, 1976, 1978; Iijima, 1981; Kaler a Jacoby, 1989).

Využitím pomeru tokov žiarenia emisných čiar  $H_\beta$  a He II (4686 Å), Kaler a Jacoby (1989) odvodili polynomiálnu aproximáciu pre teplotu centrálnych hviezd v planetárnych hmlovinách:

$$\log(T_{\text{cross}}) = 4,905 + 1,11162 \frac{F_{4686}}{F_{H_\beta}} - 1,10692 \left( \frac{F_{4686}}{F_{H_\beta}} \right)^2 + 0,62057 \left( \frac{F_{4686}}{F_{H_\beta}} \right)^3 \quad (5.4)$$

ktorá je platná pre  $0,08 < F_{4686}/F_{H_\beta} < 1,00$ . V našich predošlých prácach (Leedjäv a kol., 2016; Merc a kol., 2017) sme vychádzali z metódy uvedenej v práci Iijima

(1981), v ktorej teplota zdroja ionizácie planetárnych a symbiotických hmlovín bola určená pomocou vzťahu:

$$T_{\text{hot}} = 19,38 \times 10^4 \sqrt{\frac{2,22 F_{4686}}{4,16 F_{\text{H}\beta} + 9,94 F_{4471}}} + 5,13 \times 10^4 \quad (5.5)$$

Spektrá s nižším rozlíšením získané na Tartu Observatory v modrej spektrálnej oblasti pokrývajú iba výrazné emisné čiary He II a  $\text{H}\beta$ , avšak nezahŕňajú čiaru He I (4471 Å), preto sme boli nútení zaviesť isté aproximácie. V nasledujúcej kapitole diskutujeme dôsledky zanedbania emisnej čiary He I (4471 Å) v predošlých analýzach.

### 5.3.1 Zanedbanie toku žiarenia spektrálnej čiary He I

Sokoloski a kol. (2006a) predpokladali, že tok žiarenia emisnej čiary He I (4471 Å) v spektre Z And je zanedbateľný v porovnaní s tokom čiary  $\text{H}\beta$  (4861 Å). Podobné zjednodušenie sme použili v prácach Leedjäv a kol. (2016) a Merc a kol. (2017). V našich odhadoch teploty bieleho trpaslíka v sústave AG Dra sme zanedbali tok žiarenia emisnej čiary He I (4471 Å). Využitím tohoto predpokladu sa rovnica 5.5 zjednoduší do tvaru:

$$T_{\text{hot}} \approx 14,16 \times 10^4 \sqrt{\frac{F_{4686}}{F_{\text{H}\beta}}} + 5,13 \times 10^4 \quad (5.6)$$

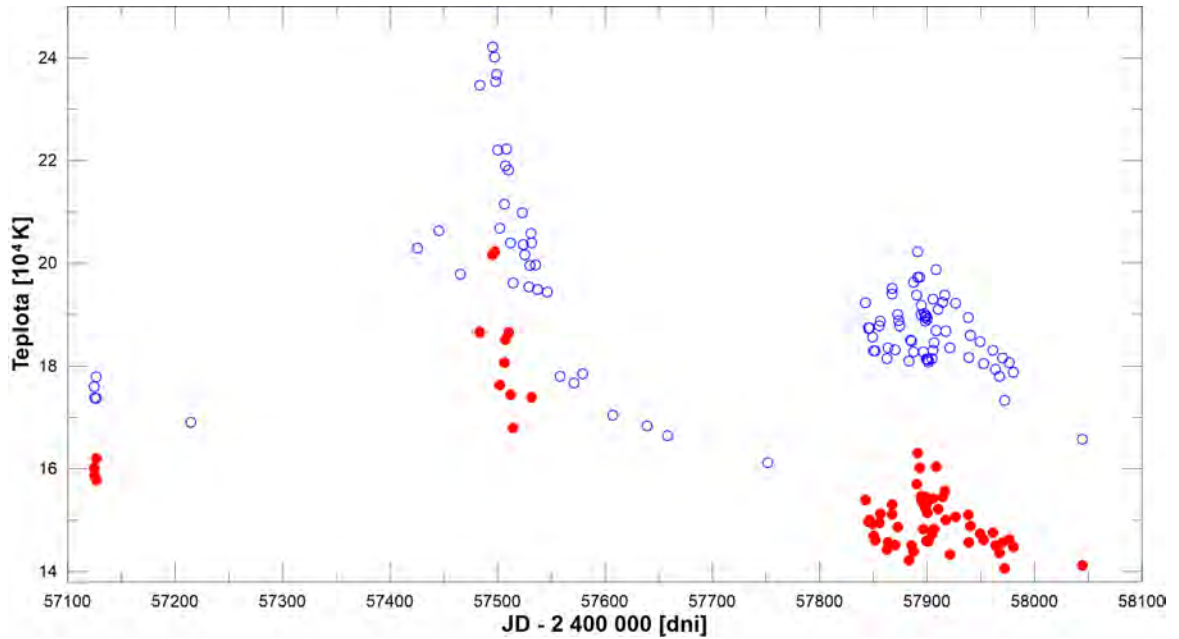
Tento predpoklad sme overili analýzou 70 spektier AG Dra získaných z databázy ARAS. Môžeme konštatovať, že  $F_{4471} \leq (0,02 - 0,05) F_{\text{H}\beta}$  (viď tabuľka 1 v prílohe A v práci Merc a kol., 2018), a teda tok žiarenia emisnej čiary He I (4471 Å) je skutočne zanedbateľný v porovnaní s tokom čiary  $\text{H}\beta$  (4861 Å).

Vo vzťahu 5.6 vystupujú integrálne toky v emisných čiarach:  $F_{4686} = \text{EW}_{4686} F_{4686}^c$  a  $F_{\text{H}\beta} = \text{EW}_{\text{H}\beta} F_{\text{H}\beta}^c$ . Keďže tieto spektrálne čiary majú podobné vlnové dĺžky a vo vzťahu 5.6 vystupuje ich pomer, túto rovnicu môžeme ďalej zjednodušiť využitím predpokladu  $F_{4686}^c \approx F_{\text{H}\beta}^c$ . Tato aproximácia nám umožní na výpočet teploty horúcej zložky symbiotickej dvojhviezdy použiť ekvivalentné šírky namiesto tokov spektrálnych čiar:

$$T_{\text{hot}} \approx 14,16 \times 10^4 \sqrt{\frac{\text{EW}_{4686}}{\text{EW}_{\text{H}\beta}}} + 5,13 \times 10^4 \quad (5.7)$$

Na druhej strane, ak pomer  $F_{4686}^c$  a  $F_{\text{H}\beta}^c$  určíme pomocou priemerných jasností AG Dra vo filtroch  $B$  a  $V$ , za predpokladu extinkcie v smere tejto symbiotickej dvojhviezdy  $E(B - V) = 0,036$  dostávame:

$$\frac{F_{4686}^c}{F_{\text{H}\beta}^c} \approx 0,89 \quad (5.8)$$



**Obr. 5.13:** Dôsledky zanedbania integrálneho toku žiarenia emisnej čiary He I (4471 Å) a použitia ekvivalentných šírok namiesto integrálnych tokov žiarenia spektrálnych čiar na výpočet teploty horúcej zložky AG Dra počas obdobia aktivity G. Teploty vypočítané pomocou rovnice s aplikovanými aproximáciami (5.7) sú vykreslené pomocou modrých prázdnych krúžkov. Červenými krúžkami sú vykreslené teploty vypočítané pomocou pôvodnej rovnice (5.5), navyše opravené aj o príspevok orbitálneho pohybu a prítomnosť absorpčnej komponenty v profile emisnej čiary  $H_{\beta}$ .

Tento výsledok ukazuje, že využitie ekvivalentných šírok namiesto tokov žiarenia spektrálnych čiar na určenie teploty bieleho trpaslíka v AG Dra zvyšuje jej hodnotu v priemere o 6% (obrázok 5.13). Kombinácia oboch zjednodušení (zanedbanie toku emisnej čiary He I a využitie ekvivalentných šírok namiesto tokov žiarenia) zvyšuje v priemere odvodenú teplotu bieleho trpaslíka o 7%, pričom táto hodnota sa pre konkrétne spektrá menila od 5% do 10%.

### 5.3.2 Ďalšie vplyvy

Na odhad teploty horúcej zložky symbiotických dvojhviezd môžu mať vplyv aj ďalšie efekty. Počas pokojných období je symbiotická hmlovina pravdepodobne iba čiastočne ionizovaná (Leedjäv a kol., 2016; Skopal a kol., 2017 na základe výsledkov Nussbaumer a Vogel, 1987), takže časť ionizujúcich fotónov môže z hmloviny unikať a pozorovaný pomer je väčší ako skutočný:  $(F_{4686}/F_{H_{\beta}})_{\text{poz}} > F_{4686}/F_{H_{\beta}}$ .

Pre úplnosť ešte dodáme, že metóda založená na optických emisných čiarach môže

dávať nadhodnotené odhady teploty horúcej zložky symbiotických sústav aj v prípade, ak intenzita emisných čiar nie je daná iba fotoionizáciou, ale k nej prispievajú aj ďalšie fyzikálne mechanizmy (napr. nárazové oblasti hviezdnych vetrov, procesy v koróne akréčných diskov). Metóda neberie do úvahy ani vplyv vetra bieleho trpaslíka, ktorý tiež môže zvyšovať ekvivalentné šírky emisných čiar He II a neutrálneho vodíka (Sion a kol., 2012).

### 5.3.3 Vývoj teploty bieleho trpaslíka v sústave AG Dra

V predchádzajúcich kapitolách sme podrobne analyzovali a kvantifikovali vplyvy orbitálnych variácií, ako aj zjednodušení používaných v metódach na určenie teploty horúcej zložky v AG Dra. Možno zhrnúť, že všetky analyzované efekty zvyšujú takto určené hodnoty teploty bieleho trpaslíka prítomného v tejto symbiotickej dvojhviezde. Vzhľadom k tomu, že pre historické dáta (od roku 1976) nemáme k dispozícii pôvodné spektrá, ale iba určené hodnoty ekvivalentných širok a ani spektrá získané na Tartu Observatory nezachytávajú emisnú čiaru neutrálneho hélia He I (4471 Å), v tejto kapitole študujeme vývoj teploty bieleho trpaslíka v AG Dra využitím pomeru ekvivalentných širok He II/H $\beta$ .

Väčšina efektov iba systematicky (nezávisle na čase) zvyšuje odhad teploty horúcej zložky AG Dra, a preto nemajú vplyv na jej dlhodobý vývoj. Ekvivalentné šírky emisnej čiary H $\beta$  sme opravili o vplyv orbitálneho pohybu, keďže tento efekt môže meniť dlhodobý vývoj pomeru ekvivalentných širok He II/H $\beta$  (kapitola 5.2.1). Ďalej boli ekvivalentné šírky spektrálnej čiary H $\beta$  zvýšené o konštantnú hodnotu 25%, aby približne zodpovedali ekvivalentným šírkam rektifikovaným o vplyv prítomnosti absorpčnej komponenty v profile emisnej čiary H $\beta$ . Teploty horúcej zložky AG Dra boli potom vypočítané pomocou zjednodušenej rovnice 5.7. Vzhľadom k tomu, že neberieme do úvahy tok žiarenia v spektrálnej čiare He I a používame ekvivalentné šírky namiesto tokov žiarenia, takto určené teploty horúcej zložky AG Dra sú nadhodnotené o maximálne 10% (Merc a kol., 2018).

Ekvivalentné šírky (prípadne integrálne toky žiarenia) študovaných emisných čiar získané z prác Kaler (1987), Iijima (1987) a Mikołajewska a kol. (1995) zachytávajú obdobie rokov 1979 až 1991. Aj napriek tomu, že presnosť týchto údajov je nižšia ako moderných pozorovaní, dávajú nám tieto merania možnosť sledovať aspoň približný vývoj teploty bieleho trpaslíka v systéme AG Dra počas obdobia aktivity D, ktoré sme doposiaľ z tohto hľadiska neskúmali.

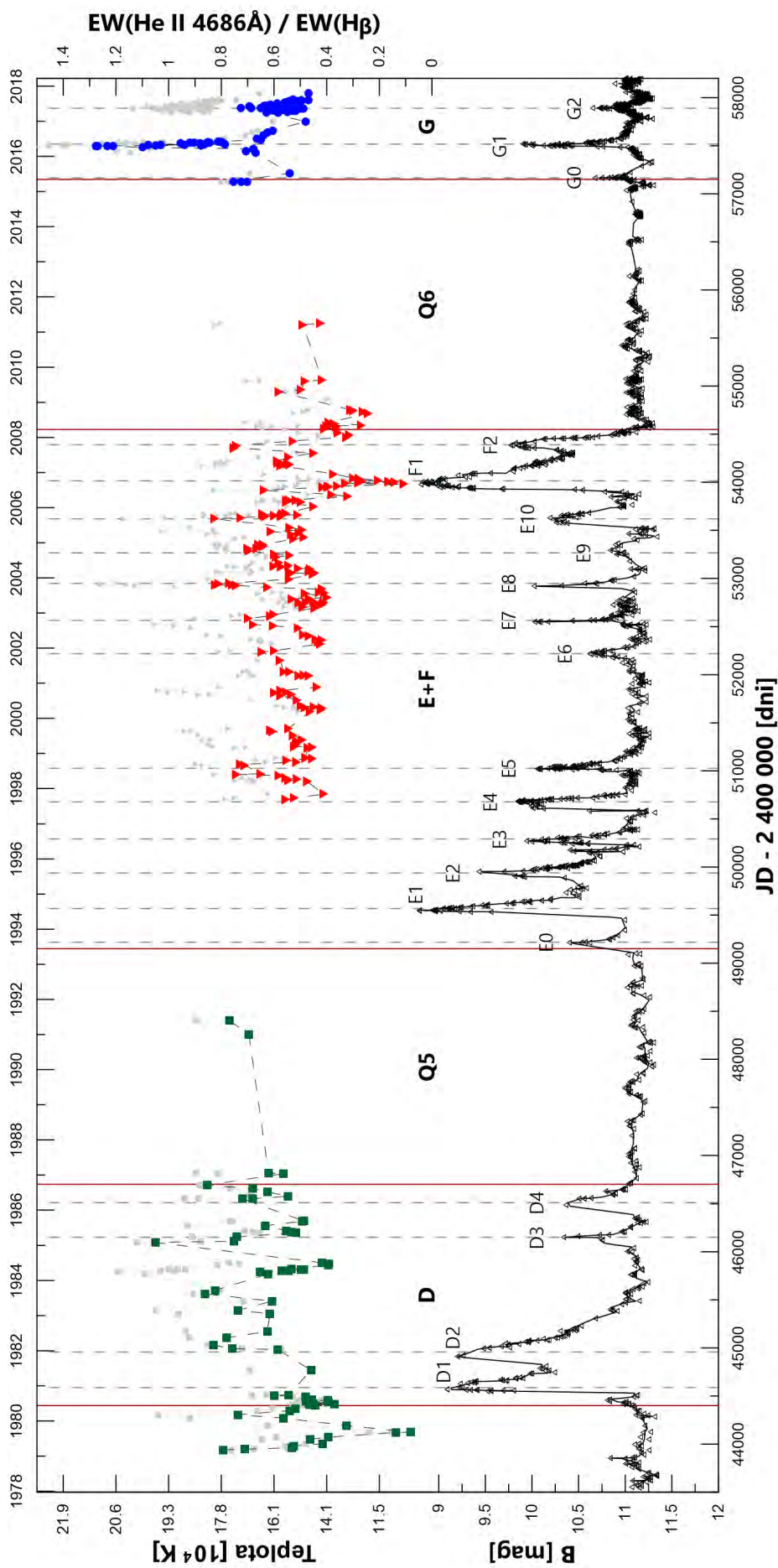
Historická svetelná krivka AG Dra vo filtri  $B$  spolu s vývojom teploty horúcej zložky tejto symbiotickej dvojhviezdy založenom na našej analýze všetkých dostupných fotometrických, ako aj spektroskopických pozorovaní sú vykreslené na obrázku 5.14. Ešte pred samotnou diskusiou výsledkov poznamenajme, že niektoré zvýšenia alebo zníženia teploty horúcej zložky AG Dra sú založené len na jednom alebo dvoch pozorovacích bodoch, a preto tieto výsledky je nutné interpretovať s istou rezervou.

Na základe analýzy historických spektroskopických pozorovaní môžeme konštatovať, že teplota horúcej zložky AG Dra pred a počas vzplanutia D1 klesala. To potvrdzuje náš predpoklad, že hlavné vzplanutia na začiatkoch aktívnych období sú zvyčajne *chladného* typu (Leedjäv a kol., 2016). Škoda, že chýbajú spektroskopické pozorovania počas začiatku aktívneho obdobia E, ktoré by nám tento predpoklad mohli potvrdiť aj pre hlavné vzplanutie E1. Ostatné tri vzplanutia (D2, D3, D4) tohto aktívneho obdobia môžeme vzhľadom na priebeh teploty horúcej zložky klasifikovať ako *horúce* vzplanutia AG Dra.

Počas obdobia rokov 1997 - 2011 máme k dispozícii vlastné pozorovania získané na Tartu Observatory. Naša analýza ukázala, že dlhodobý priemer pomeru  $\text{He II}/\text{H}_\beta$  počas sledovaného obdobia bol  $0,51 \pm 0,15$ , čo zodpovedá teplote horúcej zložky AG Dra okolo  $152\,000^{+14\,000}_{-16\,000}$  K. V tomto období vystúpila hodnota tohto pomeru nad 0,7 počas všetkých *horúcich* vzplanutí (s výnimkou nevýrazného vzplanutia E6). Maximálna hodnota bola 0,83 (180 000 K) počas *horúceho* vzplanutia E8 a E10 a minimálna 0,12 (100 000 K) počas hlavného *chladného* vzplanutia F1.

Na obrázku 5.14 je veľmi dobre viditeľný výrazný pokles teploty horúcej zložky AG Dra počas *chladného* vzplanutia F1 (okolo JD 2 454 000), kedy jej hodnota dosiahla globálne minimum za celé sledované obdobie, ako aj ďalšie poklesy po vzplanutí F2 (JD 2 454 480) a na začiatku pokojného obdobia Q6 (JD 2 454 710). Posledné spomenuté minimum zodpovedá obdobiu, kedy boli pozorované minimá tokov žiarenia všetkých sledovaných emisných čiar. Podobné poklesy (až na hodnotu pomeru  $\text{He II}/\text{H}_\beta \approx 0,4$ ) boli pozorované aj okolo JD 2 451 640 (pravdepodobné pokojné obdobie Q\* (Merc, 2016) medzi vzplanutiami E5 a E6) a JD 2 452 750 (obdobie medzi vzplanutiami E7 a E8). Na obrázku 5.14 tiež môžeme detegovať niekoľko období, kedy pomer  $\text{He II}/\text{H}_\beta$  dosiahol hodnotu  $> 0,7$  (okolo JD 2 450 980, JD 2 452 600 a JD 2 454 380) a hodnotu okolo 0,83 (JD 2 452 940 a JD 2 453 620). Tieto epizódy zodpovedajú *horúcim* vzplanutiam E5, E7, F2, E8 a E10.

Veľmi zaujímavý je vývoj počas aktuálneho obdobia aktivity G (obrázok 5.14). Počas prvého vzplanutia G0 (JD 2 457 166) pomer ekvivalentných širok emisných čiar



**Obr. 5.14:** Vývoj teploty horúcej zložky AG Dra spolu s historickou svetelnou krivkou tejto symbiotickej dvojhviezdy vo filtri *B*. Dáta získané na Tartu Observatory a databázy ARAS sú vykreslené pomocou červených trojuholníkov a modrých kružkov. Teploty horúcej zložky AG Dra odvodené na základe ekvivalentných širok publikovaných v prácach Kaler (1987), Iijima (1987) a Mikołajewska a kol. (1995) sú vyobrazené zelenými štvorcami. Hodnoty určené pomocou ekvivalentnej šírky emisnej čiary  $\text{H}\beta$  neopravenej o orbitálne variácie a prítomnosť absorpčnej komponenty v jej profile sú zobrazené pomocou šedých symbolov. Zvislé plné čiary označujú hranice období pokoja (Q4, Q5 a Q6) a aktivity (D, E+F, G). Zvislé prerušované čiary ďalej vyznačujú polohy jednotlivých vzplanutí AG Dra.

He II a  $H_\beta$  vystúpil na hodnotu okolo 0,74, podobne ako počas vzplanutia F2. Poznamenajme, že vzplanutie G0 bolo fotometricky pomerne nevýrazné a nie je dostatočne pokryté spektroskopickým pozorovacím materiálom, ktorý by umožňoval bližšiu analýzu. Vzplanutie G1 (JD 2 457 517) je charakterizované extrémnym nárastom teploty horúcej zložky AG Dra, aký v celej histórii spektroskopických pozorovaní tejto symbiotickej sústavy doteraz nebol zaznamenaný. Maximálna hodnota pomeru ekvivalentných širok emisných čiar He II a  $H_\beta$  dosiahla hodnotu 1,26, čomu zodpovedá teplota horúcej zložky AG Dra 210 000 K.

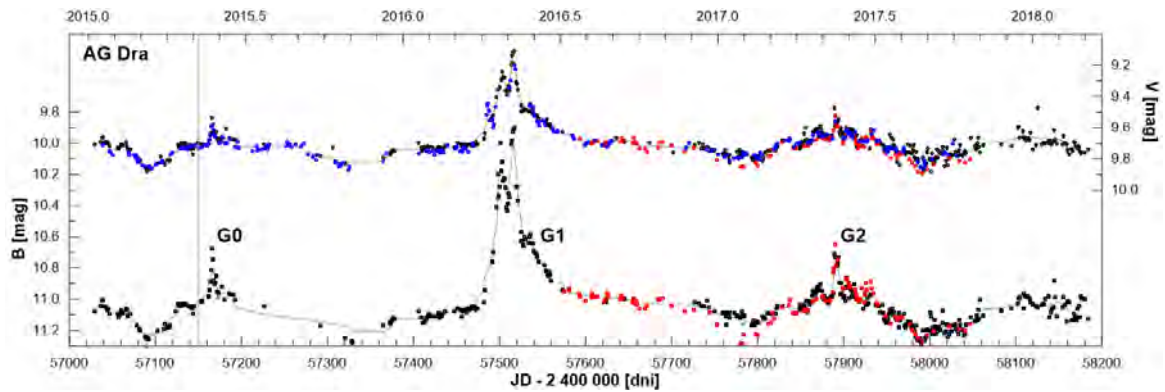
Po vzplanutí G1 teplota klesla na priemernú hodnotu a začiatkom roka 2017 začala znova narastať. Vzplanutie G2 sa teplotou horúcej zložky zaradilo ku typickým *horúcim* vzplanutiam AG Dra, s hodnotou pomeru He II/ $H_\beta$  tesne nad 0,7. Po vzplanutí teplota znovu klesla. Priemerná hodnota tohto pomeru počas obdobia G bola zatiaľ  $0,68 \pm 0,19$ , čo zodpovedá teplote horúcej zložky AG Dra okolo  $168\,000^{+15\,000}_{-18\,000}$  K. Treba poznamenať, že táto vysoká priemerná teplota horúcej zložky je spôsobená práve jej extrémnou hodnotou počas vzplanutia G1. Priemerná hodnota teploty horúcej zložky AG Dra počas období E+F a G je rovnaká ako priemerná hodnota celého študovaného obdobia a to  $0,57 \pm 0,18$  (čomu odpovedá  $158\,000^{+16\,000}_{-18\,000}$  K).

Všetky tri vzplanutia aktuálneho obdobia aktivity G tak patria k *horúcim* vzplanutiam AG Dra. Najmä vzplanutie G1 je čo sa týka teploty výnimočné, pretože takáto vysoká teplota ešte v tomto symbiotickom systéme nebola zaznamenaná. Pomer He II/ $H_\beta$  dosiahol hodnotu  $> 1,0$  iba počas vzplanutia D3 (JD 2 446 100), ale tento výsledok je založený iba na jednom pozorovacom bode. Vnútorňá štruktúra vzplanutia G1 a správanie sa niektorých emisných čiar však demonštrujú aj typický vývoj pozorovaný počas *chladných* vzplanutí AG Dra. Otázkou potom zostáva, či ide o nový typ aktívneho obdobia alebo sme takéto správanie už pozorovali (napr. počas aktívneho obdobia C, ktoré však nie je zaznamenané spektroskopicky). Fotometrickým a spektroskopickým vlastnostiam AG Dra počas aktuálneho obdobia aktivity sa detailne venujeme v nasledujúcej kapitole.

## 5.4 Aktuálne obdobie aktivity AG Dra

Svetelná krivka AG Dra zachytávajúca 129 rokov fotometrickej histórie tohoto symbiotického systému je zobrazená na obrázku 2.2. AG Dra pravidelne prechádza obdobia pokojom a aktivity, ktoré pozostávajú zo sérií individuálnych vzplanutí opakujúcich sa približne s ročnou periódou. Počas obdobia 1889 - 2018 bolo pozorova-





**Obr. 5.15:** Svetelné krivky AG Dra počas obdobia aktivity G v období 2014 - 2018. Čierne symboly - AAVSO, modré symboly - Karpov, červené symboly - Vrašćák.

ných 6 (alebo 7) aktívnych období: A (1932-1939), B (1949-1955), C (1963-1966), D (1980-1986), E+F (1993-2008) a G (2015-). Celkovo bolo doteraz pozorovaných 35 vzplanutí (tabuľka 5.1).

Po siedmych rokoch trvajúcim období pokoja, ktoré nasledovalo po hlavných vzplanutiach v rokoch 2006-2008, sa jasnosť systému AG Dra na konci jari 2015 zvýšila nad priemernú úroveň pokojných období tejto interagujúcej dvojhviezdy. Na základe fotometrických, ako aj spektroskopických vlastností zaznamenaných v ďalšom období bolo potvrdené, že AG Dra vstúpila do nového aktívneho obdobia (G).

#### 5.4.1 Fotometrické vlastnosti

Doposiaľ boli počas tohoto aktívneho obdobia pozorované tri vzplanutia AG Dra (obrázok 5.15). Prvé, menej výrazné vzplanutie bolo zaznamenané v máji 2015 (Munari a kol., 2015). Maximálnu jasnosť dosiahla AG Dra v čase JD 2 457 166 (10,7 mag vo filtri *B* a 9,6 mag vo filtri *V*).

Naša analýza fotometrických a spektroskopických vlastností AG Dra ukázala, že išlo o vedľajšie, *horúce* vzplanutie tohto symbiotického systému. Ako už bolo pozorované na začiatku niektorých predchádzajúcich aktívnych období AG Dra (B, E a pravdepodobne i C), mohlo by aj v tomto prípade ísť o prekursor hlavného vzplanutia. Z tohto dôvodu sme vzplanutie v roku 2015 označili ako G0 (Gális a kol., 2017; Merc a kol., 2017).

Nové obdobie aktivity AG Dra bolo definitívne potvrdené druhým vzplanutím zaznamenaným v roku 2016 (Munari a kol. 2016). Počas tohto vzplanutia (G1) dosiahla jasnosť AG Dra hodnôt okolo 9,9 mag v *B* filtri a 9,1 mag vo filtri *V* v čase JD 2 457 517 (8. máj 2016). Podobne ako v prípade vzplanutia G1, amplitúda jasnosti



**Tab. 5.1:** Pokojné a aktívne obdobia symbiotickej sústavy AG Dra. Označenie období Q1, A, ... Q6 je uvedené podľa práce Hric a kol. (2014). Obdobie označené v tejto práci ako E + F sme rozdelili na obdobia E0 - E5, Q\*, E6 - E10 a F (Merc, 2016). Práve prebiehajúce aktívne obdobie sme v práci Gális a kol. (2017) označili ako G.

Obdobie	Začiatok		Koniec		Počet vzplanutí	
	JD* [d]	rok	JD* [d]	rok		
Q1	11 500	1890,36	25 500	1928,69	-	
A	25 500	1928,69	29 200	1938,82	7	
Q2	29 200	1938,82	33 100	1949,50	-	
B	33 100	1949,50	35 100	1954,98	6	
Q3	35 100	1954,98	38 300	1963,74	-	
C	38 300	1963,74	39 250	1966,34	2	
Q4	39 250	1966,34	44 400	1980,44	-	
D	44 400	1980,44	46 700	1986,74	4	
Q5	46 700	1986,74	49 150	1993,44	-	
E0 - E5	49 150	1993,44	51 200	1999,06	6	
E+F	Q*	51 200	1999,06	52 100	2001,52	-
	E6 - E10	52 100	2001,52	53 850	2006,31	5
	F	53 850	2006,31	54 550	2008,23	2
Q6	54 550	2008,23	57 150	2015,35	-	
G	57 150	2015,35	do súčasnosti		3	

$$JD^* = JD - 2\,400\,000$$

zaraďuje toto vzplanutie medzi vedľajšie vzplanutia AG Dra. Takéto fotometrické správanie je pomerne nezvyčajné, pretože prekursori aktivity boli väčšinou nasledované hlavnými, veľmi výraznými vzplanutiami, počas ktorých jasnosť symbiotického systému dosahovala 8,8 mag v *B* filtri a 8,4 mag vo filtri *V*.

Vedľajšie vzplanutia na začiatku aktívneho obdobia boli pravdepodobne pozorované iba počas obdobia C v rokoch 1963 - 1966, ktoré bolo zároveň doteraz najkratším a najmenej výrazným aktívnym obdobím AG Dra za celú dobu pozorovaní tejto symbiotickej dvojhviezdy. Aktívne obdobie C je však zaznamenané iba fotometricky (a navyše pomocou relatívne nespoľahlivých fotografických meraní), a preto jeho detailné

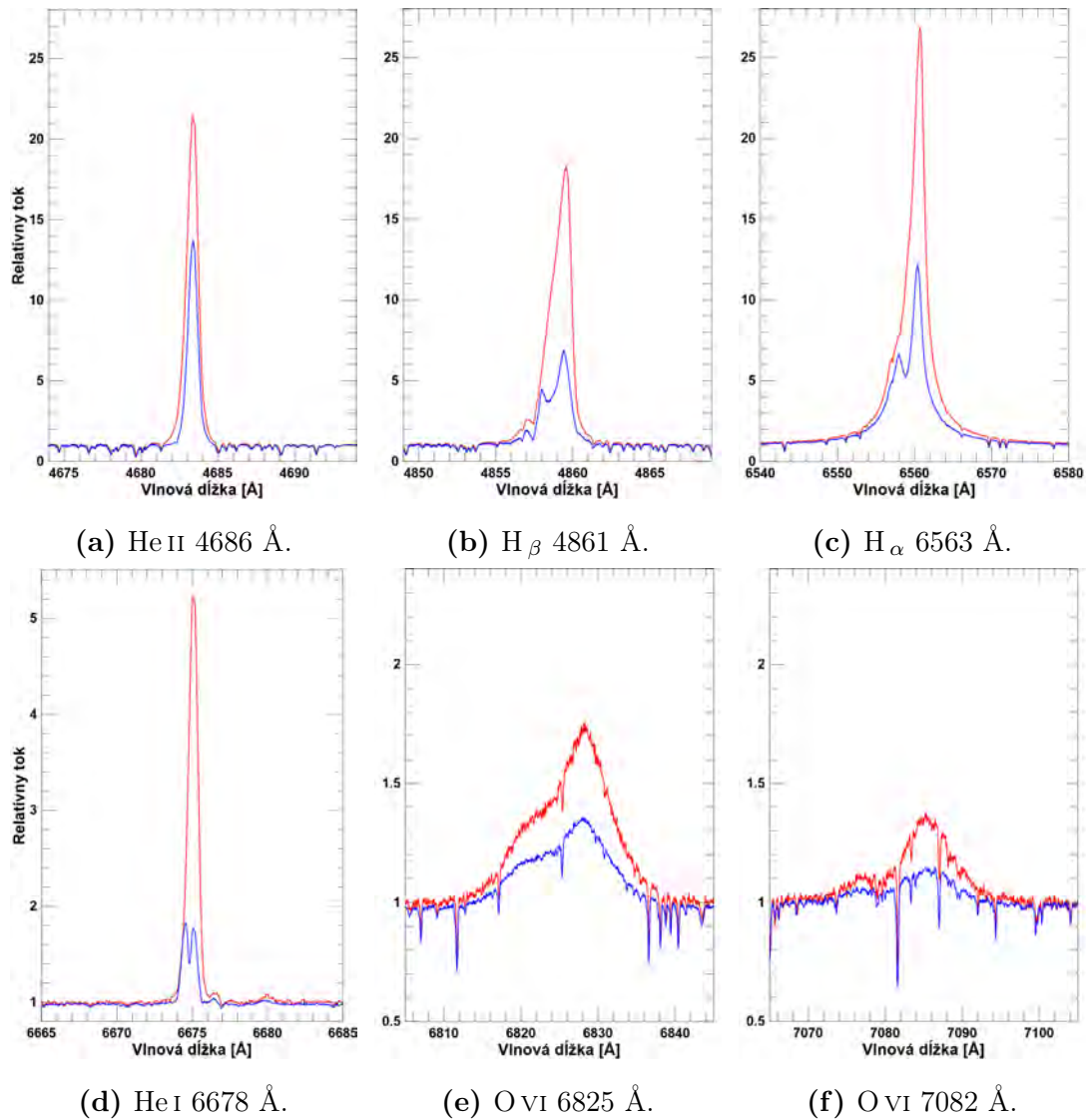
porovnanie s aktuálnym obdobím aktivity AG Dra ani v budúcnosti pravdepodobne nebude možné.

Ako ukázala naša štatistická analýza fotometrických pozorovaní, medián intervalu medzi vzplanutiami AG Dra je 360 dní. Na základe tejto hodnoty sme očakávali tretie vzplanutie aktuálneho obdobia aktivity AG Dra v intervale medzi 3. májom 2017 (JD 2 457 877) a 12. júnom 2017 (JD 2 457 917). V apríli 2017 sme iniciovali medzinárodnú pozorovaciu kampaň s cieľom získať fotometrický a spektroskopický pozorovací materiál s vysokým časovým rozlíšením, ktorý by nám umožnil detailne študovať správanie sa AG Dra počas aktuálneho aktívneho obdobia. K tretiemu vzplanutiu AG Dra skutočne došlo v predpovedanom časovom intervale. Vzplanutie G2 bolo zaznamenané 17. mája 2017 (JD 2 457 890), teda 373 dní po predchádzajúcom zjasnení a čo sa týka amplitúdy jasnosti v jednotlivých fotometrických filtroch bolo počas tohto vzplanutia dosiahnutých podobných hodnôt ako v prípade G0.

### 5.4.2 Spektroskopické vlastnosti

Detailnú analýzu správania sa významných emisných čiar v optickom spektre AG Dra počas takmer 14 rokov (1997-2011) využitím vlastného pozorovacieho materiálu so stredným rozlíšením sme prezentovali v práci Leedjärv a kol. (2016). Na túto analýzu sme nadviazali v predloženej diplomovej práci, pričom sme sa zamerali iba na posledné obdobie aktivity AG Dra. Za účelom výskumu teplotného vývoja horúcej zložky AG Dra však boli tieto dáta znovu analyzované. Tiež boli využité historické pozorovania zachytávajúce spektroskopickú históriu tohto symbiotického systému od roku 1976, ktoré boli získané z publikovaných prác popísaných v kapitole 3.2.

Fotometrické vlastnosti posledných troch vzplanutí naznačujú, že všetky patria k vedľajším, *horúcim* vzplanutiam AG Dra. Takúto klasifikáciu podporujú aj výsledky nášho výskumu spektroskopického pozorovacieho materiálu získaného pre tento symbiotický systém počas aktuálneho obdobia aktivity. Priame porovnanie spektier s vysokým rozlíšením (obrázok 5.16) získaných počas obdobia pokoja Q6 (JD 2 456 906) a počas vzplanutia G0 (JD 2 457 176), ako aj krivky vývoja ekvivalentných šírok počas celého aktívneho obdobia G (obrázok 5.17) ukázali výrazný nárast ekvivalentných šírok študovaných emisných čiar vodíka  $H_\alpha$  a  $H_\beta$ , neutrálneho hélia He I i ionizovaného hélia He II. Tento nárast je typickou charakteristikou *horúcich* vzplanutí (Leedjärv a kol., 2016). Na druhej strane, ekvivalentné šírky Ramanovsky rozptýlených spektrálnych čiar kyslíka O VI počas vzplanutia G1 výrazne poklesli. Takéto správanie sme

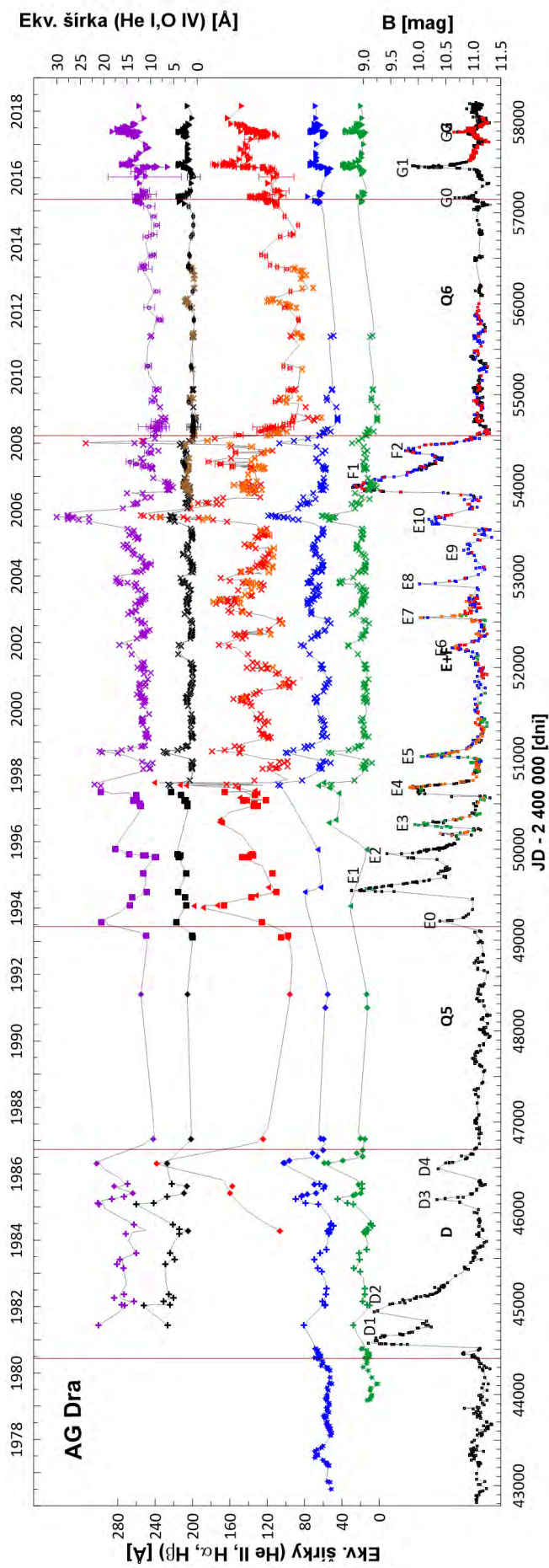


**Obr. 5.16:** Profily študovaných emisných čiar v spektre AG Dra v pokojnom období Q6 (JD 2 456 906.72, 6. september 2014; modrá čiara) a počas vzplanutia G0 (JD 2 457 176.51, 3. jún 2015; červená čiara).

doteraz zaznamenali iba počas hlavného, *chladného* vzplanutia v roku 2006.

Okrem poklesu ekvivalentnej šírky spektrálnej čiary O VI počas vzplanutia G1 a jej následného nárastu k hodnotám bežným počas *horúcich* vzplanutí AG Dra sú zaujímavé aj ďalšie pozorované javy. Spektrálne čiary neutrálneho hélia He I i ionizovaného hélia He II vykazujú počas obdobia aktivity G typické správanie počas *horúcich* vzplanutí, kedy sú krivky ich ekvivalentných širok korelované s jasnosťou systému.

V prípade spektrálnych čiar neutrálneho vodíka H I môžeme sledovať aktivitu typickú pre symbiotický systém AG Dra. Vlastnosti spektrálnej čiary H $\beta$  zaraďujú všetky tri zjasnenia k menej výrazným, *horúcim* vzplanutiam, ktoré v aktivite AG Dra



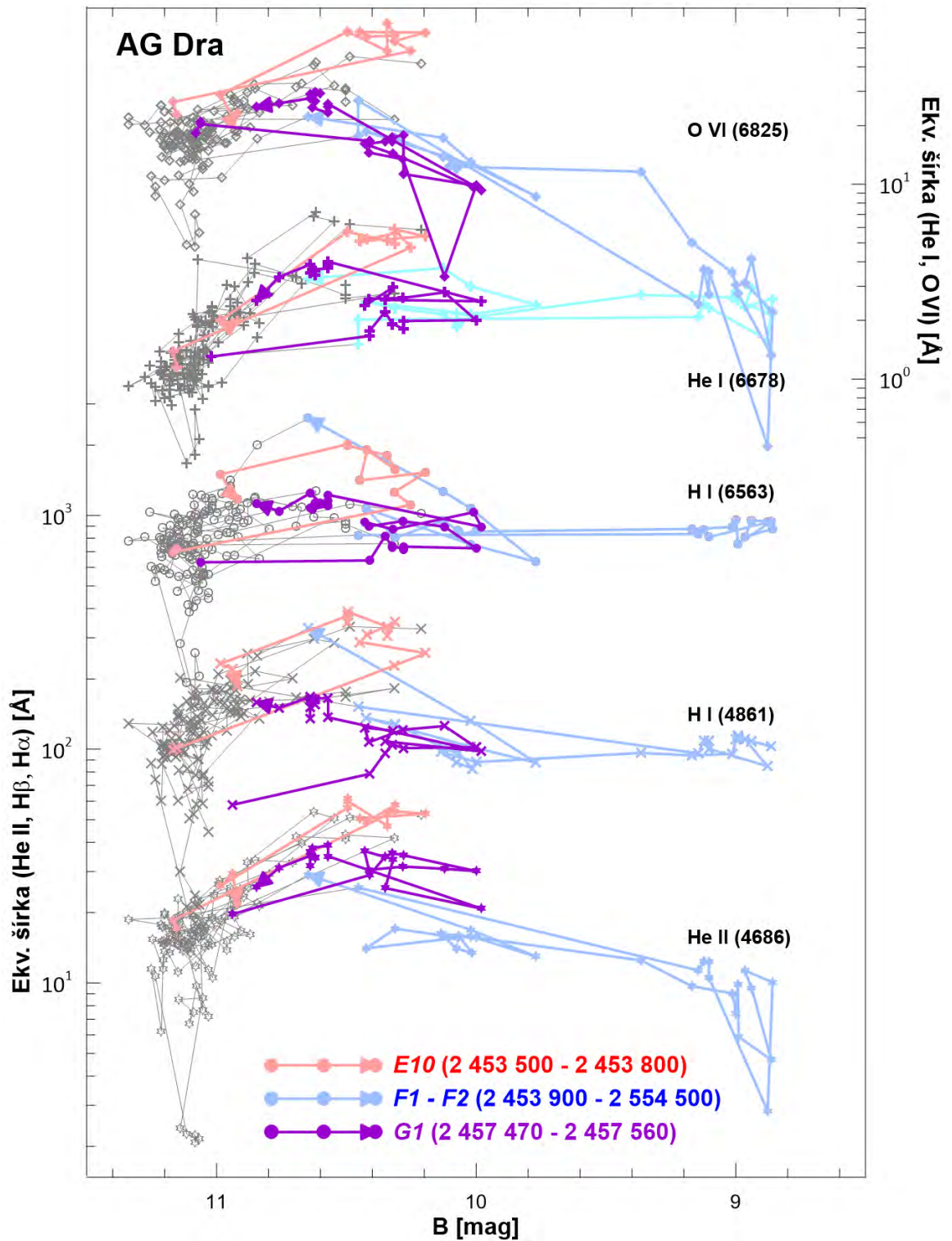
**Obr. 5.17:** Ekvivalentné šírky študovaných spektrálnych čiar v období 1976 - 2018, spolu so svetelnou krivkou AG Dra v  $B$  filtri. Zvislé čiary oddeľujú jednotlivé obdobia pokoja a aktivity (Q4, D, Q5, E+F, Q6 a G). Symboly reprezentujú zdroje dát: hviezdíčky (Kaler, 1987), plusy (Iijima, 1987), kosoštvorce (Mikolajewska a kol., 1995), štvorce (Genovali, 2010), trojuholníky (Tomov a Tomova, 1999, 2000), krížiky (dáta z Tartu Observatory; oranžové a hnedé reprezentujú dáta získané zo spektier s vyšším rozlíšením), krúžky (dáta z observatória Astronomického ústavu v Ondřejove) a preklopené trojuholníky (dáta z databázy ARAS).

nastávajú pomerne často (napr. E7, E8, E9). Treba však poznamenať, že podobný vývoj sme v tejto spektrálnej čiare zaznamenali aj počas *chladného* vzplanutia F1. Vzplanutia G0, G1 a G2 boli v emisnej čiare  $H_\alpha$  výraznejšie, no zaujímavý je najmä pomerne značný pokles ekvivalentnej šírky tejto emisnej čiary pred vzplanutím G2. Aj takýto pokles sme však už pozorovali, napríklad pred vzplanutím E5 alebo E7.

Leedjäv a kol. (2004) zistili, že medzi jasnosťou AG Dra vo filtri  $U$  a ekvivalentnými šírkami významných emisných čiar v logaritmickej škále existuje takmer lineárny vzťah (obrázok 2 v citovanej práci). V práci Leedjäv a kol. (2016) sme však ukázali, že počas *chladného* dvojitého vzplanutia F1 - F2 symbiotického systému AG Dra je táto závislosť narušená (obrázok 3 v citovanej práci) a s nárastom jasnosti vo filtri  $U$  ekvivalentné šírky študovaných emisných čiar zostávajú takmer konštantné alebo dokonca klesajú. Na základe našej analýzy sme zistili, že podobné správanie vykazuje AG Dra aj pre vzťah fotometrickej jasnosti vo filtri  $B$  a ekvivalentných širok študovaných emisných čiar (obrázok 5.18).

Na obrázku 5.18 je vynesená závislosť ekvivalentných širok študovaných emisných čiar v logaritmickej škále na jasnosti vo filtri  $B$ . Jednotlivé pozorovacie body sú chronologicky spojené čiarami, pričom sú pre porovnanie farebne zvýraznené tri vzplanutia: E10, F1 - F2 a G1. Ako je vidieť, pre *horúce* vzplanutie E10 je vzťah týchto veličín lineárny, teda s nárastom jasnosti vo filtri  $B$  rastú aj ekvivalentné šírky študovaných emisných čiar. V prípade *chladného* dvojitého vzplanutia F1 - F2 sa však ekvivalentné šírky emisných čiar  $H_\beta$ ,  $H_\alpha$  a He I takmer nemenia, zatiaľ čo ekvivalentné šírky He II a O VI s nárastom jasnosti AG Dra dokonca klesajú. Z týchto závislostí je zrejmé, že existuje istá limitná hodnota jasnosti, pri ktorej dochádza k zmene v priebehu spektroskopických vlastností AG Dra počas jednotlivých vzplanutí. Hodnota tejto limitnej magnitúdy je pre jednotlivé emisné čiary vo filtri  $U$  v intervale (9,5 - 9,4) mag (Leedjäv a kol. 2016) a vo filtri  $B$  v intervale (10,2 - 10,0) mag. S ohľadom na tieto výsledky je vzplanutie G1 znovu výnimočné.

Ako bolo uvedené, na základe hodnoty amplitúdy nárastu jasnosti počas vzplanutia G1, ako aj vzhľadom na niektoré spektroskopické vlastnosti možno toto vzplanutie zaradiť medzi *horúce* vzplanutia symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. Takúto klasifikáciu podporuje aj odhad teploty, ktorý diskutujeme v časti 5.3. Ak však vykreslíme ekvivalentné šírky študovaných spektrálnych čiar v závislosti od jasnosti AG Dra vo filtri  $B$  pre toto vzplanutie (obrázok 5.18), sledujeme správanie, ktoré je skôr typické pre *chladné* vzplanutia (emisné čiary  $H_\beta$ ,  $H_\alpha$ , He I a O VI) alebo je istou kombináciou alebo prechodom medzi *chladnými* a *horúcimi* vzplanutiami (emisná čiara He II).



**Obr. 5.18:** Závislosť ekvivalentných šírok študovaných emisných čiar v logaritmickej škále od fotometrickej jasnosti AG Dra v  $B$  filtri. Jednotlivé pozorovacie body sú chronologicky spojené čiarami, pričom sú pre porovnanie farebne zvýraznené tri vzplanutia: E10, F1-F2 a G1.



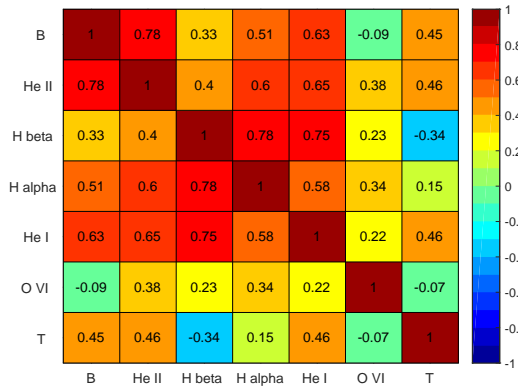
Vhodnou možnosťou pre porovnanie vývoja symbiotického systému AG Dra počas aktuálneho a predchádzajúcich aktívnych období je korelačná analýza. Korelačné diagramy sme použili v práci Merc (2016) na štúdium vlastností AG Dra počas predchádzajúcich období pokoja a aktivity. Na obrázku 5.11 sú zobrazené korelačné diagramy, teda tabuľky korelačných koeficientov medzi svetelnou krivkou AG Dra vo filtri *B*, krivkami ekvivalentných širok študovaných spektrálnych čiar a priebehom teploty horúcej zložky tejto symbiotickej dvojhviezdy pre aktívne obdobie G (obrázok 5.19a), vzplanutie G1 (obrázok 5.19b), *horúce* vzplanutie E4-E5 (obrázok 5.19c) a *chladné* vzplanutie F1 (obrázok 5.19d). Korelačné koeficienty boli vypočítané pomocou vlastného programu CORRLAB, ktorý je bližšie popísaný v prílohe C.1.

Počas *horúcich* vzplanutí AG Dra je teplota horúcej zložky viac menej korelovaná s jasnosťou, vo veľmi dobrej korelácii sú aj fotometrické a spektroskopické vlastnosti tohto symbiotického systému (Hric a kol., 2014; Merc, 2016). Počas *chladného* vzplanutia F1 je naopak teplota horúcej zložky veľmi málo korelovaná s priebehom jasnosti AG Dra a s krivkami ekvivalentných širok študovaných emisných čiar je dokonca v antikorelácii (obrázok 5.19d). Keďže počas *chladného* vzplanutia F1 došlo k výraznému poklesu ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlenej čiary O VI (Leedjärv a kol. 2016), nie sú v korelácii s ostatnými študovanými emisnými čiarami.

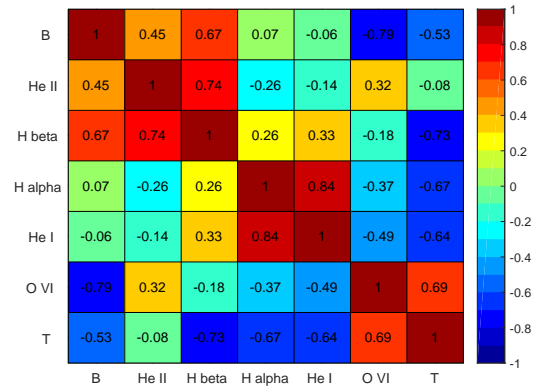
Ako už bolo spomenuté, fotometricky sa aktuálnemu obdobiu aktivity AG Dra najviac podobá obdobie aktivity C. Toto obdobie však nie je pokryté spektroskopickými pozorovaniami, takže priame porovnanie nie je možné. Spektroskopicky sú jednotlivé vzplanutia aktívneho obdobia G v porovnaní so vzplanutiami v obdobiach D, E+F pomerne nevýrazné, najmä v emisnej čiare  $H_{\beta}$ . Ak je aktívne obdobie G analyzované ako celok, jeho korelačný diagram (obrázok 5.19a) je podobný diagramu pre *horúce* vzplanutie E4-E5 (obrázok 5.19c) symbiotickej sústavy AG Dra.

Detailný rozbor priebehu jasnosti vzplanutia G1 však ukázal, že toto vzplanutie malo v skutočnosti dve maximá, s malým poklesom jasnosti medzi nimi (obrázok 5.20). Ak sme analyzovali iba centrálnu časť vzplanutia G1, teplota horúcej zložky AG Dra bola v antikorelácii s jasnosťou a korelačný diagram (obrázok 5.19b) sa začal výrazne podobáť na diagram *chladného* vzplanutia F1 (obrázok 5.19d).

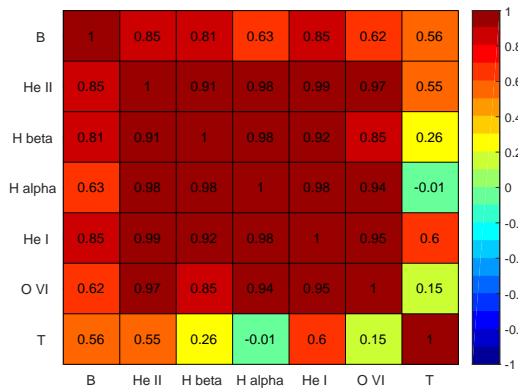
Dodajme, že takáto detailná analýza priebehu vzplanutia AG Dra bola umožnená len vďaka pokrytiu študovaného obdobia fotometrickými, ako aj spektroskopickými pozorovaniami s výnimočným časových rozlíšením. Štruktúru vzplanutia na takejto časovej škále sme študovali vôbec po prvýkrát, a preto zostane nezodpovedanou otázkou, či aj štruktúra predchádzajúcich vzplanutí AG Dra nemohla byť podobná.



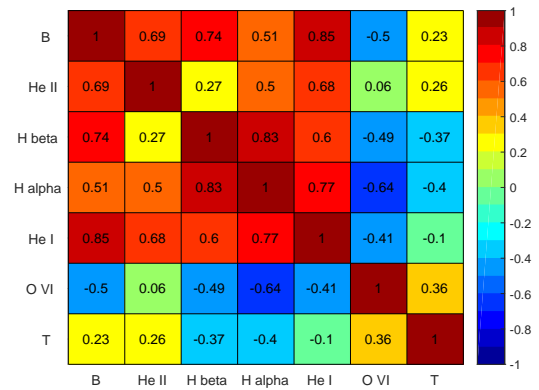
(a) Obdobie aktivity G.



(b) Vzplanutie G1.



(c) Horúce vzplanutia E4-E5.



(d) Chladné vzplanutie F1.

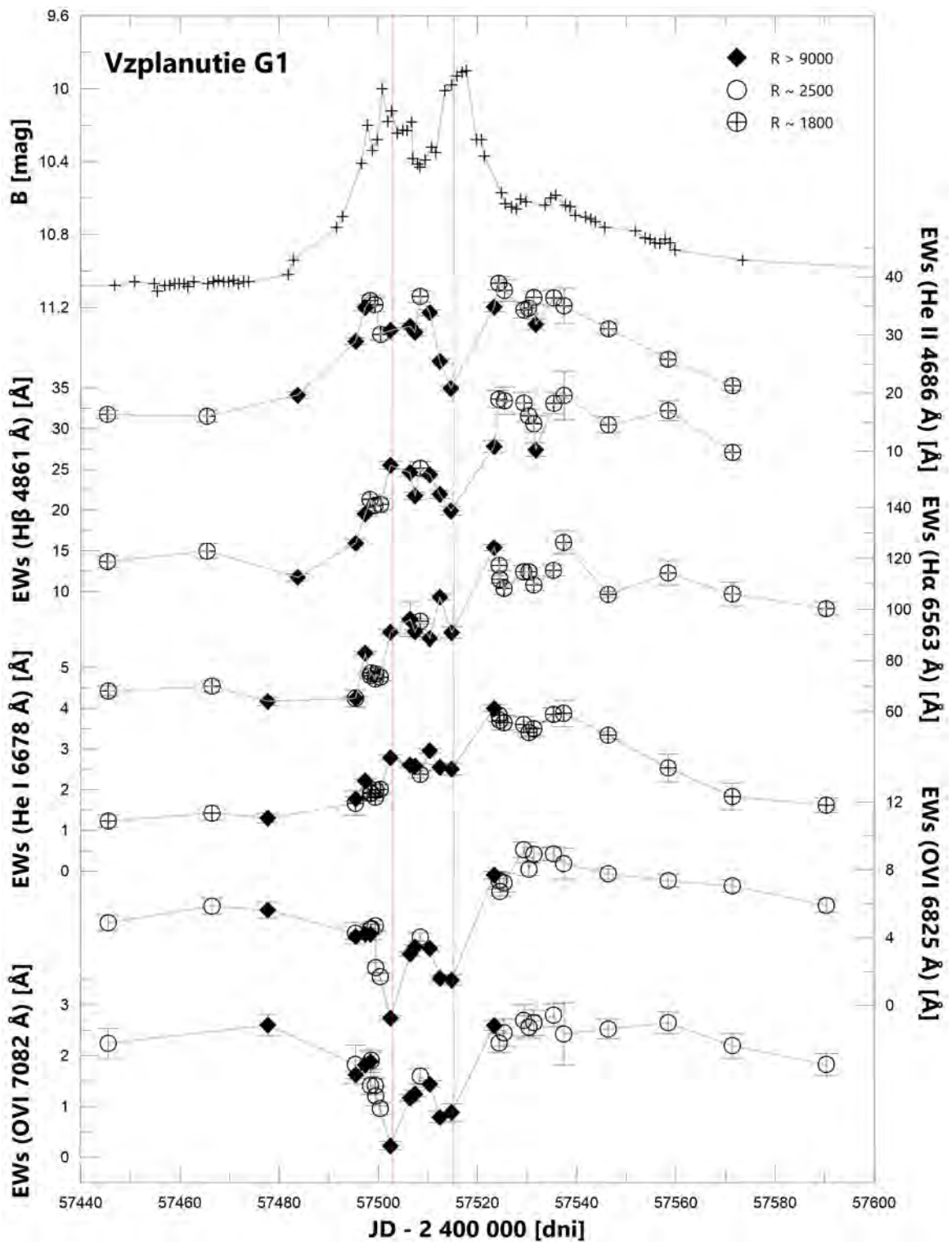
**Obr. 5.19:** Tabuľky korelačných koeficientov medzi fotometrickými dátami v B filtri, krivkami ekvivalentných širok emisných spektrálnych čiar a teplotou.

### Ramanovsky rozptýlené čiary O VI

Podstata dvoch širokých emisných čiar v spektrách symbiotických hviezd (na vlnových dĺžkach 6825 a 7082 Å) bola veľmi dlho predmetom diskusií. Schmid (1989) identifikoval tieto čiary ako výsledok Ramanovského rozptylu fotónov rezonančných čiar O VI na vlnových dĺžkach 1032 a 1038 Å na atónoch neutrálneho vodíka. Formovanie týchto čiar teda vyžaduje špecifické fyzikálne podmienky, ktoré existujú takmer výlučne iba v symbiotických hviezdach: prítomnosť horúceho zdroja žiarenia, schopného ionizovať atómy kyslíka päťkrát a dostatok neutrálneho vodíka.

Ramanovsky rozptýlené čiary O VI sú v spektre AG Dra pozorované takmer vždy. Neboli detegované iba počas *chladného* vzplanutia F1 v roku 2006 (Munari a kol., 2009; Shore a kol., 2010; Leedjäv a kol., 2016) a pravdepodobne ani počas dvojitého *chladného* vzplanutia E1-E2 (obrázok 5.17). Keďže formovanie týchto spektrálnych čiar vyžaduje dostatok UV fotónov rezonančných čiar O VI a zároveň dostatok ne-





Obr. 5.20: Krivky ekvivalentných šírok vybraných emisných spektrálnych čiar a svetelná krivka v B filtri počas vzplanutia G1. Rôzne symboly pre ekvivalentné šírky znamenajú rôzne rozlíšenie spektier, z ktorých boli určené. Zvislé červené čiary zodpovedajú dvom maximám v danom vzplanutí.

utrálneho vodíka, vymiznutie Ramanovsky rozptýlených čiar O VI môže súvisieť so zmenami v rozložení či hustote päťkrát ionizovaného kyslíka alebo neutrálneho vodíka, ale aj so zmenami optickej hrúbky symbiotickej hmloviny v UV oblasti na vlnových dĺžkach 1032 a 1038 Å. Prvá možnosť implikuje variabilitu teploty ionizujúceho objektu alebo zmeny množstva hmoty (kyslíka alebo vodíka) prenášanej hviezdnyim vetrom chladnej zložky do okolia bieleho trpaslíka. Druhá možnosť súvisí s mechanizmom straty hmoty z horúcej zložky počas vzplanutia symbiotického systému AG Dra (Shore a kol., 2010).

Ako ukázala naša analýza priebehu teploty horúcej zložky AG Dra (Leedjäv a kol. 2016) počas *chladného* vzplanutia F1, jej hodnota nebola dosť vysoká ( $< 114\,000$  K, viď rovnica 5.3) na to, aby mohli byť atómy kyslíka päťkrát ionizované v dostatočnom množstve. To spôsobilo nedostatok UV fotónov rezonančných čiar O VI a tým následne aj dramatické zníženie pozorovaných ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlených čiar O VI v spektre AG Dra.

Počas *horúcich* vzplanutí teplota horúcej zložky AG Dra rastie, čím rastie aj počet päťkrát ionizovaných atómov kyslíka, čo vo výsledku vedie k nárastu pozorovaných ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlených čiar O VI. Nárast počtu päťkrát ionizovaných atómov kyslíka musí byť dostatočný na to, aby prípadne kompenzoval zvýšenú absorpciu UV fotónov v dôsledku zvýšenej straty hmoty z bieleho trpaslíka počas vzplanutí symbiotickej sústavy.

Ramanovsky rozptýlené čiary O VI boli pozorované v optických spektrách AG Dra počas celého obdobia aktivity G okrem niekoľkých dní počas maxima jasnosti vzplanutia G1 (obrázok 5.20). Ako však už bolo uvedené, na základe dostupných fotometrických, ako aj spektroskopických pozorovaní AG Dra sme zistili, že vzplanutie G1 bolo *horúceho* typu. Podstata poklesu ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlených čiar O VI počas tohto vzplanutia preto bola pravdepodobne odlišná ako v prípade *chladného* vzplanutia F1. Ako ukázala naša analýza teploty horúcej zložky AG Dra (kapitola 5.3), táto bola dosť vysoká, aby v okolí bieleho trpaslíka mohli existovať päťkrát ionizované atómy kyslíka v dostatočnom počte. Vzhľadom na to, že počas vzplanutia G1 boli pozorované v spektre AG Dra aj emisné čiary Balmerovej série vodíka, môžeme usudzovať, že vplyvom vysokej teploty horúcej zložky nedošlo k úplnej ionizácii vodíka, a že sa v symbiotickej sústave stále nachádzalo dostatok vodíka v neutrálnom stave. Z uvedeného potom vyplýva, že pozorovaný výrazný pokles ekvivalentných širok Ramanovsky rozptýlených čiar O VI počas vzplanutia G1 by mohol súvisieť s nárastom optickej hrúbky symbiotickej hmloviny v UV oblasti, čo by mohlo

súvisieť so zvýšenou stratou hmoty z bieleho trpaslíka v prítomného v AG Dra spôsobeného jeho mimoriadne vysokou teplotou počas tohto vzplanutia.

## 5.5 Krátkodobé variácie AG Dra v optickej oblasti

Sokoloski a kol. (2006a) navrhli na vysvetlenie vzplanutí Z And model kombinovanej novy, v ktorom menej jasné, *horúce* vzplanutia vysvetlili podobne ako v prípade trpasličích nov, teda nestabilitami v akréčnom disku v okolí horúcej zložky tejto symbiotickej sústavy. Hlavné, *chladné* vzplanutia vysvetlili modelom vzplanutí klasických nov: výrazne zosilneným termonukleárnym horením vo vrstve na povrchu bieleho trpaslíka, iniciovaného nestabilitou v disku.

Náš odhad založený na fyzikálnych parametroch symbiotickej dvojhviezdy AG Dra (hmotnosť bieleho trpaslíka  $0,5 M_{\odot}$ , rýchlosť akrécie hmoty  $5 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ rok}^{-1}$ ) ukázal, že tento model by mohol vysvetliť ako kvázi stabilné horenie na vodík bohatej hmoty akreovanej na povrch bieleho trpaslíka, tak aj hlavné, *chladné* vzplanutia opakujúce sa každých 9-15 rokov (Leedjäv a kol., 2016). Principiálnym problémom aplikácie modelu kombinovanej novy na AG Dra je, že v prípade tejto symbiotickej dvojhviezdy doposiaľ neboli pozorované žiadne prejavy potvrdzujúce existenciu akréčného disku (Leedjäv a kol., 2004).

Širokopásmové, stochastické fotometrické variácie s amplitúdou rádovo stotín až desiatín magnitúdy na časovej škále minút až desiatok minút (v astrofyzikálnej literatúre označované ako flickering) by boli bezpochyby jedným z najpresvedčivejších dôkazov prítomnosti akréčného disku. Dobrzycka a kol. (1996) a Sokoloski a kol. (2001) študovali flickering vo viacerých symbiotických sústavách, no v prípade AG Dra ani jedna z týchto štúdií prítomnosť takejto variability nepotvrdila.

Z fotometrických pozorovaní však vyplýva, že flickering nie je bežným prejavom pozorovaným v symbiotických sústavách, pretože bol doposiaľ pozorovaný iba v 10 prípadoch: RS Oph, T CrB, MWC 560, V2116 Oph, CH Cyg, RT Cru, o Cet, V407 Cyg, V648 Car a EF Aql (Dobrzycka a kol., 1996; Sokoloski a kol., 2001; Gromadzki a kol., 2006; Angeloni a kol., 2012; Zamanov a kol., 2017; Stoyanov a kol., 2018).

Na druhej strane, v prípade CH Cyg v období 2010-2013 flickering prítomný nebol, aj keď v predchádzajúcom období, ako aj po auguste 2014 bol pozorovaný na svetelných krivkách tejto symbiotickej sústavy (Stoyanov a kol., 2018). Neprítomnosť flickeringu v uvedenom období autori vysvetľujú narušením vnútornej štruktúry akréčného disku v dôsledku dočasného obmedzenia prenosu hmoty z obra, ktorý mohol

súvisieť s aktivitou systému CH Cyg. Tento výsledok naznačuje, že flickering môže byť v prípade symbiotických dvojhviezd prechodný fenomén.

Z databázy AAVSO, ako aj v rámci našej pozorovacej kampane AG Dra sa podarilo získať niekoľko pozorovacích sérií, ktoré umožňujú sledovať variabilitu tejto symbiotickej sústavy na krátkych časových škálach. Konkrétne išlo o 42 svetelných kriviek s vysokým časovým rozlíšením získaných vo filtroch  $B$ ,  $V$ ,  $R$  a  $I$ , nie všetky však boli kvôli šumu alebo krátkosti použiteľné pre výskum flickeringu. Tiež sa podarilo získať aj štyri série spektier, ktoré nám navyše umožňujú sledovať zmeny ekvivalentných širok troch emisných čiar na krátkych časových škálach.

Analýza flickeringu v prípade fotometrických pozorovaní symbiotických hviezd často vychádza z poznatkov, ktoré boli získané pre kataklizmatické systémy. Bruch (1992) pre tento typ premenných hviezd navrhol, že krátke úseky ich svetelných kriviek sa skladajú z dvoch zložiek: konštantnej a variabilnej, ktorá predstavuje samotný flickering. Ak predpokladáme, že zmeny svetelnej krivky počas jednej noci sú spôsobené iba flickeringom, pozorovaný tok zdroja týchto zmien  $F_{fl}$  môžeme vypočítať pomocou vzťahu:

$$F_{fl} = F_{av} - F_{min} \quad (5.9)$$

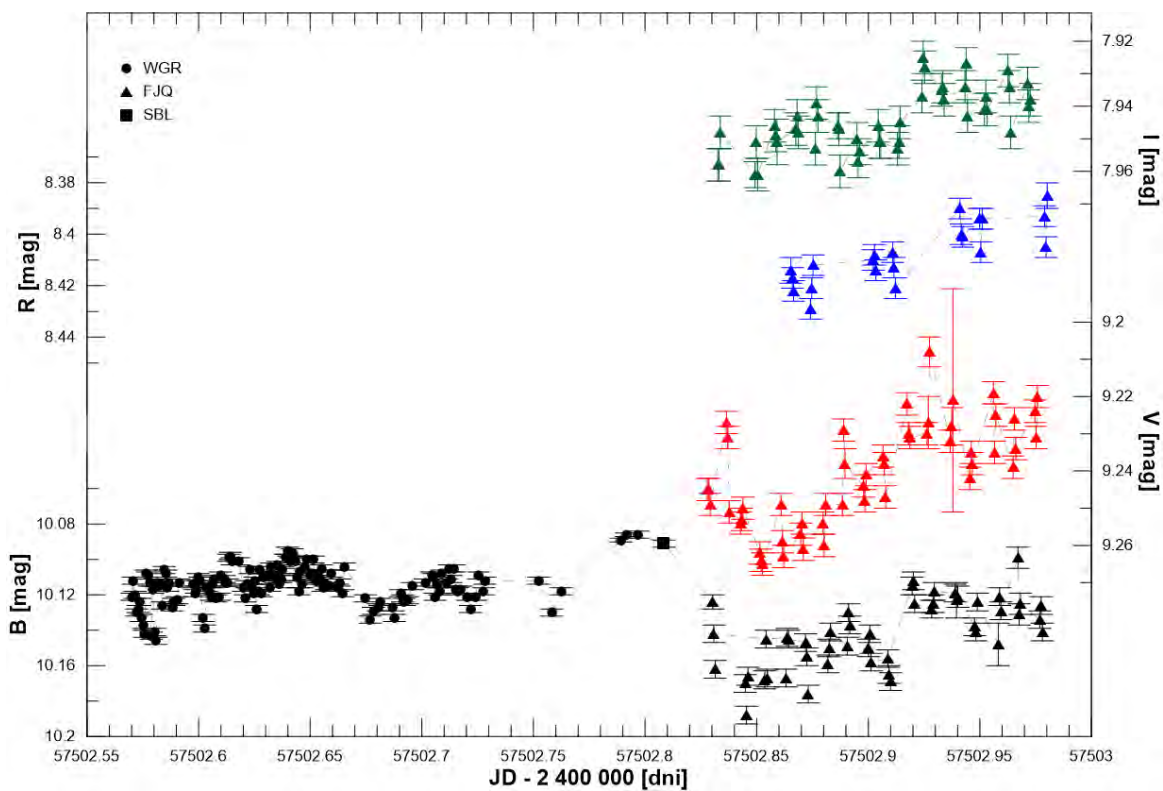
kde  $F_{av}$  je priemerný a  $F_{min}$  je minimálny pozorovaný tok počas danej série pozorovaní. Modifikáciu metódy prezentovali Nelson a kol. (2011), ktorí tok zdroja flickeringu určili pomocou vzťahu:

$$F_{fl} = F_{max} - F_{min} \quad (5.10)$$

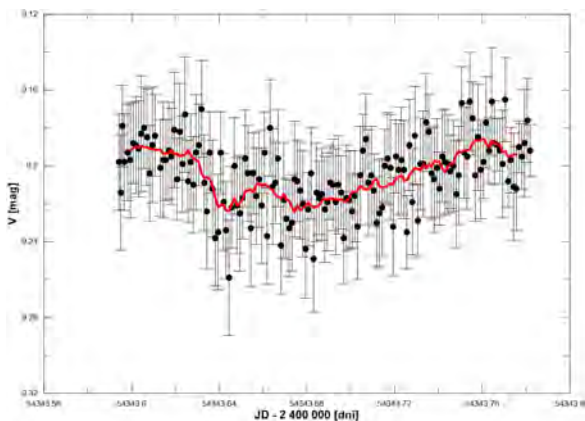
kde  $F_{max}$  je maximálny pozorovaný tok počas danej série pozorovaní.

Túto metódu sme použili na fotometrické pozorovania AG Dra získané počas noci 23. apríla 2016 (JD 2 457 502), ktoré sú prezentované na obrázku 5.21a. Jasnosti boli prepočítané na pozorované toky pomocou parametrov fotometrických filtrov uvedených v tabuľke 4.1. Použitím vzťahu 5.10, sme dostali, že príspevok potenciálneho zdroja flickeringu v symbiotickej dvojhviezde AG Dra je na úrovni: 8% v  $B$ , 5% vo  $V$ , 4% v  $R$  a 3% v  $I$  filtri.

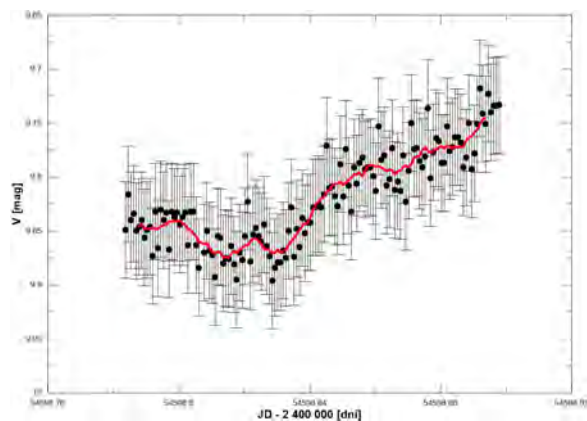
Na druhej strane, v prípade väčšiny ďalších pozorovacích sérií, ktoré boli získané z databázy AAVSO i počas nášho fotometrického pozorovania AG Dra na observatóriu Astronomického ústavu v Ondřejove dňa 4. apríla 2018 (JD 2 458 213, obrázok 5.22) nebola zaznamenaná žiadna výrazná fotometrická variabilita tejto symbiotickej dvojhviezdy. Aj keď počas nocí JD 2 454 343 (obrázok 5.21b) a JD 2 454 598 (obrázok 5.21c) môžeme sledovať isté fotometrické variácie AG Dra, tieto sú v rámci chýb



(a) Filtre  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , pozorovatelia WGR, FJQ, SBL.

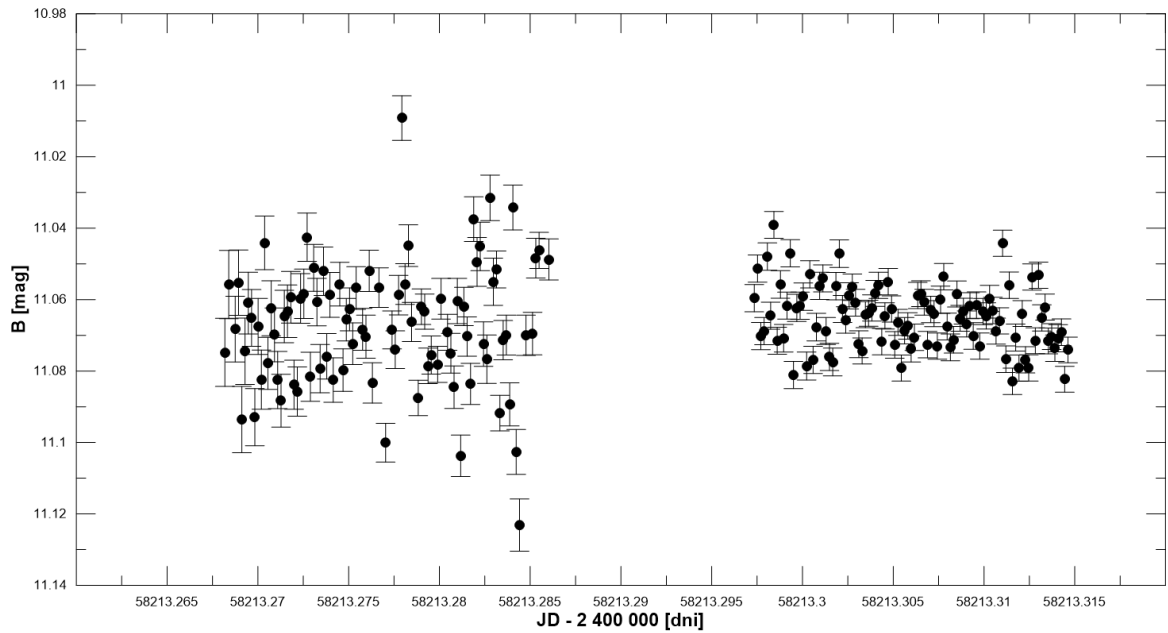


(b) Filter  $V$ , pozorovateľ TRE.



(c) Filter  $V$ , pozorovateľ TRE.

**Obr. 5.21:** Krátkodobé fotometrické variácie AG Dra vo fotometrických filtroch  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , ktoré zaznamenali pozorovatelia AAVSO: FJQ - James Foster, USA; SBL - Bart Staels, Belgicko; TRE - Ray Tomlin, USA; WGR - Gary Walker, USA.



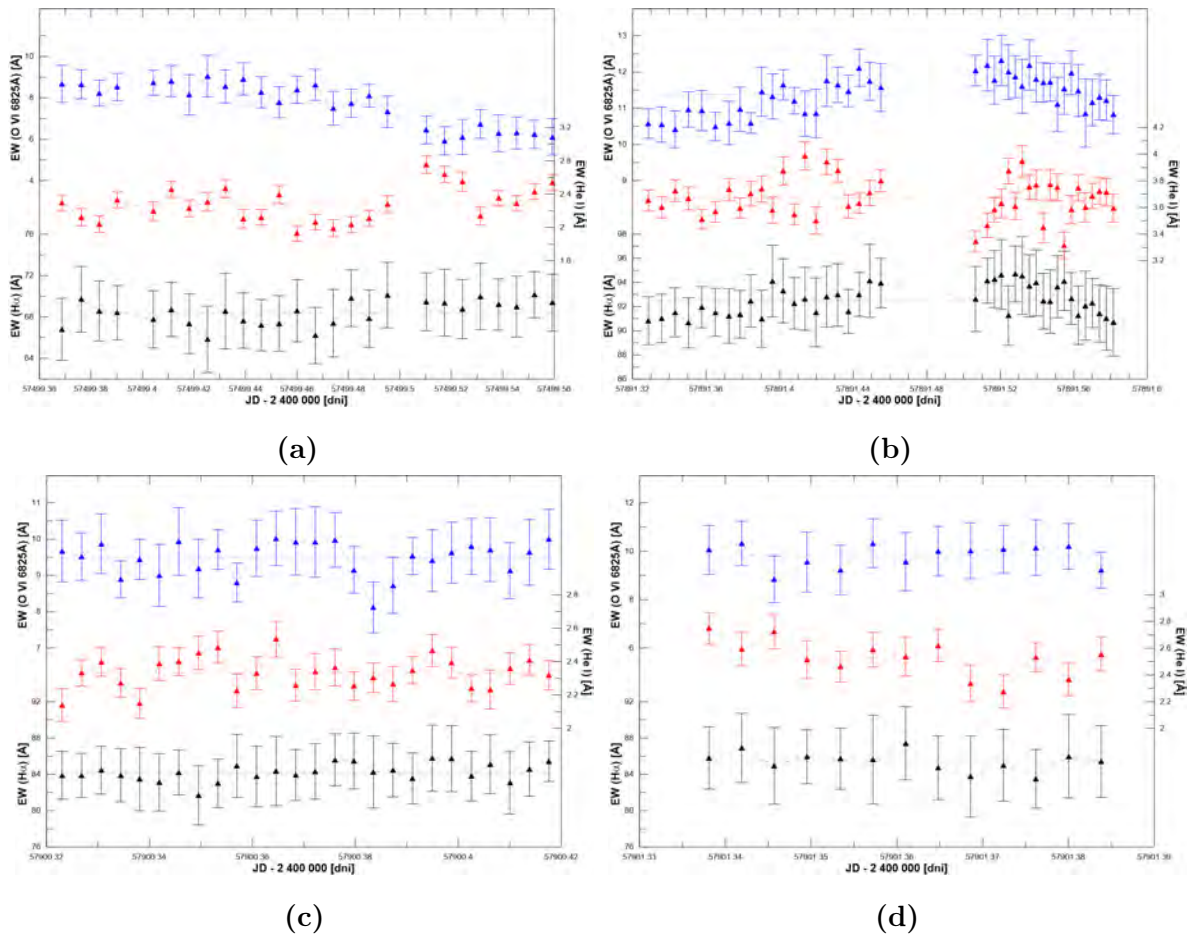
**Obr. 5.22:** Svetelná krivka AG Dra získaná počas noci 4. apríla 2018 (JD 2 458 213), ktorá bola zostrojená na základe našich pozorovaní získaných pomocou 65 cm ďalekohľadu Astronomického ústavu v Ondřejeve.

jednotlivých pozorovaní, a preto nie je možné posúdiť ich reálnosť.

Krátkodobá variabilita ekvivalentných širok niektorých emisných čiar prítomných v optických spektrách symbiotickej sústavy AG Dra bola prezentovaná a diskutovaná na internetovom fóre pozorovateľov ARAS<sup>2</sup>. Tieto spektroskopické pozorovania sme znovu analyzovali, pričom sme sa však zamerali aj na veľkosti chýb určenia ekvivalentných širok podľa metódy, ktorú prezentujeme v kapitole 4.2.1. Z kriviek ekvivalentných širok študovaných emisných čiar (obrázok 5.23) sa na prvý pohľad môže zdať, že skutočne dochádza k zmenám ich hodnôt aj v rámci jednej pozorovacej noci. S prihliadnutím na chyby ekvivalentných širok študovaných emisných čiar však možno konštatovať, že ich hodnoty sú v prípade symbiotickej sústavy AG Dra na časových škálach niekoľkých hodín viac menej konštantné. Reálne zmeny spektroskopických vlastností AG Dra je možno sledovať iba na časových škálach dní až stoviek dní.

Navyše, ak by išlo o reálne zmeny, možno predpokladať, že krivky ekvivalentných širok jednotlivých emisných čiar budú korelované. Z korelačnej analýzy pomocou nášho programu CORRLAB však vyplýva, že korelačné koeficienty medzi krivkami sa pohybujú od -0,70 do 0,74 a to bez nejakej zákonitosti pre konkrétnu pozorovaciu sériu alebo konkrétne spektrálne čiary. Možno konštatovať, že spektrá AG Dra, ktoré

<sup>2</sup><http://www.spectro-aras.com/forum/index.php>



**Obr. 5.23:** Rýchle zmeny ekvivalentných šírok spektrálnych čiar  $H_{\alpha}$  ( $6563 \text{ \AA}$ ), He I ( $6678 \text{ \AA}$ ) a O VI ( $6825 \text{ \AA}$ ). Vodorovnými čiarami sú zobrazené fity konštantnými funkciami.

máme k dispozícii nie sú vhodné na štúdium krátkodobých zmien spektrálnych vlastností tejto symbiotickej dvojhviezdy a pre tento typ výskumu budú potrebné spektrá s vyšším spektrálnym rozlíšením a vyšším pomerom signálu k šumu.

Tieto dva príklady tiež ukazujú, aké je v prípade takýchto štúdií dôležité dôsledne určiť chyby nameraných hodnôt, aby sa za skutočnú variabilitu nepovažovali aj zdanlivé zmeny spôsobené napríklad premenlivými pozorovacími podmienkami alebo použitou pozorovacou technikou. Bohužiaľ, v publikovanej literatúre sa veľmi často zabúda na uvádzanie reálnych chýb získaných pozorovacích veličín.

# Záver

Predložená práca sa zaoberá spektroskopickým výskumom symbiotickej dvojhviezdy AG Draconis. Tento interagujúci systém pravidelne prechádza obdobiami pokoja a aktivity, pozostávajúcimi z niekoľkých individuálnych vzplanutí, ktoré sa prejavujú výraznými zmenami jasnosti i spektroskopických vlastností AG Dra. Nové aktívne obdobie AG Dra začalo po siedmych rokoch pokoja v roku 2015 a rozšírilo tak počet doteraz pozorovaných vzplanutí na 35. Vďaka našej pozorovacej kampani, ktorú sme počas tohto aktívneho obdobia iniciovali, sme mali vôbec po prvýkrát možnosť sledovať túto symbiotickú dvojhviezdu s prakticky jednodňovým časovým rozlíšením. Získaný pozorovací materiál je unikátny a dovolil nám sa zamerať na také prejavy AG Dra, ktoré doteraz nebolo možné študovať. Celkovo sme spracovali 10 329 fotometrických pozorovaní v  $U$ ,  $B$ ,  $V$ ,  $R$  a  $I$  filtroch a 398 nových spektier v optickej oblasti. V práci sme využili aj historický pozorovací materiál z publikovaných prác i 515 predtým spracovaných spektier z Tartu Observatory, vďaka ktorým bolo možné súčasnú aktivitu AG Dra porovnať s predchádzajúcimi aktívnymi obdobiami.

Cieľom tejto diplomovej práce bolo štúdium výrazných emisných čiar v spektrách symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. Tieto spektrálne čiary sa výrazne menia počas vzplanutí. Zmeny sú spôsobené skutočnými fyzikálnymi zmenami v symbiotickej dvojhviezde (napr. zmeny teploty horúcej zložky, rozloženia, hustoty a optických vlastností hmloviny). Tiež však súvisia s rôznou pozorovateľnosťou oblastí hmloviny, kde tieto spektrálne čiary vznikajú a teda tieto variácie majú súvis s orbitálnym pohybom AG Dra. Pre štúdium zmien spôsobených aktivitou je nutné jednotlivé príspevky k pozorovaným zmenám identifikovať a redukovať tie, ktoré súvisia s pohybom sústavy. Základným parametrom orbitálneho pohybu je perióda a ideálnym nástrojom na jej určenie sú krivky radiálnych rýchlostí chladnej zložky AG Dra. V práci sme analyzovali celkovo 197 meraní radiálnych rýchlostí, ktoré pokrývajú časový interval 35 rokov. Naše nové merania tak rozšírili doteraz publikované dáta o viac ako 13 rokov. Na základe periódovej analýzy radiálnych rýchlostí AG Dra sme potvrdili



existenciu dvoch reálnych periód v systéme: 550,8 dňa, ktorá súvisí s orbitálnym pohybom dvojhviezdy a 353,8 dňa, ktorá je pravdepodobne spôsobená pulzáciami obra prítomného v tejto symbiotickej sústave. Z našej analýzy tiež vyplynulo, že excentricita dráhy AG Dra je blízka nule a dráha je minimálne na časovej škále pozorovaní (zodpovedajúcej 23 orbitálnym cyklom) stabilná.

V období pokoja sa fotometrické variácie AG Dra opakujú s orbitálnou periódou. Najvýraznejšie sú v  $U$  filtri a ich amplitúda klesá smerom k dlhším vlnovým dĺžkam. Zamerali sme sa aj na podobné variácie ekvivalentných širok vybraných emisných čiar v spektrách AG Dra. Pre túto analýzu sme zozbierali všetky dostupné spektroskopické pozorovania získané počas pokojných období. Z našej analýzy vyplýva, že ekvivalentné šírky emisných čiar neutrálneho vodíka ( $H_\alpha$  a  $H_\beta$ ) a neutrálneho hélia He I (6678 Å) s nízkym excitačným potenciálom skutočne vykazujú variácie s orbitálnym pohybom AG Dra. Ekvivalentné šírky emisných čiar s vysokým excitačným potenciálom ako He II (4686 Å) alebo Ramanovsky rozptýlená čiara kyslíka O VI (6825 Å) sa s orbitálnym pohybom dvojhviezdy prakticky nemenia. Vzhľadom na to, že ekvivalentná šírka emisnej čiary  $H_\beta$  sa mení s orbitálnym pohybom, s orbitálnou fázou sa mení i pomer ekvivalentných širok He II/ $H_\beta$ , ktorý sme použili na odhad teploty horúcej zložky AG Dra. Z tohto dôvodu sa aj takto určená teplota bieleho trpaslíka zdanlivo mení s orbitálnym pohybom. Pre štúdium skutočných zmien teploty v dôsledku aktivity je nutné tieto efekty odfiltrovať. Variácie spektrálnych čiar sme preto preložili syntetickými krivkami a pre ďalšie odhady teploty používali rektifikované krivky ekvivalentných širok. S orbitálnym pohybom by tiež mohla súvisieť prítomnosť absorpčnej komponenty emisnej čiary  $H_\beta$ . Naša analýza však ukázala, že táto komponenta je prítomná v spektre takmer nezávisle od orbitálneho pohybu a spôsobuje viac menej konštantný pokles ekvivalentnej šírky  $H_\beta$ . Teplota horúcej zložky je takto nadhodnotená o približne 10%. Je nutné podotknúť, že výsledky tejto analýzy môžu byť ovplyvnené aktivitou systému a je možné, že absorpčná komponenta, ktorá je pravdepodobne dôsledkom hviezdneho vetra obra, vykazuje počas pokojných období iné správanie.

V rámci štúdia vývoja teploty horúcej zložky AG Dra sme sa zamerali aj na ďalšie efekty súvisiace s aproximáciami, ktoré boli doteraz vo výpočtoch používané. V originálnej metóde výpočtu teploty ionizujúceho zdroja založenej na vlastnostiach emisných čiar vznikajúcich v symbiotickej hmlovine sa totiž využíva pomer integrálnych tokov v emisných čiarach He II,  $H_\beta$  a He I (4471 Å). Naše spektrá, ktoré sme doteraz používali čiaru He I (4471 Å) nezahŕňali, preto sme zaviedli isté aproximácie: zanedbali sme tok v tejto spektrálnej čiare a za predpokladu, že tok žiarenia v kontinuu je

pre spektrálne čiary He II a  $H_\beta$  rovnaký, používali sme ich ekvivalentné šírky. Nový pozorovací materiál nám umožnil kvantifikovať vplyv týchto aproximácií na získanú hodnotu teploty horúcej zložky AG Dra, ktorého veľkosť je na úrovni priemerne 7%. Po rozlíšení všetkých efektov sme sa zamerali na vývoj teploty AG Dra v období posledných takmer 40 rokov. Obdobie aktivity D a aktuálne obdobie aktivity G bolo analyzované z hľadiska teploty po prvýkrát. Môžeme konštatovať, že hlavné vzplanutia na začiatku aktívnych období sú zvyčajne *chladného* typu. *Horúce* vzplanutia sú sprevádzané nárastom teploty nad úroveň hodnoty typickej pre obdobia pokoja.

Pozorovací materiál získaný a spracovaný v rámci tejto diplomovej práce nám umožnil skúmať i krátkodobé variácie svetelných kriviek a kriviek ekvivalentných širok emisných čiar v spektrách AG Dra. Aj napriek tomu, že medzi pozorovateľmi bola krátkodobá variabilita diskutovaná, musíme konštatovať, že v rámci chýb určenia jednotlivých veličín sú jasnosť systému i ekvivalentné šírky emisných čiar na časovej škále hodín viac menej konštantné a reálne zmeny je možné sledovať iba na časových škálach dní až stoviek dní.

Veľkú časť práce sme venovali aktuálnemu obdobiu aktivity, ktoré začalo v roku 2015. Doposiaľ boli pozorované tri vzplanutia. Naša analýza ukázala, že fotometricky sa vzplanutia radia k vedľajším vzplanutiam AG Dra. Takéto správanie je pomerne nezvyčajné, pretože vzplanutia na začiatku aktívnych období sú väčšinou hlavné a veľmi výrazné. Klasifikáciu týchto vzplanutí ako vedľajších, *horúcich* vzplanutí potvrdila aj analýza spektroskopického materiálu získaného pre AG Dra počas aktuálneho obdobia: počas všetkých troch vzplanutí sme pozorovali nárast teploty horúcej zložky. Počas druhého vzplanutia v sérii sme dokonca zaznamenali historicky najvyššiu teplotu. Na druhej strane, počas tohoto vzplanutia sme pozorovali aj správanie, ktoré sme doposiaľ zaznamenali iba počas hlavného, *chladného* vzplanutia v roku 2006 a to nielen vymiznutie spektrálnej čiary Ramanovsky rozptýlenej spektrálnej čiary kyslíka O VI, ale aj narušenie lineárneho vzťahu medzi jasnosťou systému v *B* filtri a ekvivalentnými šírkami spektrálnych čiar v logaritmickú škále. Je nutné dodať, že na takejto časovej škále sme ešte nemali možnosť AG Dra pozorovať, a preto nie je vylúčené, že i niektoré vzplanutia v minulosti nevykazovali podobné správanie.

Otvorenou otázkou zostáva, ako bude vývoj AG Dra pokračovať v najbližšom období. Je totiž možné, že budeme svedkami ďalšieho vzplanutia v aktuálnej sérii. Bude ďalším vedľajším, *horúcim* vzplanutím AG Dra alebo budeme pozorovať hlavné, *chladné* vzplanutie tohoto symbiotického systému? Rovnako je možné, že systém prejde do obdobia pokoja, tak ako sme to pozorovali v šesťdesiatych rokoch.

Výsledky získané v rámci tejto diplomovej práce boli prezentované na konferenciách a seminároch a publikované v prácach, ktoré sú uvedené nižšie.

## Konferencie

- Astronomía seminarid, Tartu Observatory, Tõravere, Estónsko (Gális, Merc),
- 48. konference o výzkumu proměnných hvězd a exoplanet, Praha, Česká republika (Gális),
- International meeting on variable stars research „Kolos 2016“, Slovensko (Gális),
- 14th INTEGRAL/BART Workshop, Karlovy Vary, Česká republika (Merc),
- Študentská vedecká konferencia PF UPJŠ 2017, Košice, Slovensko (Merc),
- 8. Česko-Slovenská študentská vedecká konferencia vo fyzike, Bratislava, Slovensko (Merc),
- Conference about successes of stellar astronomy „Bezovec 2017“, Slovensko (Gális, Leedjärv, Merc),
- The Golden Age of Cataclysmic Variables and Related Objects IV, Palermo, Taliansko (Merc),
- Seminář Astronomického ústavu UK, Praha, Česká republika (Gális),
- Študentská vedecká konferencia PF UPJŠ 2018, Košice, Slovensko (Merc).

## Publikácie

- Gális, R., Merc, J., Leedjärv, L. (2017). Outburst activity of the symbiotic binary AG Dra. *Open European Journal on Variable Stars*, 180, 24-28. ISSN 1801-5964.
- Merc, J., Gális, R., Leedjärv, L. (2017). Recent outburst activity of the super-soft X-ray binary AG Draconis. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 47, 192-199. ISSN 1336-0337.
- Merc, J., Gális, R., Leedjärv, L. (2018). Recent outburst activity of the symbiotic binary AG Draconis. *Proceedings of Science*, v tlači.

# Referencie

- Allen, D. A. (1984a). A catalogue of symbiotic stars. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 5:369–421.
- Allen, D. A. (1984b). Symbiotic Stars. *Astrophysics and Space Science*, 99:101.
- Ambartsumyan, V. A. (1932). *Pulkovo Obs. Circ.*, 4:8.
- Anderson, C. M., Cassinelli, J. P., a Sanders, W. T. (1981). X-ray detection of the symbiotic star AG Dra. *Astrophysical Journal*, 247:L127–L130.
- Angeloni, R., Di Mille, F., Ferreira Lopes, C. E., a kol. (2012). Discovery of Fast, Large-amplitude Optical Variability of V648 Car . *Astrophysical Journal*, 756.
- Bastian, U. (1998). The symbiotic system AG Dra: an unexpected photometric period. *Astronomy and Astrophysics*, 329:L61–L63.
- Belczyński, K., Mikołajewska, J., Munari, U., a kol. (2000). A catalogue of symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 146:407–435.
- Beliakina, T. S. (1965). *Izvestiya Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii*, 33:226.
- Beliakina, T. S. (1969). *Izvestiya Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii*, 40:39.
- Belyakina, T. S. (1979). About an eclipse in binary system of symbiotic star CI Cyg. *Izvestiya Krymskoj Astrofizicheskoj Observatorii*, 59:133–142.
- Birriel, J. J., Espey, B. R., a Schulte-Ladbeck, R. E. (2000). Contemporaneous Ultraviolet and Optical Observations of Direct and Raman-scattered O VI Lines in Symbiotic Stars. *Astrophysical Journal*, 545:1020–1033.
- Bruch, A. (1992). Flickering in cataclysmic variables. *Astronomy and Astrophysics*, 266:237–265.
- Chiotellis, A., Schure, K. M., a Vink, J. (2012). The imprint of a symbiotic binary progenitor on the properties of Kepler’s supernova remnant. *Astronomy and Astrophysics*, 537.
- Cikała, M., Mikołajewski, M., Osiewała, J., a kol. (2011). The hot and the cool outbursts in the symbiotic system AG Draconis. *ArXiv e-prints*.
- Corbet, R. H. D., Sokoloski, J. L., Mukai, K., a kol. (2008). A Comparison of the

- Variability of the Symbiotic X-Ray Binaries GX 1+4, 4U 1954+31, and 4U 1700+24 from Swift BAT and RXTE ASM Observations. *Astrophysical Journal*, 675.
- de Medeiros, J. R. a Mayor, M. (1999). A catalog of rotational and radial velocities for evolved stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 139:433–460.
- Dilday, B., Howell, D. A., Cenko, S. B., a kol. (2012). PTF 11kx: A Type Ia Supernova with a Symbiotic Nova Progenitor. *Science*, 337:942.
- Dobrzycka, D., Kenyon, S. J., a Milone, A. A. E. (1996). Rapid Light Variations in Symbiotic Binary Stars. *Astronomical Journal*, 111:414.
- Eggen, O. J. (1964). *Royal Greenwich Observatory Bulletin*, 84:111.
- Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., a kol. (2014). Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-Ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-Ray Binary System. *Astrophysical Journal*, 786.
- Eriksson, M., Johansson, S., a Wahlgren, G. M. (2006). The nature of ultraviolet spectra of AG Pegasi and other symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics*, 451:157–175.
- Fekel, F. C., Hinkle, K. H., a Joyce, R. R. (2003). Rotational Velocities of Symbiotic Stars. In *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution*, volume 303, page 113.
- Fekel, F. C., Hinkle, K. H., Joyce, R. R., a kol. (2000). Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars II. *Astronomical Journal*, 120:3255–3264.
- Fitzpatrick, E. L. (2004). Interstellar Extinction in the Milky Way Galaxy. In *Astrophysics of Dust*, volume 309, page 33.
- Formigini, L. a Leibowitz, E. M. (2012). The historical light curve of the symbiotic star AG Draconis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 422:2648–2655.
- Friedjung, M., Gális, R., a Hric, L. a. o. (2003). More on the pulsation period of the cool component in the symbiotic binary AG Dra. *Astronomy and Astrophysics*, 400:595–598.
- Friedjung, M., Hric, L., Petřík, K., a kol. (1998). An analysis of the photometric variation of the symbiotic star AG Draconis in quiescence. *Astronomy and Astrophysics*, 335:545–548.
- Gális, R., Hric, L., Friedjung, M., a kol. (1999). Resonances as the general cause of the outbursts in the symbiotic system AG Draconis. *Astronomy and Astrophysics*, 348:533–541.
- Gális, R., Hric, L., Leedjäv, L., a Merc, J. (2016). Outburst activity of the symbiotic binary AG Dra. *Open European Journal on Variable Stars*, 176:22.

- Gális, R., Merc, J., a Leedjäv, L. (2017). Outburst activity of the symbiotic binary AG Dra. *Open European Journal on Variable Stars*, 180:24.
- Garcia, M. R. (1986). Spectroscopic orbits of symbiotic stars. *Astronomical Journal*, 91:1400–1415.
- Gawryszczak, A. J., Mikołajewska, J., a Różyczka, M. (2002). Morphology of planetary nebulae with binary cores. *Astronomy and Astrophysics*, 385:205–215.
- Gawryszczak, A. J., Mikołajewska, J., a Różyczka, M. (2003). H II regions in symbiotic binaries and their radio emission. *Astronomy and Astrophysics*, 398:159–168.
- Genovali, K. (2010). Studio di AG Draconis sistema simbiotico prototipo. Diplomová práca, Università degli Studi di Pisa, Pisa.
- González-Riestra, R., Viotti, R. F., Iijima, T., a kol. (1999). IUE observations of the high-velocity symbiotic star AG Draconis III. *Astronomy and Astrophysics*, 347:478–493.
- González-Riestra, R., Viotti, R. F., Iijima, T., a kol. (2008). AG Draconis observed with XMM-Newton. *Astronomy and Astrophysics*, 481:725–734.
- Greiner, J., Bickert, K., Luthardt, R., a kol. (1996). Optical, UV and X-ray observations of the symbiotic star AG Draconis during quiescence and the 1994/1995 outburst. *Odessa Astronomical Publications*, 9:26.
- Greiner, J., Bickert, K., Luthardt, R., a kol. (1997). The UV/X-ray emission of the symbiotic star AG Draconis during quiescence and the 1994/1995 outbursts. *Astronomy and Astrophysics*, 322:576–590.
- Gromadzki, M., Mikołajewski, M., Tomov, T., a kol. (2006). Searching for Flickering Variability in Several Symbiotic Stars. *Acta Astronomica*, 56:97–125.
- Harman, R. F. a Seaton, M. J. (1966). The ionization structure of planetary nebulae IV. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 132:15.
- Hatzes, A. P. a Cochran, W. D. (1998). Stellar Oscillations in K Giant Stars. In *Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems*, volume 154, page 311.
- Henry, G. W., Fekel, F. C., Henry, S. M., a kol. (2000). Photometric Variability in a Sample of 187 G and K Giants. *Astrophysical Journal, Supplement*, 130:201–225.
- Hric, L., Gális, R., Leedjäv, L., Burmeister, M., a Kundra, E. (2014). Outburst activity of the symbiotic system AG Dra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443:1103–1112.
- Huang, C. C., Friedjung, M., a Zhou, Z. X. (1994). Spectral classification of symbiotic stars in the near infrared. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 106:413–418.
- Iijima, T. (1981). Temperature determination of exciting stars in highly excited plane-

- tary nebulae and symbiotic stars. In *Photometric and Spectroscopic Binary Systems*, page 517.
- Iijima, T. a Viotti, R. F. (2003). súkromná komunikácia.
- Iijima, T., Vittone, A., a Chochol, D. (1987). Spectroscopic and photometric studies of the symbiotic star AG Dra. *Astronomy and Astrophysics*, 178:203–212.
- Ikedo, Y., Akitaya, H., Matsuda, K., a kol. (2004). Polarized H $\alpha$  Wings in the Symbiotic Stars AG Draconis and Z Andromedae. *Astrophysical Journal*, 604:357–361.
- Janssen, E. M. a Vyssotsky, A. N. (1943). A Peculiar Emission-Line Object. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 55:244.
- Kafatos, M., Meier, S. R., a Martin, I. (1993). Extended Variability of the Symbiotic Star AG Draconis. *Astrophysical Journal, Supplement*, 84:201.
- Kafka, S. (2018). Observations from the AAVSO International Database.
- Kaler, J. B. (1976). The exciting stars of low-excitation planetary and diffuse nebulae. *Astrophysical Journal*, 210:843.
- Kaler, J. B. (1978). The (OIII) line as a quantitative indicator of nebular central-star temperature. *Astrophysical Journal*, 220:887–889.
- Kaler, J. B. (1987). The Light Variations of AG Dra in its Quiet State. *Astronomical Journal*, 94:437.
- Kaler, J. B. a Jacoby, G. H. (1989). Central Star Temperatures of Optically Thick Planetary Nebulae and a Distance-independent Test of Dredge-up Theory. *Astrophysical Journal*, 345:871.
- Kamath, U. S. a Ashok, N. M. (1999). JHK photometry of symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 135:199–202.
- Karpov, S. (2017). súkromná komunikácia.
- Kenyon, S. J. (1986). *The symbiotic stars*.
- Kenyon, S. J. a Fernandez-Castro, T. (1987). The Cool Components of Symbiotic Stars I. *Astronomical Journal*, 93:938.
- Kenyon, S. J. a Webbink, R. F. (1984). The nature of symbiotic stars. *Astrophysical Journal*, 279:252.
- Lambert, D. L. (1985). In *Cool Stars with Excesses of Heavy Elements*, page 103.
- Leedjäv, L. (2002). Some comments on symbiotic stars with jets. In *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, volume 261, page 353.
- Leedjäv, L. a Burmeister, M. (2012). News from AG Draconis. *Baltic Astronomy*, 21:131–138.
- Leedjäv, L., Burmeister, M., Mikołajewski, M., a kol. (2004). Emission lines in the

- spectrum of the symbiotic star AG Draconis from 1997 to 2003. *Astronomy and Astrophysics*, 415:273–282.
- Leedjäv, L., Gális, R., Hric, L., Merc, J., a kol. (2016). Spectroscopic view on the outburst activity of the symbiotic binary AG Draconis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 456:2558–2565.
- Leibowitz, E. M. a Formiggini, L. (1992). The continuum radiation of the symbiotic star AG Draconis in quiescence and during outbursts. *Astronomy and Astrophysics*, 265:605–612.
- Luna, G. J. M. a Sokoloski, J. L. (2007). The Nature of the Hard X-Ray-Emitting Symbiotic Star RT Cru. *Astrophysical Journal*, 671:741–747.
- Luna, G. J. M., Sokoloski, J. L., Mukai, K., a kol. (2013). Symbiotic stars in X-rays. *Astronomy and Astrophysics*, 559.
- Luthardt, R. (1983). Photographische Beobachtungen von AG Draconis und analyse der Lichtkurve. *Zentralinstitut fuer Astrophysik Sternwarte Sonneberg Mitteilungen ueber Veraenderliche Sterne*, 9:129–135.
- Lutz, J. H., Lutz, T. E., Dull, J. D., a kol. (1987). Ultraviolet and Optical Observations of AG Draconis. *Astronomical Journal*, 94:463.
- Mann, A. W. a von Braun, K. (2015). Revised Filter Profiles and Zero Points for Broadband Photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127:102.
- Masetti, N., Landi, R., Pretorius, M. L., a kol. (2007). IGR J16194-2810: a new symbiotic X-ray binary. *Astronomy and Astrophysics*, 470:331–337.
- Meinunger, L. (1979). Discovery of a Period in the Symbiotic Star AG Draconis. *Information Bulletin on Variable Stars*, 1611:1.
- Meng, X. a Han, Z. (2016). The X-ray/radio and UV luminosity expected from symbiotic systems as the progenitor of SNe Ia. *Astronomy and Astrophysics*, 588.
- Merc, J. (2016). Spektroskopická aktivita symbiotickéj dvojhviezdy AG Draconis. Diplomová práca, Univerzita Pavla Jozefa Šafárika, Košice.
- Merc, J., Gális, R., a Leedjäv, L. (2017). Recent outburst activity of the super-soft X-ray binary AG Draconis. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 47:192–199.
- Merc, J. a Gális, R. (2017). Zenodo, DOI:10.5281/zenodo.1069614.
- Merc, J., Gális, R., a Leedjäv, L. (2018). *Proceeding of Science*, v tlači.
- Merrill, P. W. (1944). Spectroscopic Observations of AX Persei, RW Hydrae, CI Cygni, and Z Andromedae. *Astrophysical Journal*, 99:15.



- Mikołajewska, J. (2002). On the resolved radio emission from AG Draconis: evidence for jet ejection? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 335:L33–L35.
- Mikołajewska, J. (2003). Orbital and Stellar Parameters of Symbiotic Stars (invited review talks). In *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution*, volume 303, page 9.
- Mikołajewska, J. (2007). Symbiotic Stars: Continually Embarrassing Binaries. *Baltic Astronomy*, 16:1–9.
- Mikołajewska, J., Kenyon, S. J., Mikołajewska, M., a kol. (1995). Evolution of the Symbiotic Binary System AG Draconis. *Astronomical Journal*, 109:1289.
- Mikulášek, Z. a Zejda, M. (2013). *Úvod do studia proměnných hvězd*.
- Mohamed, S. a Podsiadlowski, P. (2007). Wind Roche-Lobe Overflow: a New Mass-Transfer Mode for Wide Binaries. In *European Workshop on White Dwarfs*, volume 372, page 397.
- Mukai, K. (2017). X-Ray Emissions from Accreting White Dwarfs: A Review. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 129:062001.
- Mukai, K., Luna, G. J. M., Cusumano, G., a kol. (2016). SU Lynx, a hard X-ray bright M giant: clues point to a large hidden population of symbiotic stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461:L1–L5.
- Munari, U. a Righetti, G. L. (2016). After the aborted 2015 attempt, the supersoft X-ray symbiotic star AG Dra is finally entering a bright outburst. *The Astronomer's Telegram*, 8975:1.
- Munari, U., Righetti, G. L., Sollecchia, U., a kol. (2015). The symbiotic binary and super-soft X-ray source AG Dra is going into outburst. *The Astronomer's Telegram*, 7582:1.
- Munari, U., Righetti, G. L., Valisa, P., a kol. (2017). AG Dra is going into outburst again, of the hot type and the third in the present series. *The Astronomer's Telegram*, 10390:1.
- Munari, U., Siviero, A., Ochner, P., a kol. (2009). The 2006-2008 Outburst of AG Draconis. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121:1070.
- Munari, U., Yudin, B. F., Taranova, O. G., a kol. (1992). UVRI-JHKL photometric catalogue of symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 93:383–390.
- Murset, U. a Nussbaumer, H. (1994). Temperatures and luminosities of symbiotic novae. *Astronomy and Astrophysics*, 282:586–604.
- Nelson, T., Mukai, K., Orio, M., a kol. (2011). X-Ray and Ultraviolet Emission from the Recurrent Nova RS Ophiuchi in Quiescence: Signatures of Accretion and Shocked Gas. *Astrophysical Journal*, 737.

- Nussbaumer, H., Schild, H., Schmid, H. M., a kol. (1988). Relative C, N, O abundances in red giants, planetary nebulae, novae and symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics*, 198:179–186.
- Nussbaumer, H. a Vogel, M. (1987). A new approach to symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics*, 182:51–62.
- Ogley, R. N., Chaty, S., Crocker, M., a kol. (2002). A search for radio emission from Galactic supersoft X-ray sources. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 330:772–777.
- Paltani, S. (2004). Searching for periods in X-ray observations using Kuiper’s test. Application to the ROSAT PSPC archive. *Astronomy and Astrophysics*, 420:789–797.
- Patat, F., Chandra, P., Chevalier, R., a kol. (2007). Detection of Circumstellar Material in a Normal Type Ia Supernova. *Science*, 317:924.
- Percy, J. R. (2007). *Understanding Variable Stars*.
- Ramsay, G., Sokoloski, J. L., Luna, G. J. M., a kol. (2016). Swift observations of the 2015 outburst of AG Peg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461:3599–3606.
- Robinson, L. (1969). *Peremennyje zvezdy*, 16:597.
- Roman, N. G. (1953). The Spectrum of BD+67-922. *Astrophysical Journal*, 117:467.
- Schlafly, E. F. a Finkbeiner, D. P. (2011). Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD. *Astrophysical Journal*, 737.
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., a Davis, M. (1998). Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *Astrophysical Journal*, 500:525–553.
- Schmid, H. M. (1989). Identification of the emission bands at  $\lambda\lambda$  6830, 7088. *Astronomy and Astrophysics*, 211:L31–L34.
- Schmid, H. M. a Nussbaumer, H. (1993). On the relative C,N,O abundances and the evolutionary status of yellow symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics*, 268:159–177.
- Schmid, H. M. a Schild, H. (1997). Spectropolarimetry of symbiotic stars: AG Draconis. *Astronomy and Astrophysics*, 321:791–802.
- Seaquist, E. R., Krogulec, M., a Taylor, A. R. (1993). A Highly Sensitive Radio Survey of Symbiotic Stars at 3.6 Centimeters. *Astrophysical Journal*, 410:260.
- Seaquist, E. R. a Taylor, A. R. (1990). The Collective Radio Properties of Symbiotic Stars. *Astrophysical Journal*, 349:313.

- Sekeráš, M. a Skopal, A. (2012). Electron optical depths and temperatures of symbiotic nebulae from Thomson scattering. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427:979–987.
- Sharov, A. S. (1954). New Variable Star BD+67-922. *Peremennye Zvezdy*, 10:55.
- Shenavrin, V. I., Taranova, O. G., a Nadzhip, A. E. (2011). Search for and study of hot circumstellar dust envelopes. *Astronomy Reports*, 55:31–81.
- Shore, S. N., Wahlgren, G. M., Genovali, K., a kol. (2010). The spectroscopic evolution of the symbiotic star AG Draconis I. *Astronomy and Astrophysics*, 510.
- Sion, E. M., Moreno, J., Godon, P., a kol. (2012). On the Nature of the Hot Component in the Symbiotic, Supersoft X-Ray Binary AG Draconis. *Astronomical Journal*, 144.
- Skopal, A. (2001). What mimics the reflection effect in symbiotic binaries? *Astronomy and Astrophysics*, 366:157–165.
- Skopal, A. (2005). Disentangling the composite continuum of symbiotic binaries. I. S-type systems. *Astronomy and Astrophysics*, 440:995–1031.
- Skopal, A. (2006). The LC of Classical Symbiotic Stars. *Journal of the AAVSO*, 35:163–167.
- Skopal, A. (2008). How to Understand the LC of Symbiotic Stars. *Journal of the AAVSO*, 36:9.
- Skopal, A. (2012). Multiwavelength SED as a Tool in Understanding Outbursts of Symbiotic Binaries. *Baltic Astronomy*, 21:97–104.
- Skopal, A., Pribulla, T., Vaňko, M., a kol. (2004). Photometry of symbiotic stars XI. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 34:45–69.
- Skopal, A., Sekeráš, M., González-Riestra, R., a kol. (2009). The origin of the supersoft X-ray-optical/UV flux anticorrelation in the symbiotic binary AG Draconis. *Astronomy and Astrophysics*, 507:1531–1539.
- Skopal, A., Shugarov, S., Vaňko, M., a kol. (2012). Recent photometry of symbiotic stars. *Astronomische Nachrichten*, 333:242.
- Skopal, A., Shugarov, S. Y., Sekeráš, M., a kol. (2017). New outburst of the symbiotic nova AG Pegasi after 165 yr. *Astronomy and Astrophysics*, 604.
- Skopal, A., Vanko, M., Pribulla, T., a kol. (2002). Photometry of symbiotic stars X. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 32:62–78.
- Skopal, A., Vaňko, M., Pribulla, T., a kol. (2007). Recent photometry of symbiotic stars. *Astronomische Nachrichten*, 328:909–916.
- Smith, V. V., Cunha, K., Jorissen, A., a kol. (1996). Abundances in the symbiotic star AG Draconis: the barium-symbiotic connection. *Astronomy and Astrophysics*,

- 315:179–193.
- Sokoloski, J. L. (2003). Rapid Variability as a Diagnostic of Accretion and Nuclear Burning in Symbiotic Stars and Supersoft X-Ray Sources. In *Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution*, volume 303, page 202.
- Sokoloski, J. L., Bildsten, L., a Ho, W. C. G. (2001). A search for rapid photometric variability in symbiotic binaries. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 326:553–577.
- Sokoloski, J. L., Kenyon, S. J., Espey, B. R., a kol. (2006a). A “Combination Nova” Outburst in Z Andromedae. *Astrophysical Journal*, 636:1002–1019.
- Sokoloski, J. L., Lawrence, S., Crotts, A. P. S., a kol. (2017). Flows and Shocks: Some Recent Developments in Symbiotic Star and Nova Research. *ArXiv e-prints*.
- Sokoloski, J. L., Luna, G. J. M., Mukai, K., a kol. (2006b). An X-ray-emitting blast wave from the recurrent nova RS Ophiuchi. *Nature*, 442:276–278.
- Stoehr, F., White, R., Smith, M., a kol. (2008). DER\_SNR: A Simple & General Spectroscopic Signal-to-Noise Measurement Algorithm. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems*, volume 394, page 505.
- Stoy, R. H. (1933). The Temperatures of the Nuclei of Planetary Nebulæ. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 93:588.
- Stoyanov, K. A., Martí, J., Zamanov, R., a kol. (2018). Optical flickering of the symbiotic star CH Cyg. *Bulgarian Astronomical Journal*, 28:42.
- Taranova, O. G. (2000). Infrared Photometry for Variable Stars of Selected Types in 1978-1999. *Astronomy Letters*, 26:404–412.
- Tomov, N. A. a Tomova, M. T. (1997). H $\alpha$  Observations of AG Dra during Quiescence and the 1994 Outburst. In *Physical Processes in Symbiotic Binaries and Related Systems*, page 185.
- Tomov, N. A. a Tomova, M. T. (2000). UBV Observations of AG Dra in the End of the Latest Active Phase and After It. *Information Bulletin on Variable Stars*, 4953:1.
- Tomov, N. A. a Tomova, M. T. (2002). Hydrogen and helium emission of the symbiotic binary AG Draconis during an active phase (1996-1997). *Astronomy and Astrophysics*, 388:202–212.
- Tomov, N. A., Tomova, M. T., a Bisikalo, D. V. (2013). Symbiotic stars with similar line profiles during activity. In *Space Plasma Physics*, volume 1551, pages 30–45.
- Tomov, N. A., Tomova, M. T., a Ivanova, A. (2000). Analysis of the U-band orbital variation of the symbiotic binary AG Dra during quiescence. *Astronomy and*

- Astrophysics*, 364:557–562.
- Torbett, M. V. a Campbell, B. (1987). Radio Emission from the Nova-like Variable AC Cancri and the Symbiotic Variable AG Draconis. *Astrophysical Journal*, 318:L29.
- Viotti, R. F., Altamore, A., Baratta, G. B., a kol. (1984). IUE observations of the high-velocity symbiotic star AG Draconis II. *Astrophysical Journal*, 283:226–231.
- Viotti, R. F., Friedjung, M., González-Riestra, R., a kol. (2007). The Non-Standard Multifrequency Behavior of AG Dra. *Baltic Astronomy*, 16:20–22.
- Viotti, R. F., Giommi, P., Friedjung, M., a kol. (1995). The 1985-86 Episodes of AG Draconis. In *Cataclysmic Variables*, volume 205, page 195.
- Viotti, R. F., Rossi, C., a Muratorio, G. (1998). Optical and near-IR observations of variable stars with AURELIE. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 128:447–455.
- Vollmann, K. a Eversberg, T. (2006). Remarks on statistical errors in equivalent widths. *Astronomische Nachrichten*, 327:862.
- Vrašťák, M. (2017). súkromná komunikácia.
- Wilson, R. E. (1943). The Spectrum of BD+67-922. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 55:282.
- Wilson, R. E. (1945). The Spectrum of BD+67-922. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 57:309.
- Young, P. R., Dupree, A. K., Espey, B. R., a kol. (2005). Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer Observations of the Symbiotic Star AG Draconis. *Astrophysical Journal*, 618:891–907.
- Young, P. R., Dupree, A. K., Espey, B. R., a kol. (2006). High-Ionization Forbidden Lines in the UV Spectrum of AG Draconis. *Astrophysical Journal*, 650:1091–1095.
- Zamanov, R. K., Bode, M. F., Melo, a kol. (2007). Rotational velocities of the giants in symbiotic stars II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 380:1053–1063.
- Zamanov, R. K., Boeva, S., Nikolov, Y. M., a kol. (2017). Discovery of optical flickering from the symbiotic star EF Aql. *Astronomische Nachrichten*, 338:680–685.
- Zanstra, H. (1931). Untersuchungen über planetarische Nebel. Erster Teil: Der Leuchtprozeß planetarischer Nebel und die Temperatur der Zentralsterne. Mit 4 Abbildungen. *Zeitschrift fuer Astrophysik*, 2:1.
- Zhu, Z. X., Friedjung, M., Zhao, G., a kol. (1999). Spectral and luminosity classification for the cool components in symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics, Supplement*, 140:69–78.

# Dodatok A

## Pozorovací materiál

### A.1 Fotometrické merania

**Tab. A.1:** Spracované fotometrické pozorovania symbiotickej dvojhviezdy AG Dra v  $U$ ,  $B$  a  $V$  filtroch. V tabuľke je uvedený juliánsky dátum pozorovania, orbitálna fáza, magnitúdy v  $U$ ,  $B$  a  $V$  filtroch, farebné indexy  $U - B$ ,  $B - V$  a zdroj dát. Uvádzame iba prvých 13 riadkov tabuľky, ostatné merania sú dostupné online.

JD 24..	Fáza	U	B	V	U-B	B-V	Zdroj
57153.735	0.60	-	11.02	9.71	-	1.31	AAVSO
57154.736	0.60	-	11.01	9.71	-	1.30	AAVSO
57161.742	0.62	-	10.98	9.68	-	1.30	AAVSO
57162.729	0.62	-	10.94	9.68	-	1.27	AAVSO
57163.758	0.62	-	10.89	9.64	-	1.25	AAVSO
57164.877	0.62	-	10.82	9.59	-	1.23	AAVSO
57165.706	0.62	-	10.68	9.54	-	1.14	AAVSO
57166.776	0.63	-	10.75	9.58	-	1.17	AAVSO
57167.750	0.63	-	10.88	9.63	-	1.25	AAVSO
57168.681	0.63	-	10.91	9.64	-	1.26	AAVSO
57169.679	0.63	-	10.90	9.64	-	1.25	AAVSO
57170.773	0.63	-	10.85	9.63	-	1.22	AAVSO
57171.736	0.63	-	10.95	9.66	-	1.28	AAVSO

...

Tabuľka je dostupná v online podobe na webovej adrese: [goo.gl/2GZm2r](http://goo.gl/2GZm2r).

## A.2 Spektroskopické merania

**Tab. A.2:** Spracované spektroskopické pozorovania symbiotickej dvojhviezdy AG Dra. V tabuľke je uvedený juliánsky dátum pozorovania, orbitálna fáza, ekvivalentné šírky študovaných emisných čiar v Å a zdroj dát. Uvádzame iba 13 riadkov tabuľky zo začiatku aktívneho obdobia G, ostatné merania sú dostupné online.

JD 24..	Fáza	He II	H <sub>β</sub>	H <sub>α</sub>	He I	O VI	Zdroj
57154.370	0.60	-	-	71.56	-	-	ARAS
57160.845	0.62	-	-	82.94	3.64	8.53	Ondřejov
57168.088	0.63	-	-	74.03	-	-	ARAS
57172.409	0.64	-	-	78.21	-	-	ARAS
57175.970	0.64	-	-	84.09	3.23	8.08	Ondřejov
57176.354	0.64	-	-	75.55	3.39	7.58	ARAS
57176.715	0.64	-	-	77.32	3.50	7.53	ARAS
57177.407	0.65	22.41	36.28	88.55	3.64	7.96	ARAS
57178.402	0.65	-	-	88.37	4.05	-	ARAS
57178.866	0.65	-	-	86.30	3.29	7.85	Ondřejov
57178.961	0.65	-	-	86.65	3.09	7.37	Ondřejov
57179.488	0.65	-	-	75.37	-	7.20	ARAS
57179.838	0.65	-	-	78.94	2.43	6.31	Ondřejov

...

Tabuľka je dostupná v online podobe na webovej adrese: [goo.gl/2GZm2r](http://goo.gl/2GZm2r).

# Dodatok B

## Ionizačná energia atómov a iónov

Tab. B.1: Ionizačná energia atómov a iónov [eV].

Z	Prvok	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	H	13,60							
2	He	24,59	54,42						
6	C	11,26	24,38	47,89	64,49	392,09	489,99		
7	N	14,53	29,60	47,45	77,47	97,89	552,07	667,05	
8	O	13,62	35,12	54,94	77,41	113,90	138,12	739,33	871,41
10	Ne	21,56	40,96	63,42	97,19	126,25	157,93	207,27	239,10
11	Na	5,14	47,29	71,62	98,94	138,40	172,23	208,50	264,19
12	Mg	7,65	15,04	80,14	109,27	141,33	186,76	225,02	265,92
13	Al	5,99	18,83	28,45	119,99	153,83	190,49	241,76	284,64
14	Si	8,15	16,35	33,49	45,14	166,77	205,27	246,32	303,66
16	S	10,36	23,34	34,86	47,22	72,59	88,05	280,95	328,79
17	Cl	12,97	23,81	39,80	53,24	67,68	96,94	114,20	348,31
18	Ar	15,76	27,63	40,74	59,58	74,84	91,29	124,41	143,46
20	Ca	6,11	11,87	50,91	67,27	84,34	108,78	127,21	147,24
26	Fe	7,90	16,20	30,65	54,91	75,00	98,99	124,98	151,06

Zdroj dát: Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J. a tím NIST ASD, 2015, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.3), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Databáza je dostupná na adrese: <http://physics.nist.gov/asd>



## Dodatok C

# Softvérové prostredia CORRLAB, RADIFIT a EMISPECT

V rámci diplomovej práce využívame tri vlastné softvérové prostredia s užívateľsky príjemným prostredím zamerané na spracovanie nielen astrofyzikálnych dát. Tieto programy sú pripravené v prostredí MATLAB a sú k dispozícii ako miniaplikácie pre toto prostredie (pre používateľov, ktorí vlastnia licenciu MATLAB) alebo ako samostatné aplikácie (je potrebné si nainštalovať MATLAB RUNTIME, ktorý je k dispozícii bezplatne).

Všetky softvérové prostredia sú k dispozícii v anglickom jazyku, pre ich širšie uplatnenie v astronomickej komunite. Sú však dostatočne intuitívne, aby ich mohol ovládať aj užívateľ so znalosťou anglického jazyka na nižšej úrovni.

### C.1 CORRLAB

CORRLAB (v1.0.0; Merc a Gális, 2017) je softvérové prostredie určené na korelačnú a periódovú analýzu. V súčasnej verzii umožňuje použiť tri rôzne metódy korelačnej analýzy (klasickú, diskretnú a self-korelačnú) a užívateľovi poskytuje viacero užitočných možností a nastavení. Implementované metódy sú vhodné ako na výskum závislostí medzi dvoma, poprípade viacerými dátovými súbormi, tak aj na hľadanie periodicít v dátach.



Obr. C.24: Logá softvérov CORRLAB a RADIFIT.



Obr. C.25: Uživatelské prostredie programu CORRLAB.

## Funkcie

Najdôležitejšie funkcie programu CORRLAB sú nasledujúce:

- možnosť korelačnej aj periódovej analýzy v rámci jedného programového prostredia,
- možnosť nastaviť a aj počas analýzy meniť korelačnú metódu, ako aj ďalšie nastavenia (maximálnu hodnotu hľadanej periódy alebo časový posun, rozlíšenie a metódu interpolácie atď.),
- možnosť vybrať určitý úsek dátového súboru, zmeniť tento úsek alebo sa vrátiť k pôvodnému súboru,
- pre vyhľadane periódy alebo časové posuny možnosť zobraziť ich v korelograme, zobrazť originálne a posunuté dáta v jednom grafe, ako aj zobrazť fázový diagram,
- možnosť zvoliť si ľubovoľnú vlastnú periódu alebo časový posun a zobrazť výsledky ako v prípade nájdených periód a časových posunov.

## Uživatelské rozhranie

Uživatelské prostredie programu CORRLAB je rozdelené na štyri základné časti (obrázok C.25): panel parametrov analýzy (*Analysis Settings*), panel dátových súborov (*Dataset* alebo *Dataset 1*, *Dataset 2*), panel výsledkov (*Results*) a ovládací panel.

Čo sa týka nastavení je panel parametrov analýzy najdôležitejšou časťou softvérového prostredia. Pomocou tohto panelu sa vyberá typ a metóda analýzy a nastavujú sa aj ďalšie dôležité parametre. Po nastavení základných parametrov sa do programu načítajú dátové súbory. V paneli dátových súborov je tiež možné vybrať si časť dátového súboru pre analýzu.

V prípade periódovej analýzy je zobrazené iba jedno okno pre načítanie súboru, v prípade korelačnej sú okná dve, pre každý porovnávaný súbor jedno. Vzhľad panelu výsledkov vyzera rôzne v závislosti na type analýzy. Na spustenie analýzy, uloženie výsledkov a grafov a reštartovanie softvéru slúži ovládací panel. Ten obsahuje aj okno s výpisom prevedených úkonov.

## C.2 RADIFIT

Softvér RADIFIT (v1.0.0) je užívateľsky príjemné programové prostredie, pomocou ktorého je možné určiť radiálne rýchlosti objektov na základe merania polôh veľkého množstva (desiatky až stovky) absorpčných čiar prítomných v jeho spektre. Softvér pracuje automaticky: po načítaní spektra, zoznamu meraných spektrálnych čiar a určení polohy tzv. pilotnej čiary (spektrálna čiara, ktorú vie užívateľ v spektre identifikovať a pozná laboratórnu vlnovú dĺžku jej polohy), softvér identifikuje všetky ostatné spektrálne čiary zo zoznamu. Výsledkom je hodnota radiálnej rýchlosti objektu, na výpočet ktorej sa využívajú polohy všetkých meraných absorpčných čiar. Poloha spektrálnych čiar sa určuje rôznymi metódami, ktoré sú bližšie popísané v kapitole 4.4.1. V prípade prekladania Gaussovým, Lorentzovým a Voightovým profilom sa na výpočet využívajú len spektrálne čiary vhodné pre proces prekladania.

### Funkcie

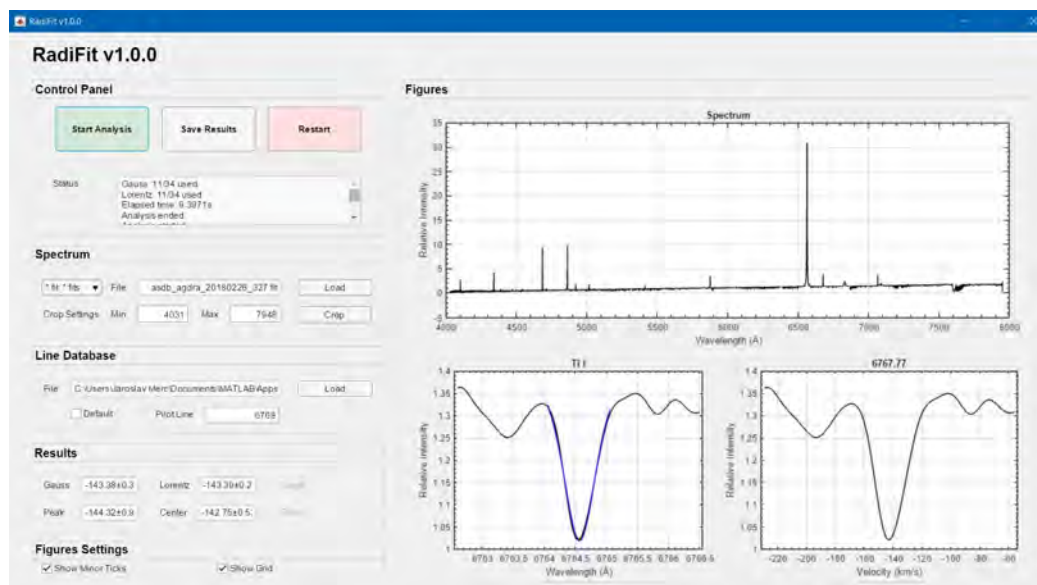
Hlavné funkcie softvéru RADIFIT sú nasledujúce:

- určenie radiálnych rýchlostí objektov meraním polôh absorpčných čiar v ich spektrách (vo formáte \*.fit, \*.fits a \*.dat) na základe užívateľom definovaného zoznamu spektrálnych čiar,
- automatické vyhľadanie a určenie polohy absorpčných čiar na základe tzv. pilotnej spektrálnej čiary,
- meranie polohy absorpčných čiar využitím štyroch principiálne odlišných metód,
- výpočet chyby určenia radiálnej rýchlosti.

### Užívateľské rozhranie

Užívateľské prostredie programu je rozdelené do štyroch častí (obrázok C.26): ovládací panel (*Control Panel*), panel pre prácu so spektrom (*Spectrum*) a zoznamom meraných spektrálnych čiar (*Line Database*), grafický panel (*Figures, Figures Settings*) a panel výsledkov *Results*.

Prvým krokom je načítanie súboru so spektrom objektu pomocou panelu pre prácu so spektrom. Je možné nahrať súbor vo formátoch: \*.fit, \*.fits a \*.dat. V tomto paneli je možné



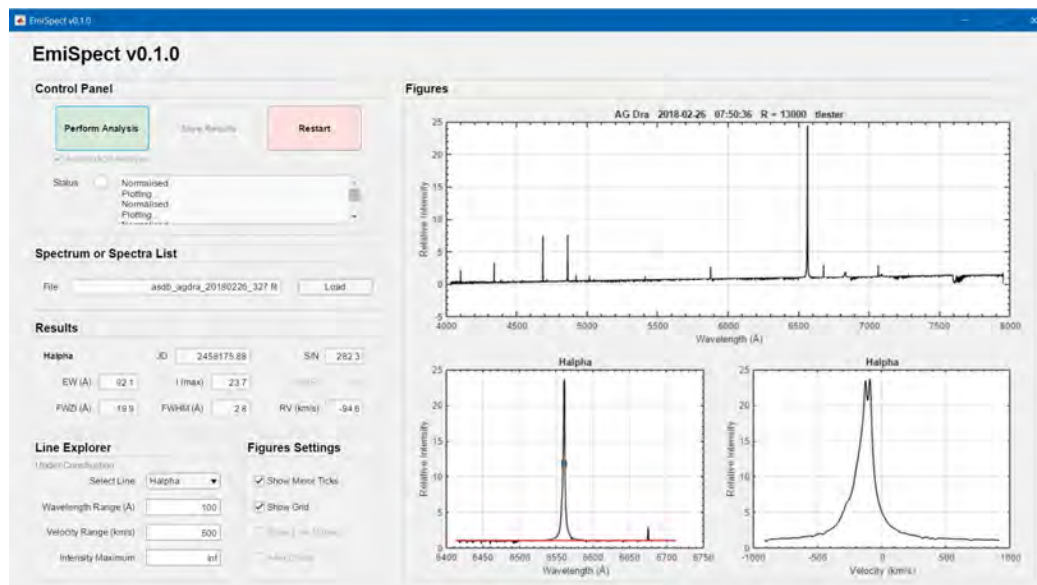
Obr. C.26: Uživatelské prostredie programu RADIFIT.

ďalej nastaviť hranice vlnových dĺžok, ktoré sa majú zobrazit' v grafe. Túto možnosť nie je nutné použiť v prípade, že zoznam spektrálnych čiar obsahuje aj čiary, ktoré nie sú v analyzovanom spektre, pretože program ich automaticky vynechá. Druhým krokom je načítanie zoznamu spektrálnych čiar a nastavenie laboratórnej vlnovej dĺžky pilotnej čiary.

Po nastavení týchto dôležitých parametrov je možné spustiť analýzu pomocou ovládacieho panelu. Po spustení sa zobrazí okno s časťou spektra, v ktorom užívateľ kliknutím vyberie tú spektrálnu čiaru, ktorá odpovedá vlnovej dĺžke pilotnej čiary. Polohu čiar zo zoznamu potom softvér určí automaticky a výsledky zobrazí po skončení analýzy v paneli výsledkov. Počas behu programu je možné sledovať prebiehajúce úkony v okne na ovládacom paneli, pomocou ktorého je možné aj uložiť výsledky po skončení analýzy.

### C.3 EMISPECT

Na analýzu vlastností emisných spektier existuje viacero softvérových nástrojov. Detailná analýza zvyčajne vyžaduje veľké množstvo času a ustavičnú interakciu užívateľa. Niekedy je však nutná rýchla analýza väčšieho množstva spektier, ktoré obsahujú mnoho emisných čiar. Program EMISPECT (v0.1.0; počiatočné vývojové vydanie) je určený na rýchlu a automatickú analýzu jednotlivých spektier a časových sérií spektier s emisnými čiarami. V prezentovanej diplomovej práci bol EMISPECT doplnkovým nástrojom na určenie vedľajších parametrov emisných spektrálnych čiar, napríklad pomeru S/N.



Obr. C.27: Uživatelské prostredie programu EMISPECT.

## Funkcie

Najdôležitejšie funkcie programu EMISPECT sú nasledujúce:

- automatické určenie parametrov emisných čiar (ekvivalentné šírky, intenzity, šírky spektrálnych čiar, radiálne rýchlosti, pomery signálu ku šumu),
- možnosť analyzovať jedno spektrum alebo celú sériu spektier,
- možnosť definovať si zoznam emisných čiar pre analýzu,
- prehliadanie profilov spektrálnych čiar.

## Uživatelské rozhranie

Uživatelské rozhranie programu EMISPECT (obrázok C.27) vo veľkej miere vychádza z rozhrania softvéru RADIFIT. Navyše sa tu však nachádza nástroj na prehliadanie profilov vybraných spektrálnych čiar (bez merania ich parametrov). Ovládací panel a grafický panel sú zhodné. Podobne užívateľ volí i spektrum a zoznam emisných čiar pre analýzu. Uživatelské prostredie EMISPECT obsahuje tiež panel výsledkov, kde sa postupne objavujú výsledky pre aktuálne meranú spektrálnu čiaru. Analýza všetkých čiar v spektre môže prebiehať úplne automaticky alebo, ak si užívateľ túto možnosť nezvolí, v poloautomatickom režime. V takomto prípade prejde program na analýzu ďalšej spektrálnej čiary až po kliknutí na príslušné tlačítko. Na záver je možné všetky merania uložiť.