

MASARYKOVA UNIVERZITA  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
**Proměnnost ultrafialového spektra dvojhvězdy**  
**Cygnus X-1**

Caiyun Xia

Vedoucí bakalářské práce: prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

Brno 2015

# Bibliografický záznam

<b>Autor:</b>	Caiyun Xia Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
<b>Název práce:</b>	Proměnnost ultrafialového spektra dvojhvězdy Cygnus X-1
<b>Studijní program:</b>	Fyzika
<b>Studijní obor:</b>	Astrofyzika
<b>Vedoucí práce:</b>	prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.
<b>Akademický rok:</b>	2014/2015
<b>Počet stran:</b>	viii+45
<b>Klíčová slova:</b>	rentgenové dvojhvězdy, černé díry, horké hvězdy, Cygnus X-1

# Bibliografický záznam

**Autor:** Caiyun Xia  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita  
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Názov práce:** Premennosť ultrafialového spektra  
dvojhviezdy Cygnus X-1

**Študijný program:** Fyzika

**Študijný obor:** Astrofyzika

**Vedúci práce:** prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

**Akademický rok:** 2014/2015

**Počet strán:** viii+45

**Kľúčové slová:** röntgenové dvojhviezdy, čierne diery,  
horúce hviezdy, Cygnus X-1

# Bibliografic Entry

**Author:** Caiyun Xia  
Faculty of Science, Masaryk University  
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

**Title of Thesis:** The variability of ultraviolet spectrum  
of Cygnus X-1 binary

**Degree Programme:** Physics

**Field of Study:** Astrophysics

**Supervisor:** prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

**Academic Year:** 2014/2015

**Number of Pages:** viii+45

**Keywords:** X-ray binaries, black holes, hot stars, Cygnus X-1

## Pod'akovanie

Na tomto mieste by som sa chcel poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce prof. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph.D. za odborné rady, čas venovaný oprave mojej práce, za pomoc a ochotu pri riešení problémov a navedenie k tej správnej ceste. Ďalej by som sa chcel poďakovať všetkým tým, ktorí si moju bakalársku prácu prečítali a pomohli mi s gramatickou a štylistickou úpravou práce.

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu napísal samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov. Súhlasím so zapožičiavaním práce a jej zverejňovaním.

V Brne dňa 21.05.2015

Caiyun Xia

## **Abstrakt:**

V předložené práci studujeme proměnnost ultrafialového spektra rentgenového záření dvojhvězdy Cygnus X-1 v závislosti na fázi oběhu optické složky. V prvních kapitolách teoretické části je stručně popsáno dělení rentgenových dvojhvězd a základní údaje o dvojhvězdě Cygnus X-1. Dále je uveden přehled družic, které pozorovaly nebo stále pozorují v ultrafialové oblasti. Popisujeme hvězdný vítr, hvězdný vývoj a je také vysvětleno, jak se z původně mladé horké hvězdy stane černá díra. Praktická část je věnovaná zpracování spekter získaných z archivu družice IUE, ze kterých byly sestaveny jednotlivé grafy závislosti toku v spektrálních čarách na fázi oběhu.

Klíčová slova: rentgenové dvojhvězdy, černé díry, horké hvězdy, Cygnus X-1

## **Abstrakt:**

V predloženej práci študujeme premennosť ultrafialového spektra röntgenovej dvojhviezdy Cygnus X-1 v závislosti na fáze obehu optickej zložky. V prvých kapitolách teoretickej časti je stručne popísané delenie röntgenových dvojhviezd a základné údaje o dvojhviezde Cygnus X-1. Ďalej je uvedený prehľad družíc, ktoré pozorovali alebo ešte stále pozorujú v ultrafialovej oblasti, popísaný hviezdny vietor, hviezdny vývoj a je vysvetlené, ako sa zo spočiatku mladej horúcej hviezdy stane čierna diera. Praktická časť je venovaná spracovaniu získaných spektier z archívu družice IUE, z ktorých boli zostrojené jednotlivé grafy závislosti toku v spektrálnych čiarach na fáze obehu.

Kľúčové slová: röntgenové dvojhviezdy, čierne diery, horúce hviezdy, Cygnus X-1

## **Abstract:**

In the presented thesis we study the variability of ultraviolet spectrum of Cygnus X-1 binary depending on the orbital phase of the optical companion. In the first chapters of theoretical part we give a brief information about X-ray binaries and a basic information about the Cygnus X-1 binary. We also describe satellites which observed or still observe in ultraviolet range of spectrum and we finally describe a stellar wind and a stellar evolution that transforms young hot star to

black hole. The practical part is devoted to spectra processing from the archive IUE satellite. From spectra we made graphs depending on the orbital phase.

Keywords: X-ray binaries, black holes, hot stars, Cygnus X-1



MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2014/2015

**Ústav:** Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

**Student:** Caiyun Xia

**Program:** Fyzika

**Obor:** Astrofyzika

Ředitel *Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky* PŘF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s tématem:

**Téma práce:** Proměnnost ultrafialového spektra dvojhvězdy Cygnus X-1

**Téma práce anglicky:** The variability of ultraviolet spectrum of Cygnus X-1 binary

### Oficiální zadání:

Dvojhvězda Cygnus X-1 se skládá z horké hmotné složky a černé díry. Část hmoty, kterou horká složka dvojhvězdy ztrácí, se akreje na černou díru a září v rentgenovém oboru. Cílem práce je studium ultrafialového spektra horké složky získaného družicí IUE a hledání její fázové proměnnosti. Budou identifikovány spektrální čáry a studována jejich proměnnost. Bude spočten celkový ultrafialový tok v jednotlivých fázích. Předpokladem pro úspěšné vypracování práce je znalost základů programování.

### Literatura:

- Mikulášek, Z., Krtička, J.: Fyzika horkých hvězd, MU, 2007
- Pravdo, S. H. a kol, 1980, *Astrophysical Journal*, 237, L71
- Treves, A. a kol, 1980, *Astrophysical Journal*, 242, 1114

**Jazyk závěrečné práce:** slovenština

**Vedoucí práce:** prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.

**Datum zadání práce:** 23. 10. 2014

**V Brně dne:** 10. 12. 2014

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):

Caiyun Xia  
student

prof. Mgr. Jiří Krtička, Ph.D.  
vedoucí práce

prof. Rikard von Unge, Ph.D.  
ředitel Ústavu teoretické fyziky a  
astrofyziky



# Obsah

Úvod	11
<b>1 Röntgenové dvojhviezdy</b>	<b>12</b>
1.1 Klasifikácia: . . . . .	13
1.1.1 LMXB . . . . .	13
1.1.2 HMXB . . . . .	14
<b>2 Družice pozorujúce v UV oblasti</b>	<b>19</b>
2.1 IUE (International Ultraviolet Explorer) . . . . .	19
2.2 Ďalšie družice pozorujúce v ultrafialovej oblasti . . . . .	20
2.2.1 HST (Hubble Space Telescope) . . . . .	20
2.2.2 EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer) . . . . .	21
2.2.3 GALEX (Galaxy Evolution Explorer) . . . . .	21
<b>3 Hviezdny vietor</b>	<b>22</b>
<b>4 Vývoj hviezd</b>	<b>24</b>
4.1 Vývoj hmotných hviezd . . . . .	24
<b>5 Čierna diera</b>	<b>26</b>
5.1 Ideálne čierne diery . . . . .	27
5.2 Všeobecné čierne diery . . . . .	28
5.3 Detekcia čierných dier . . . . .	28
<b>6 Horúce hviezdy</b>	<b>30</b>
6.1 Horúce hviezdy v ultrafialovej oblasti . . . . .	31

<b>7</b>	<b>Praktická časť</b>	<b>33</b>
7.1	SPLAT-VO (A VO-enabled Spectral Analysis Tool) . . . . .	33
7.2	Spracovanie dát . . . . .	34
7.2.1	Si II ( $\lambda_{\text{Si II, max}} \approx 1261.05 \text{ \AA}$ ) . . . . .	37
7.2.2	Si II ( $\lambda_{\text{Si II, min}} = 1259.43 \text{ \AA}$ ) . . . . .	38
7.2.3	O I ( $\lambda_{\text{O I, max}} \approx 1306.31 \text{ \AA}$ ) . . . . .	39
7.2.4	O I ( $\lambda_{\text{O I, min}} \approx 1305.32 \text{ \AA}$ ) . . . . .	40
7.2.5	C II ( $\lambda_{\text{C II, max}} \approx 1333.99 \text{ \AA}$ ) . . . . .	41
7.2.6	C II ( $\lambda_{\text{C II, min}} \approx 1334.63 \text{ \AA}$ ) . . . . .	42
7.2.7	Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1395.15 \text{ \AA}$ ) . . . . .	43
7.2.8	Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1394.05 \text{ \AA}$ ) . . . . .	44
7.2.9	Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1404.43 \text{ \AA}$ ) . . . . .	45
7.2.10	Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1402.09 \text{ \AA}$ ) . . . . .	46
7.2.11	C IV ( $\lambda_{\text{C IV, max}} \approx 1549.43 \text{ \AA}$ ) . . . . .	47
7.2.12	C IV ( $\lambda_{\text{C IV, min}} \approx 1547.70 \text{ \AA}$ ) . . . . .	48
7.3	Diskusia . . . . .	49
	<b>Záver</b>	<b>50</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>51</b>
	Elektronické zdroje . . . . .	53

# Úvod

Ľudstvo sa už od nepamäti pozeralo smerom k oblohe, aby odhalilo záhadné úkazy, ktoré sa na nej odohravajú. Temná obloha posiatá hviezdami je naozaj úchvatná. Ľudia svojimi skúsenosťami a vedomosťami postupne odhalili pomernú časť týchto záhad. Zistili tiež, že tak ako človek, ani hviezda nechce žiť osamotene. Viac ako 70 % hviezd v slnečnom okolí je gravitačne viazaných v dvojhviezdnych alebo viacnásobných hviezdnych systémoch. Hviezdy v dvojiciach obiehajú okolo seba po eliptických dráhach, v ktorých spoločnom ohnisku sa nachádza ťažisko sústavy. V súčasnosti poznáme rôzne typy dvojhviezd, medzi ktoré patria aj röntgenové dvojhviezdy.

# Kapitola 1

## Röntgenové dvojhviezdy

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [1]–[3], [5], [14] a [e11].

Už samotný názov röntgenové dvojhviezdy napovedá, že sú to dvojhviezdne systémy emitujúce veľké množstvo röntgenového žiarenia. Medzi prvé objavené röntgenové dvojhviezdy patria Sco X-1 a Cyg X-1, v súhvezdi Škorpión a Labuť. Vo všeobecnom pojme môžeme definovať röntgenové dvojhviezdy ako systémy tvorené z kompaktného objektu a z optickej zložky, ktoré obiehajú po eliptických dráhach okolo spoločného ťažiska. Sú to tesné dvojhviezdy, u ktorých dochádza k prenosu látky z optickej zložky na kompaktnú. Optická zložka je chápaná tak, že v jej jadre stále prebiehajú termojadrové reakcie. V hmotných röntgenových dvojhviezdach (HMXB) je hmotnejšia hviezda označovaná ako primárna, zatiaľ čo menej hmotná je označovaná ako sekundárna. V menej hmotných systémoch (LMXB) je ako primárna zložka označovaná neutrónová hviezda a ako sekundárna je označovaná hviezda neskoršieho spektrálneho typu. Väčšia hviezda v systéme sa tiež označuje ako optická zložka alebo darca a kompaktná zložka, príjemca alebo akreujúca hviezda je označenie pre hviezdu s väčšou hustotou. Existuje niekoľko klasifikácií röntgenových dvojhviezd v závislosti na spektrálnom type kompaktnej zložky alebo na fyzikálnych vlastnostiach optickej zložky.

Delíme ich na:

- systémy s čiernou dierou,
- neutrónové röntgenové dvojhviezdy,
- systémy s bielim trpaslíkom, ktoré sú najčastejšie kataklyzmickými premennými.

## 1.1 Klasifikácia:

Neutrónové röntgenové dvojhviezdy sa delia na hmotné röntgenové dvojhviezdy (HMXB – high mass X-ray binary) a menej hmotné röntgenové dvojhviezdy (LMXB – low mass X-ray binary) v závislosti na spektrálnom type donora.

### 1.1.1 LMXB

LMXB majú malú hmotnosť primárnej zložky, ktorá je väčšia ako sekundárna. Je to označenie pre röntgenovú dvojhviezdu, kde jedna zo zložiek je buď čiernou dierou, alebo neutrónovou hviezdou. Ďalšia zložka, donor, zvyčajne vyplňuje svoj Rochelov lalok, a preto dochádza k prenosu hmoty na kompaktnú zložku. Donor je menej hmotná hviezda, ktorá môže byť hviezdou hlavnej postupnosti alebo červeným obrom. Typická LMXB emituje predovšetkým žiarenie v röntgenovom obore, len necelé jedno percento jeho žiarivého toku je vyžarované vo vizuálnej oblasti.

LMXB sú najjasnejšími objektmi na oblohe v röntgenovom obore, avšak na druhej strane sú pomerne slabé vo viditeľnej oblasti, keďže ich vizuálna hviezdna veľkosť je 15 až 20 magnitúd. Najjasnejším miestom v systéme je akréčný disk okolo kompaktnej zložky. Ich obežná perióda sa líši v rozmedzí desiatky minút až do stovky dní. Najpravdepodobnejším vysvetlením vzniku LMXB je, že osamotený kompaktný objekt pri interakcii s hviezdokopou zachytil nejakú zložku tejto hviezdokopy.

Prenos hmoty na kompaktnú zložku je pomalší ako v prípade HMXB. Tento prenos môže roztočiť neutrónovú hviezdu, ktorá sa môže stať milisekundovým pulzarom s periódou rádovo tisícín sekúnd. LMXB môže vyžarovať röntgenové žiarenie pri výbuchoch alebo zákrytoch a môžu sa vyskytovať vo väčšom počte, ako ich vidíme, ale sú momentálne neaktívne. Majú tiež mäkkšie spektrum (emitujú röntgenové žiarenie s prevážne nižšou energiou), zatiaľ čo HMXB majú tvrdšie spektrum (energetickejšie röntgenové žiarenie). V röntgenových dvojhviezdach, kde je kompaktnou zložkou neutrónová hviezda, si neutrónová hviezda na povrchu buduje materiál prichádzajúci z obra. Prípadne je na povrchu neutrónovej hviezdy dostatok materiálu na spaľovanie ako v jadre hviezdy, čo zapríčiňuje najväčší viditeľný termojadrový záblesk.

V súčasnosti je v Galaxii detekovaných približne 100 LMXB, pričom 13 z nich bolo objavených u guľových hviezdokopách. Nové dáta z družice Chandra X-ray Observatory odhalili ďalšie LMXB v mnohých vzdialených galaxiách.

### 1.1.2 HMXB

HMXB sú tvorené z raných hviezd spektrálneho typu O a B. Podľa spektrálnych tried môžeme HMXB rozdeliť na röntgenové dvojhviezdy typu Be (BeXB), kde optickou zložkou je najčastejšie trpaslík, podobor alebo obor spektrálneho typu Be (luminozitné triedy III–V) a na nadobrie röntgenové dvojhviezdy (SGXB), pokiaľ sú tvorené hviezdami luminozitnej triedy I–II.

HMXB patria medzi najjasnejšie objekty na nočnej oblohe v röntgenovom obore, keďže sú silným zdrojom röntgenového žiarenia. Vysokoenergetické žiarenie je výsledkom akrécie hmoty z optickej zložky na neutrónovú hviezdu. Akrecia znamená zhromaždenie alebo znovuzmiestnenie hmoty na povrchu objektu pod vplyvom jeho gravitačného pôsobenia. Ak je akréčnym objektom neutrónová hviezda alebo čierna diera, je hmota dopadajúca na objekt urýchľovaná na veľkú rýchlosť. Hmota je z vysokej rýchlosti brzdená v momente, keď sa dostane do blízkosti neutrónovej hviezdy. Kinetická energia voľného pádu dopadajúcej hmoty sa premieňa na teplo, ktoré predstavuje zdroj röntgenového žiarenia.

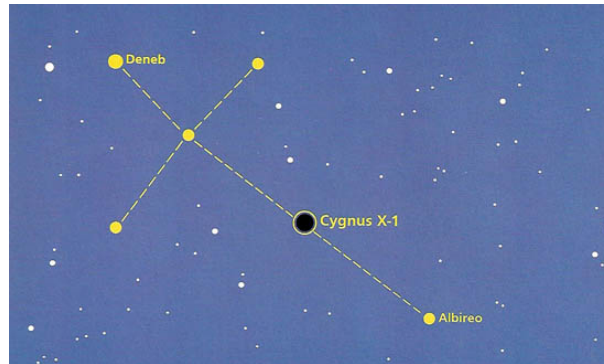
Hmotnejšia hviezda v HMXB vyžaruje pomernú časť svojho žiarenia v ultrafialovej oblasti, zatiaľ čo u kompaktného objektu to je v röntgenovom obore. Hmotné hviezdy sú veľmi svietivé, a preto ľahko detekovateľné. Jednou z najznámejších HMXB je röntgenová dvojhviezda Cygnus X-1 (Cyg X-1), ktorá bola prvým identifikovateľným kandidátom na čiernu dieru. Ako röntgenová dvojhviezda bola objavená v roku 1964 (Bowyer a kol. 1965) a je od nás vzdialená 2.5 kpc (Gies & Bolton 1986) s periódou obehu zložiek 5.6 dní. Dvojhviezda Cyg X-1 je tvorená nadobrom spektrálneho typu O9.7 Iab a kompaktnou neviditeľnou zložkou. Nadobor v systéme má katalógové označenie HDE 226 868 a takmer vyplňuje svoj Rochelov lalok.

Z meraní bolo zistené, že neviditeľná zložka je v skutočnosti čiernou dierou (Dolan & Tapia 1989), ktorá má hmotnosť  $m = 14.81 \pm 0.98 M_{\odot}$ , pričom hmotnosť optickej zložky je  $M = 19.16 \pm 1.90 M_{\odot}$  (Orosz a kol. 2011). Efektívna teplota optickej zložky je  $T_{\text{ef}} = 32\,000$  K a jej polomer je  $R = 17 R_{\odot}$  (Herrero a kol. 1995).

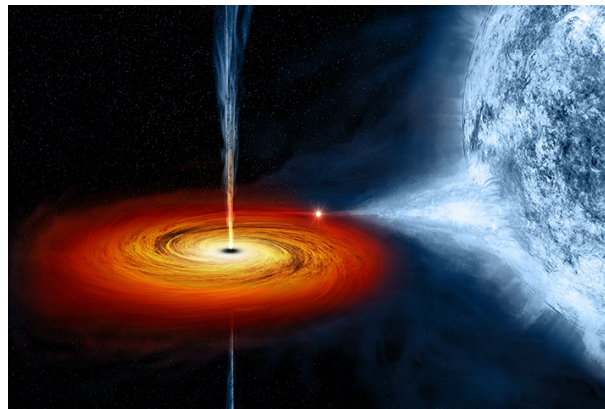
Röntgenové žiarenie dvojhviezdy Cyg X-1 vykazuje veľkú premenlivosť v časovej škále od milisekúnd do niekoľkých rokov. Väčšinou sa žiarenie v röntgenovom obore delí do jedného z dvoch stavov – nižší a vyšší stav (Liang & Nolan 1984). Ukazuje sa, že dvojhviezda Cyg X-1 strávi väčšinou svojho času ( $> 80\%$ ) v nižšom stave, kde svetelný tok v mäkkej röntgenovej oblasti (2–20 keV) je nižší ako vo vyššom stave. Z pozorovania (Phlips a kol. 1995) sa ukazuje, že premennosť neprebíha medzi diskretnými stavmi, ale skôr prebieha pozdĺž kontinua

možných hodnôt žiarivého toku.

Röntgenové žiarenie Cyg X-1 je spôsobené hlavne silným hviezdnyim vetrom prichádzajúci z optickej zložky, ktorý sa akreuje na kompaktnú zložku (Peterson 1978). Ďalšou časovo premennou veličinou Cyg X-1 sú poklesy intenzít röntgenového žiarenia, ktoré sa prednostne vyskytujú v blízkosti hornej konjunkcie a trvanie poklesu sa mení v rozmedzí niekoľkých minút až do niekoľkých hodín.



Obr. 1.1: Poloha dvojhviezdy Cygnus X-1 spomedzi najjasnejších hviezd súhvezdia Labuť. Zdroj: [e1].



Obr. 1.2: Umelecká predstava dvojhviezdneho systému Cyg X-1, kde sa hmota prichádzajúca z nadobra akreuje na čiernu dieru. Zdroj: [e2].

### 1.1.2.1 SGXB

Röntgenové dvojhviezdy typu SGXB môžeme rozdeliť na systémy s nízkym röntgenovým žiarivým výkonom ( $L_x < 10^{27}$  J/s) (Karino 2014), v ktorých látka pochádza z akrecie vetra a na systémy s vysokým röntgenovým žiarivým výkonom, v ktorých látka pochádza z akrecie disku. Optická zložka v SGXB stráca podstatnú časť svojej hmoty prostredníctvom hviezdneho vetra ( $10^{-8}$  až  $10^{-6}$   $M_\odot$ /rok) s konečnou rýchlosťou až 2 000 km/s. Relatívne blízka neutrónová hviezda zachytí časť tohoto vetra dostatočný na to, aby sa z nej mohla stať jasný röntgenový zdroj. Pokiaľ nastáva prenos hmoty cez Rochelov lalok, potom je emisia v röntgenovom obore prudko zvýšená a okolo neutrónovej hviezdy sa formuluje akrečný disk.

V súčasnosti je známych len niekoľko SGXB s akrečným diskom, napríklad Cen X-3, SMC X-1 a LMC X-4. Na druhej strane sú však známe desiatky SGXB dvojhviezd emitujúcich röntgenové žiarenie v dôsledku akrecie vetru. SGXB boli prvými detekovanými röntgenovými dvojhviezdami z dôvodu ich jasnosti a neustálej emisie v röntgenovom obore. Spočiatku sa myslelo, že SGXB reprezentujú dominujúcu populáciu HMXB, zatiaľ čo BeXB boli považované za netypické prípady. Preto sú za klasické alebo štandardné röntgenové dvojhviezdy považované práve SGXB.

### 1.1.2.2 BeXB

V röntgenových dvojhviezdach typu BeXB je optickou zložkou hviezda spektrálneho typu Be, rýchlo rotujúca hviezda spektrálneho typu B a luminozitetnej triedy III–V. Značenie *e* znamená, že hviezda môže mať v istom štádiu vývoja emisné spektrálne čiary (Slettebak 1988). BeXB majú dlhú obežnú periódu a podľa definície nie sú systémom s nadobrom. Preto hviezda typu Be nevyplňuje svoj Rochelov lalok.

Najlepšie študovanými čiarami v BeXB sú čiary vodíku (Balmerova a Paschenova séria), ale u hviezd typu Be môžeme tiež študovať emisné čiary He a Fe. Vykazujú tiež žiarenie v infračervenej oblasti, ktoré je väčšie ako sa očakáva od kontinua hviezd rovnakého spektrálneho typu B. Tento druh emisie vo veľmi dlhých vlnových dĺžkach je známy ako infračervený prebytok.

K prenosu hmoty v sústave z Rochelovho laloka môže dôjsť v dobe, kedy optická zložka prechádza periastrom veľmi excentrickej dráhy alebo počas obrovského röntgenového výbuchu, kedy je akreovaná veľká časť fragmentov hviezdneho disku Be hviezdy. Veľké množstvo hmoty je urýchľované na kompaktnú zložku. Kinetická energia prichádzajúcej hmoty sa premieňa na žiarivý výkon



röntgenového žiarenia.

Veľkú časť röntgenových dvojhviezd typu BeXB tvoria zákrytové systémy so stredne excentrickými dráhami ( $e \geq 0.3$ ). Skupina dvojhviezd BeXB s málo premenným tokom sa od zákrytových dvojhviezd BeXB líši tým, že má omnoho menšiu premennosť röntgenového žiarenia (neboli detekované veľké výbuchy), menšiu svietivosť ( $L_x \leq 10^{28}$  J/s), obsahuje pomaly rotujúcu neutrónovú hviezdu ( $P_{\text{rot}} > 200$  s) a nachádza sa v systémoch s väčšou obežnou periódou ( $P_{\text{ob}} > 200$  d).

Ak neutrónová hviezda (jej magnetosféra) rotuje rýchlejšie ako rovnovážna perióda, potom je hmota vyvrhovaná preč z jej magnetosféry. Rovnovážna perióda je perióda rotácie hviezdy, kedy  $R_A = R_{\text{co}}$ , pričom  $R_A$  je Alfvénov polomer a  $R_{\text{co}}$  je polomer spolurotácie. Alfvénov polomer  $R_A$  je vzdialenosť od neutrónovej hviezdy, kedy hustota kinetickej energie dopadajúcej hmoty ( $0.5\rho v^2$ ) je rovná hustote energie magnetického poľa ( $0.5\mu B^2$ ), kde  $\mu$  je permeabilita vákuua a  $B$  je indukcia magnetického poľa. Polomer spolurotácie  $R_{\text{co}}$  je vzdialenosť, kde Keplerova rýchlosť hmoty rotujúca okolo neutrónovej hviezdy je rovná rýchlosti rotácie magnetosféry  $\omega R$ , kde  $\omega = 2\pi/P_{\text{rot}}$  je uhlová rýchlosť rotácie magnetosféry a  $R$  je polomer magnetosféry.

Rovnovážna perióda závisí hlavne na hmotnostnom toku (akrécnom pomere), pretože to určuje veľkosť magnetosféry, ktorá, podľa predpokladu, rotuje spolu s neutrónovou hviezdou. Podľa hierarchie závisí akrécny pomer na oddelení zložiek dvojhviezdneho systému, a preto závisí aj na obežnej periódě. Ak je polomer spolurotácie menší alebo rovný ako je Alfvénov polomer ( $R_{\text{co}} \leq R_A$ ), hmota na hranici magnetosféry nemôže dopadnúť na povrch neutrónovej hviezdy. Hmota v tomto prípade môže síce prejsť cez magnetosféru, ale čoskoro začne rotovať rýchlejšie ako Keplerova rýchlosť, čo spôsobuje, že hmota je znovu vyvrhovaná mimo magnetosféru. Hmota môže dopadnúť na povrch neutrónovej hviezdy iba v prípade, že polomer spolurotácie je väčší ako Alfvénov polomer ( $R_{\text{co}} > R_A$ ). To má za následok prenášania momentu hybnosti na neutrónovú hviezdu, čoho dôsledkom je zvýšenie jej rotačnej rýchlosti (zníženie rotačnej periódy).

Kompaktným objektom vo všetkých potvrdených dvojhviezdach typu BeXB je neutrónová hviezda. V skutočnosti je neutrónová hviezda často označovaná ako definujúca vlastnosť dvojhviezd BeXB. Bežne sa môžeme v literatúre dočítať, že dvojhviezda typu BeXB je tvorená z neutrónovej hviezdy a z hviezdy spektrálneho typu Be. V skutočnosti sa ukazuje, že nepoznáme jednoznačný mechanizmus, ktorý by zabránil vzniku hviezd spektrálneho typu Be s čiernou dierou alebo bielym trpaslíkom. V žiadnej známej dvojhviezde typu BeXB v našej Galaxii sa prekvapivo nenachádza čierna diera, zatiaľ čo výklad dvojhviezdy  $\gamma$  Cas ako systém tvorený hviezdou spektrálneho typu Be s bielym trpaslíkom

zostáva stále sporným (Harmanec a kol. 2000).

Viacero známych modelov simulujúcich vznik neutrónovej hviezdy zahŕňa zmenu momentu hybnosti v čase kolapsu jadra. Tieto modely predpokladajú, že počiatočná rýchlosť neutrónových hviezd pri vzniku je 100–200 km/s. Je teda nepravdepodobné, že pri takej rýchlosti by excentricita pozostatkov supernov bola menšia ako 0.2. Preto sa vôbec nečakalo, že niekedy objavíme dvojhviezdy typu BeXB s malou excentricitou a dlhou obežnou periódou.

V súčasnosti existuje skupina s iba piatimi dvojhviezdami typu BeXB (X Per, GS 0834–430, KS 1947+300, XTE J1543–568 a 2S 1553–5421) charakterizovaná obežnou periódou  $P_{\text{ob}} \geq 30$  d a veľmi nízkou excentricitou ( $e \leq 0.2$ ). Ich nízka excentricita vyžaduje, aby neutrónová hviezda mala menšiu počiatočnú rýchlosť pri jej vzniku, ako sa predtým predpokladalo pomocou súčasných vývojových modelov (Pfahl a kol. 2002). Dôvod zriedkavého výskytu týchto systémov môže byť tiež spôsobený náročnosťou ich detekcie. Výsledky skúmania populácie od Podsiadlowski a kol. (2003) tvrdia, že dvojhviezdne čierne diery vznikli najpravdepodobnejšie v systémoch s krátkymi obežnými periódami ( $P_{\text{ob}} \leq 30$  d). Prudký nárast v počte detekovaných BeXB nastal až po vypustení družice INTEGRAL v roku 2002, zatiaľ čo počet SGXB sa stabilizoval.

## Kapitola 2

# Družice pozorujúce v UV oblasti

### 2.1 IUE (International Ultraviolet Explorer)

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [e3]–[e9].

Družica IUE bola vypustená 26. januára 1978. Pôvodný plán bol, aby družica IUE slúžila počas doby piatich rokov, aj keď jej očakávaná životnosť bola 3 roky. V skutočnosti však družica IUE mnohonásobne prekročila naše očakávanie, keďže bola v nepretržitej prevádzke takmer 19 rokov, až do 30. septembra 1996. Bol to medzinárodný projekt, kde spolupracovali NASA, ESA a SERC (United Kingdom's Science and Engineering Research Council, v súčasnosti PPARC (Particle Physics and Astronomy Research Council)).

NASA zabezpečila vypustenie družice, technickú podporu a software, ESA zabezpečila solárne panely a satelitné riadiace stanice mimo Madridu a PPARC zabezpečil kamery Vidicon. Pozorovací čas bol rozdelený medzi dve riadiace stanice. NASA riadila 16 hodín denne z Goddard Space Flight Centre a ďalších 8 hodín z VILSPA (Villafranca Satellite Tracking Station).

Vďaka geosynchrónnej obežnej doby IUE ju bolo možné riadiť v reálnom čase. Dva spektrografy na palube družice pokrývali ultrafialové vlnové dĺžky v rozmedzí 1100–3350 Å. Pozorovania z družice IUE zahŕňajú rôzne typy objektov vo vesmíre, od planét, hviezd, až po galaxie. Jedna zo silných stránok IUE bola schopnosť rýchlo reagovať na príležitostné objekty, akými sú napríklad kométy, novy alebo supernovy. Jediné dostupné ultrafialové údaje o výbuchu supernovy SN 1987A vo Veľkom Magelanovom mračne pochádzajú práve od IUE. Stopovaním jadra rýchlej kométy IRAS-Araki-Alcock umožnilo IUE prvýkrát detekovať molekulárnu síru na kométe. Astronómovia štúdovali viacero vlnových dĺžok,

aby zistili viac o objektoch z vesmíru. Súčasné získavanie údajov je nevyhnutné, aby sme získali čo najväčšie množstvo informácií o určitých javoch na oblohe. Preto družica IUE často spolupracovala nielen s ostatnými ďalekohľadmi z celého sveta, ale aj s vesmírnymi ďalekohľadmi a družicami (HST, ROSAT, Compton Gamma Ray Observatory, sonda Voyager, ASTRO-1 a ASTRO-2, EUVE, japonský satelit ASCA a ďalšie).

## 2.2 Ďalšie družice pozorujúce v ultrafialovej oblasti

### 2.2.1 HST (Hubble Space Telescope)

Hubblov vesmírny ďalekohľad (HST), vypustený v roku 1990, je v súčasnosti najdôležitejším a najslávnejším vesmírnym ďalekohľadom určený pre astronomické pozorovanie, hlavne vo viditeľnej a ultrafialovej oblasti spektra. Jeho plánovaná životnosť bola 15 rokov, avšak v skutočnosti vieme, že túto hranicu už dávno prekročil a NASA ho plánuje prevádzkovať minimálne do roku 2020. HST obieha okolo Zeme, čo znamená, že sa nachádza mimo zemskej atmosféry. Hlavnou výhodou jeho polohy mimo zemskej atmosféry je, že dokáže vyhotoviť ostrejšie snímky slabých objektov ako ktorýkoľvek iný ďalekohľad umiestnený na zemskom povrchu. Je to jedna z najúspešnejších a najdlhšie trvajúcich vedeckých misií, ktorá nám mimo iného pomohla určiť vek vesmíru, identifikovať kvazary a odhaliť existenciu temnej energie.

Nesmiernu slávu získal hlavne tým, že slúži tiež ako nástroj pre širokú astronomickú komunitu, čo znamená, že každý astronóm na svete môže podať žiadosť o jeho pozorovací čas. V prípade, že je daný astronóm vybraný, má rok času na to, aby svoje pozorovanie spracoval. Potom sa dáta zverejnia pre širokú vedeckú komunitu. Vďaka tejto politike odhalili astronómovia z celého sveta množstvo objavov.

HST zmenil spôsob, akým sa astronómovia pozerali na vesmír. Pomáha im pochopiť ako galaxie vznikajú, pretože astronómom ukázal galaxie v rôznych štádiách vývoja, vrátane novovzniknutých galaxií, keď bol vesmír ešte pomerne mladý. Objavil protoplanetárny disk, zhluk plynu a prachu okolo mladej hviezdy slúžiaci ako miesto vzniku pre nové planéty. Ďalej zistil, že záblesky gama žiarenia vznikajú vo vzdialených galaxiách, kde kolabujú hmotné hviezdy. Toto všetko je však len hŕstkou toho, čím už počas svojej misie stihol prispieť k rozvoju astronómie.

### 2.2.2 EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer)

Družica EUVE bola vypustená 7. júna 1992. Jej hlavnou úlohou bolo zmapovať oblohu a spraviť podrobný výzkum miesta okolo ekliptiky v oblasti extrémneho ultrafialového žiarenia (EUV) s vlnovou dĺžkou 70–760 Å. Ďalej mala za úlohu študovať fyzikálne vlastnosti zdrojov EUV a spektroskopicky sledovať vybrané nebeské objekty. Bola prvou družicou pozorujúcou v ultrafialovej oblasti s krátkou vlnovou dĺžkou. V roku 2000 sa NASA z viacerých dôvodov rozhodla, že ukončí misiu tejto družice. Dňa 31. januára 2001 bola prevedená do bezpečnostného módu a ukončila svoje vedecké pozorovanie. Počas necelých 9 rokov stihla naozaj veľa. Umožnila nám lepšie pochopiť extrémne ultrafialové spektrum a dokončila katalóg celej hviezdnej oblohy zahŕňajúci 801 EUV objektov. Ďalej nám poskytla prvú extrémnu ultrafialovú detekciu viac ako 30 extragalaktických (za hranicou našej Galaxie) objektov. Objavila nové delenie hmotných bielych trpaslíkov a prvýkrát detekovala hélium v atmosfére planéty Mars.

### 2.2.3 GALEX (Galaxy Evolution Explorer)

Hlavnou úlohou družice GALEX, vypustenej 28. apríla 2003, bolo štúdium pôvodu a vývoja galaxií do vzdialenosti približne 10 miliárd svetelných rokov (červený posuv  $z = 2$ ) a taktiež mapovanie pozadia ultrafialového žiarenia. Družica GALEX získala niekoľko prvenstiev v oblasti prehliadky hviezdnej oblohy. Napríklad, ako prvá pozorovala celú extragalaktickú hviezdnu oblohu v ultrafialovej oblasti.

Počas jej misie sa zostavila prvá kompletná mapa vesmíru vznikajúcich galaxií, ktorá nám umožní lepšie pochopiť ako vznikli galaxie podobné našej Galaxie. Ďalej identifikovala nebeské objekty, ktoré poslúžia ako podklad pre ďalšie štúdiu terajších alebo budúcich misií. Astronómovia na základe štúdia pozorovaných dát z družice GALEX zistili základné informácie o štruktúre nášho vesmíru a taktiež im umožňuje pochopiť, ako sa galaxie menia a vyvíjajú. Chceli by tiež vedieť, kedy vznikli hviezdy a jednotlivé prvky, z ktorých sa postupne vytvorila naša Galaxia.

# Kapitola 3

## Hviezdny vietor

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [8], [14], [15] a [18].

Z už existujúcich pozorovaní bolo známe, že hviezdne atmosféry nemusia byť statické, a tým pádom môže z nich dôjsť nielen k úniku žiarenia, ale aj k úniku častíc do jej bezprostredného okolia. Tomuto úniku častíc hovoríme *hviezdny vietor*. V prípade osamotených hmotných hviezd s veľkým žiarivým výkonom pozorujeme masívny únik látky z hviezdy prostredníctvom tohoto hviezdneho vetra spôsobený účinkami žiarivej sily. V dôsledku hviezdneho vetra dochádza k značnému úbytku hmotnosti a hmotné hviezdy ešte predtým, ako by sa z nich stala supernova, môžu za celú dobu svojho vývoja stratiť aj viac ako polovicu svojej pôvodnej hmotnosti.

S veľmi silným hviezdny vetrom sa však môžeme stretnúť i u hviezdy, ktorá sa pri svojom vývoji stáva rozmerným červeným obrom, nadobrom alebo hviezdou tzv. asymptotickej vetve obrov s nízkym povrchovým gravitačným zrýchlením. Teplo sa v obaloch týchto hviezd s relatívne nízkou povrchovou teplotou prenáša konvekciou a ich vrchné vrstvy sú v neustálom pohybe. Z vrchnej časti hviezd vane silný hviezdny vietor, prostredníctvom ktorého môžu hviezdy v extrémnych prípadoch stratiť až  $10^{-6} M_{\odot}$  ročne. Materiál, ktorý hviezdy do okolia odhodia, je v dôsledku pulzácií urýchľovaný žiarivou silou na prachových časticiach. Pri odhade rýchlosti straty látky  $\dot{M}$  z povrchu červených obrov používame väčšinou semiempirický vzťah, ktorý formuloval Reimers (1977)

$$\dot{M} = \left(-1.4 \cdot 10^{-13} \frac{M_{\odot}}{\text{rok}}\right) \times \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) \times \left(\frac{g_{\odot} R_{\odot}}{gR}\right), \quad (3.1)$$

kde  $L$  je žiarivý výkon,  $R$  je polomer a  $g$  je gravitačné zrýchlenie na povrchu hviezdy. Tvar vyššie uvedeného vzťahu sa dá zdôvodniť napríklad tak, že ak

z hviezdy, s hmotnosťou  $M$  a polomeru  $R$ , uniká látka do medzihviezdneho priestoru, znamená to časový prírastok potenciálnej energie  $E_p$ , na ktorom sa vynaloží určitá časť energie žiarivého výkonu  $L$  hviezdy. Žiarivý výkon  $L$  môžeme aproximovať vzťahom:

$$L \approx \frac{dE_p}{dt} \approx \frac{d}{dt} \left( G \frac{M^2}{R} \right) \approx 2G \frac{M}{R} \dot{M}, \quad (3.2)$$

kde  $G$  je gravitačná konštanta.

U hviezd s korónou môžeme pozorovať aj koronálny vietor. Očakáva sa, že všetky nedegenerované hviezdy s efektívnou teplotou menšou ako 6 500 K majú konvektívnu zónu pod ich povrchom, a preto by chromosféra a koróna mohla existovať u všetkých chladných hviezd. Kvôli vysokej teplote plynu, je koronálny (hviezdny) vietor urýchľovaný tlakom plynu. Avšak, u veľmi žiarivých chladných hviezd môže byť vietor urýchľovaný tiež tlakom vln alebo tlakom žiarenia na čiaščkách prachu. Pokiaľ majú tieto hviezdy veľkú rýchlosť straty hmoty  $\dot{M}$ , potom rýchlosť chladnutia unikajúceho plynu je rýchlejšia ako jeho ohrievanie. A preto ani chladné hviezdy s veľkou rýchlosťou straty hmoty nemajú korónu. Korónu a vietor urýchľovaný tlakom plynu majú iba hviezdy spektrálneho typu F5IV–K1III. Teplota slnečnej fotosféry, odkiaľ k nám prichádza viditeľné žiarenie, má teplotu necelých 6 000 K. Koróna vo vonkajších vrstvách slnečnej atmosféry môže mať teplotu až  $2 \cdot 10^6$  K. V porovnaní s hviezdnyim vetrom má koronálny vietor omnoho menšiu rýchlosť straty hmoty a v prípade Slnka to je iba  $10^{-14} M_\odot/\text{rok}$ .

# Kapitola 4

## Vývoj hviezd

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [7]–[9], [14] a [16].

Tak, ako sa človek narodí, prežíva svoj aktívny život a nakoniec zomrie, tak sa aj hviezdy, ktoré nie sú statickými objektmi, vznikajú, vyvíjajú sa a zanikajú. Hviezdy taktiež netvoria dokonalý uzavretý systém, pretože žiaria do okolitého prostredia a vymieňa si s ním hmotu. Súčasné predstavy naznačujú, že hviezdy vznikajú gravitačným kolapsom z náhodného zahustenia chladnej medzihviezdnej látky, ktorá je súčasťou obrích molekulových mračien. Ich časový vývoj je dôsledkom ich interakcie s okolím. To, ako rýchlo sa bude hviezda vyvíjať, určuje hlavne jej počiatočná hmotnosť. Z fyzikálneho hľadiska je hviezdny vývoj nevratným dejom, pretože uzavretý kolobeh neustáleho vzniku, vývoja a zániku hviezd nie je možný. Hviezda po vyčerpaní všetkých dostupných zásob energie prechádza do záverečného neaktívneho štádia a z hviezdy sa môže stať supernova typu Ia, čierna diera, čierny trpaslík alebo neutrónová hviezda.

### 4.1 Vývoj hmotných hviezd

Podobne ako u málo hmotných hviezd, je vývoj hmotných hviezd na hlavnej postupnosti zapríčinený zmenou chemického zloženia, kedy sa termojadrovými reakciami premieňa vodík na hélium. Avšak, tieto hmotné hviezdy majú konvekčné jadro, cez ktoré sa novovzniknuté hélium rovnomerne premiešava. Termojadrový vývoj v centre hviezd s hmotnosťou nad  $11 M_{\odot}$  je rýchlejší ako je tempo dezintegrácie obalu.

V momente, keď sa v centre hviezdy začne tvoriť malé jadro zložené z termojadrových neaktívnych prvkov železa, dochádza jej vývoj ku svojmu rýchlemu



záveru. Hmotnosť železného elektrónovodegenerovaného jadra sa v dôsledku termojadrových reakcií síce zväčšuje, ale jeho polomer sa znižuje. Ak hmotnosť tohto jadra prekročí tzv. Chandrasekharovu hranicu (približne  $1.40 M_{\odot}$ ), jadro sa začne kolabovať. Hlavnou príčinou jeho kolapsu je, že hviezda už nedokáže vytvoriť dostatočný gradient tlaku elektrónovodegenerovanej látky potrebný na odolanie tiaži tejto látky. Vnútro hviezd s počiatočnou hmotnosťou do  $50 M_{\odot}$  sa zrúti do neutrónovej hviezdy zložená predovšetkým z veľmi hustej neutrónovodegenerovanej látky. Prostredníctvom neutrín vzniknutých pri kolapse sa z hviezdy odnáša rádovo  $10^{46}$  J potenciálnej energie uvoľnenej kontrakciou. Časť tejto energie vzniknutých neutrín je použitá k vzplanutiu supernovy typu II. Ako príklad takejto supernovy môžeme uviesť supernovu z roku 1054, ktorej pozostatkou je Krabia hmlovina a v nej silne zmagnetizovaná rotujúca hviezda – pulzár v súhvezdí Býka.

Silný hviezdny vietor urýchľovaný žiarením dokáže odhaliť jadro hviezdy s počiatočnou hmotnosťou väčšou ako  $50 M_{\odot}$ . Po odhalení sa hviezda dostane až do oblasti hviezdy, ktorá obsahuje hélium a taktiež iné pozostatky predchádzajúceho vývoja hviezdy. Tieto typy hviezdy označujeme ako uhlíkové a kyslíkové (WC, WO – pozostatky po horení hélia) a dusíkové (WN – po dlhoprebíhajúcom CNO cykle) Wolfave-Rayetove hviezdy. Hviezdy tohoto typu vybuchujú ako supernovy typu Ib, z ktorých spektier bolo dokázané, že ich predchodcami boli hviezdy s veľmi malým zastúpením vodíka. Wolfave-Rayetove hviezdy kolabujú veľmi rýchlo. Zmršťovanie týchto hviezd sa nezastaví ani na neutrónovej degenerácii, ale končia ako exotické čierne diery. Avšak čierne diery sú iba výnimočným záverom vývoja niektorých veľmi hmotných hviezd.

# Kapitola 5

## Čierna diera

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [7]–[12] a [17].

Vývoj v centrálnych oblastiach veľmi hmotných hviezd ( $50 M_{\odot}$  a viac) prebieha veľmi rýchlo. Prebiehajú v nich všetky možné typy exogénnych jadrových reakcií a následne sa tam vytvorí hmotné železné jadro, kde už žiadne jadrové reakcie neprebiehajú. Pokiaľ je hmotnosť jadra v tomto štádiu vývoja väčšia ako je maximálna hmotnosť neutrónovej hviezdy (asi  $3 M_{\odot}$ ), potom už neexistuje žiadny mechanizmus, ktorý by pokračujúci gravitačný kolaps odvrátil či zastavil. Gravitačná sila sa tu stane úplne dominantnou a začne sa rýchly kolaps jadra.

Vonkajšie vrstvy hviezdy explodujú, môžu vybuchnúť ako supernova typu Ib, prípadne môžu tiež vybuchnúť ako hypernova. Vo vnútorných častiach hviezdy však kolaps nenavrátne pokračuje. Jadro hviezdy sa premení na čiernu dieru. Je to vlastne objekt, ktorý je zahustený natoľko, že jeho vlastná gravitácia zabráni čomukoľvek, aby z neho uniklo mimo horizont udalosti.

John Michell v roku 1784 prvýkrát študoval existenciu hviezd s tak veľkým povrchovým gravitačným zrýchlením, z ktorých povrchu nemôže uniknúť ani svetlo. Po ňom sa Pierre Simone de Laplace pokúšal zistiť hmotnosť telesa zadanej hustoty, z ktorého úniková rýchlosť je väčšia ako rýchlosť svetla. Obaja vychádzali z klasickej Newtonovej teórie gravitácie. Karl Schwarzschild v roku 1916 publikoval realistický výpočet parametrov čiernej diery v rámci všeobecnej teórie relativity. Robert Kerr vytvoril v roku 1963 model rotujúcej čiernej diery. Medzi ďalšími, ktorí publikovali významné práce o vlastnostiach čiernych dier patria hlavne Subrahmanyan Chandrasekhar, John A. Wheeler, Jakov Zel'dovič, Richard Penrose a Stephan Hawking, ktorému sa podarilo prepojiť všeobecnú teóriu relativity a kvantovú mechaniku (vyparovanie čiernych dier). Samostatný názov čierna diera pochádza od Johna A. Wheelera z roku 1968.

## 5.1 Ideálne čierne diery

Veľkosť čiernej diery závisí na hmotnosti kolabovaného objektu. Pokiaľ vyjdeme zo zjednodušeného modelu nerotujúcej, nenabitej sféricky symetrickej čiernej diery, jej polomer získame zo vzťahu:

$$R_g = 2 \frac{GM}{c^2} = 2953.25 \frac{M}{M_\odot} \text{ m}, \quad (5.1)$$

kde  $R_g$  je Schwarzschildov alebo gravitačný polomer,  $M$  je hmotnosť kolabovaného objektu a  $c$  je rýchlosť svetla. V prípade, že hmotnosť kolabovaného telesa je rovná  $10 M_\odot$ , jeho Schwarzschildov polomer je približne 30 km. Čím sa polomer reálneho telesa viac blíži ku svojmu Schwarzschildovmu polomeru, tým sú efekty všeobecnej teórie relativity pozorovateľnejšie. Žiadne teleso s polomerom menším ako je Schwarzschildov nemôže byť stabilné a každé také teleso sa musí zrútiť do čiernej diery.

Gravitačné pole čiernej diery zakrivuje časopriestor a mení jeho vlastnosti. Čím viac sa miestny pozorovateľ blíži k čiernej diere, tým pomalšie mu, posudzované z hľadiska vzdialeného pozorovateľa, plynie čas. Jeho testovacie hodiny sa začínajú meškať. Spomalenie chodu času môžeme zmerať napríklad zmenou frekvencie monochromatického žiarenia vznikajúceho pri preskoku elektrónu medzi dvoma energiovými hladinami v atóme. Ak je  $\lambda$  vlnová dĺžka vyslaného žiarenia a  $\Delta\lambda$  je rozdiel medzi vlnovou dĺžkou vyslaného a pozorovaného žiarenia ďaleko od hviezdy, potom platí:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{1 - (R_g/R)}} - 1, \quad (5.2)$$

kde  $R$  je polomer zrúteného objektu. Tento vzťah nám hovorí, že červený posuv je nekonečne veľký v prípade  $R \rightarrow R_g$ . Nekonečne veľká bude aj pozorovaná vlnová dĺžka žiarenia, čo znamená, že energia unikajúceho fotónu ( $E = hc/\lambda$ ) z hviezdy bude nulová, kde  $h$  je Planckova konštanta. Namiesto toho, jej žiarivý výkon  $L$  klesne exponenciálne:

$$L \propto \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right], \quad (5.3)$$

kde

$$\tau = \frac{2 R_g}{3 c} \left[ \left( \frac{R}{R_g} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right] \quad (5.4)$$

je konečný čas potrebný na to, aby sa objekt z polomeru  $R$  zrútil na gravitačný polomer  $R_g$ . Vzdialený pozorovateľ zistí, že ako sa povrch hviezdy blíži k jeho Schwarzschildovmu polomeru, kolaps sa spomalí, až sa úplne zastaví a zamrzne na tomto polomere. Naopak, pozorovateľ, ktorý sa nachádza vo vnútri Schwarzschildovho polomeru žiadne zamrznutie pozorovať nebude, hviezda bude stále aktívna. Ďalej zistí, že za konečný čas dosiahne kolabujúce sa teleso nielen Schwarzschildov, ale aj nulový polomer. Teleso sa zrúti do bodu, do singularity s nulovým objemom. Pozorovateľ bude tak od okolitého sveta oddelený nepriepustnou hranicou, tzv. obzorom udalosti, ktorý je tu totožný so Schwarzschildovou sférou.

## 5.2 Všeobecné čierne diery

Prípad, ktorý bol doteraz popísaný v podkapitole 5.1 je však len ideálnym prípadom. V skutočnosti kolabujúce teleso vždy rotuje a takmer vždy je nabité. Pri kolapse hviezdy do čiernej diery sa zachováva len niektoré jej vlastnosti, akými sú celková hmotnosť  $M$ , moment hybnosti  $L$  a celkový náboj  $Q$ . Tieto najvšeobecnejšie čierne diery sú známe ako tzv. Kerrove-Newmanove čierne diery. Na rozdiel od nerotujúcich Schwarzschildových čiernych dier, má rotujúca čierna diera (Kerrova čierna diera) zložitejšiu štruktúru a vlastnosti. Má menší obzor udalosti, ktorý nie je totožný s medzou nekonečne veľkého červeného posuvu. Priestor medzi týmito dvoma oblasťami sa nazýva ergosféra, ktorá je dôležitá z hľadiska energetiky čiernej diery. Ešte pred tým, ako sa rotácia čiernej diery úplne zastaví, sa môže z čiernej diery prostredníctvom Penrosovho mechanizmu uvoľniť až 20.7 % jej rotačnej energie (Bhat a kol. 1985). Kerrove čierne diery môžu byť tak najefektívnejším zdrojom energie, aký vôbec poznáme.

## 5.3 Detekcia čiernych dier

Existujú čierne diery? Ak áno, ako ich spoznáme? Detekovať čiernu dieru vôbec nie je jednoduchou záležitosťou, pokiaľ čierna diera vzniknutá kolapsom hviezdy nie je súčasťou nejakého dvojhviezdneho systému. Ako vieme, samostatná čierna diera do okolitého priestoru žiadne detekovateľné žiarenie nevysiela. Chová sa viac-menej ako hmotný bod a jediný spôsob, ako ich odhaliť je prostredníctvom ich obrovského gravitačného pôsobenia na okolitú hmotu.

Na rozdiel od odhalenia osamotenej čiernej diery, mnohým jednoduchšie by sme objavili čiernu dieru, pokiaľ by bola súčasťou dvojhviezdneho systému.

V prípade, že by obe zložky boli od seba dostatočne vzdialené, existenciu čiernej diery by sme mohli odvodiť z obežného pohybu viditeľnej zložky. Pokiaľ by sme objavili dvojhviezdu, kde by jedna zo zložiek bola neviditeľná a mala súčasne hmotnosť väčšiu ako  $3 M_{\odot}$ , potom neviditeľný kompaktný objekt je pravdepodobne čiernou dierou. Ak by neviditeľný objekt mal hmotnosť väčšiu ako  $5 M_{\odot}$ , môžeme takmer s istotou povedať, že daný kompaktný objekt je čiernou dierou. Ešte viac by bolo preukázateľnejšie, pokiaľ by čierna diera bola zložkou tesného dvojhviezdneho systému, v ktorom látka preteká z optickej zložky na kompaktný objekt.

V súčasnosti je najobľúbenejšiou metódou detekcie čiernych dier založená na pozorovaní kompaktných zdrojov röntgenového žiarenia, ktoré sú súčasťou dvojhviezdnych systémov tvorené z viditeľného a neviditeľného kompaktného objektu. Röntgenové žiarenie vzniká dôsledkom úniku hmoty z donora na darcu. Hmota je brzdená z vysokej rýchlosti v momente, keď sa dostane do blízkosti kompaktného objektu, okolo ktorého sa vytvorí akréčný disk. Kinetická energia voľného pádu hmoty sa premieňa na teplo, ktoré predstavuje zdroj röntgenového žiarenia.

K najnádejnejším kandidátom hviezdnych čiernych dier patrí röntgenová dvojhviezda Cyg X-1 s obežnou dobou zložiek 5.6 dní, kde optickou zložkou je hmotný modrý nadobor spektrálneho typu O9.7 Iab (Karitskaya 2011). Ďalej sa hovorí o zdroji vo Veľkom Magelanom mračne LMC X-3 B, V616 Mon a o V404 Cyg (Ziółkowski 2003). Počet čiernych dier hviezdnych hmotnosti je však malý, keďže k ich vzniku je potrebné, aby počiatočná hmotnosť hviezd bola mimoriadne vysoká, zrejme väčšia ako  $50 M_{\odot}$  a také hmotné hviezdy vznikajú len zriedkavo.

V súčasnosti je všeobecne uznávaný názor, že v centre každej galaxie sa nachádza supermasívna čierna diera s hmotnosťou rádovo od  $10^6$  do  $10^9 M_{\odot}$ , ktorú nazývame galaktickou čiernou dierou. Čierna diera nachádzajúca sa v centre našej Galaxii je objekt Sagittarius A\* a má hmotnosť  $4.1 \cdot 10^6 M_{\odot}$  (Ghez a kol. 2008). Avšak najhmotnejšia galaktická čierna diera je takmer tisíckrát hmotnejšia ako tá naša. Je to galaktická čierna diera s hmotnosťou približne  $3.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$  nachádzajúca sa v galaxii M87 (Walsh a kol. 2013).

# Kapitola 6

## Horúce hviezdy

Následujúca kapitola bola vypracovaná na základe [13].

Skôr sa hviezdy delili na rané (early) a neskoré (late), pričom deliacou čiarou bolo naše Slnko. Z doterajších znalostí, z historického pohľadu o hviezdnom vývoji vieme, že hviezda sa v priebehu svojho vývoja postupne zo spočiatku pomerne horúceho objektu stáva chladnou hviezdou, a preto by rané hviezdy mali byť teplejšie ako Slnko, zatiaľ čo neskoré hviezdy zase chladnejšie. Na základe rôznych vlastností hviezd môžeme hviezdy aj rôzne rozdeliť do jednotlivých skupín. Tým najjednoduchším delením hviezd je na horúce a chladné. Toto delenie vychádza z kvantitatívnych a kvalitatívnych charakteristík, avšak hlavne podľa vonkajšieho chovania hviezdy. Medzi hlavnými charakteristikami hviezdy patria hmotnosť  $M$ , žiarivý výkon  $L$ , polomer fotosféry (vrchná časť hviezdy, odkiaľ vychádza podstatná časť hviezdneho svetla)  $R$ , povrchové gravitačné zrýchlenie  $g$  a efektívna teplota  $T_{\text{ef}}$ . Na prevod medzi jednotlivými charakteristikami slúžia nasledujúce dva vzťahy:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{ef}}^4 \quad (6.1)$$

a

$$g = G \frac{M}{R^2}, \quad (6.2)$$

kde  $\sigma$  je Stefanova-Boltzmanova konštanta ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ).

Deliť hviezdy na horúce a chladné môžeme podľa ich efektívnej teploty. Ďalším kritériom môže byť existencia, či neexistencia hviezdnej aktivity slnečného typu a špeciálne potom tiež podľa výskytu aktívnych oblastí v povrchových vrstvách hviezdy, ktoré sú podmienené vznikom a následným rozpadom lokálnych magnetických polí. S tým ďalej súvisí i výskyt chromosfér, korón slnečného

typu a všetkých bežných, viac či menej prechodných, alebo krátkoprechodných prejavov hviezdnej aktivity, akými sú fotosférické škvrny, erupcie a protuberancie a taktiež i všeobecne pomalšie rotácie chladných hviezd. Uvedené vlastnosti sú charakteristické pre chladné hviezdny, zatiaľ čo horúce hviezdny majú kľudné atmosféry, vyskytujú sa v nich stabilné globálne magnetické pole a tiež rôzne prejavy procesov žiarivej difúzie, ktoré môžu viesť až k javu chemicky pekuliárnych hviezd alebo k žiareniu urýchľované hviezdny vetrom.

Ukazuje sa, že práve efektívna teplota hviezdny hrá určujúcu rolu nielen v stave hviezdny atmosféry, ale i v stave podpovrchových vrstiev, ktoré, samozrejme, nemôžeme pozorovať priamo. Na teplote hviezdny závisí hlavne, či sa tok energie prúdiaci z jadra hviezdny do okolitého priestoru v subfotosférických vrstvách bude prenášať prevážne žiarením (u horúcejších hviezd) alebo skôr konvekciou (u hviezd slnečného typu a chladnejšie). Hviezdny spektrálneho typu F2 s efektívnou teplotou okolo 7 000 K predstavujú akúsi deliacu čiaru medzi horúcimi a chladnými hviezdami. Hranica 7 000 K zodpovedá farebnému indexu ( $B - V$ ) približne +0.35 mag. Naše Slnko s efektívnou teplotou 5 779 K je preto chladnou hviezdou, zatiaľ čo Sírius, Deneb alebo Vega sú predstaviteľmi horúcich hviezd.

## 6.1 Horúce hviezdny v ultrafialovej oblasti

Ako vieme, horúce hviezdny majú vysokú efektívnu teplotu, a preto veľkú časť svojho žiarenia vyžiaria v ultrafialovej oblasti. Z tohto dôvodu nám práve ultrafialová oblasť spektra poskytuje neoceniteľné informácie o týchto hviezdach, ktoré by sme v mnohých prípadoch z inej časti spektra nezískali. Keďže ultrafialové žiarenie je z veľkej časti pohlcované zemskou atmosférou, je hviezdna spektroskopia v ultrafialovom obore možná len z družíc. Medzi hlavnou výhodou pozorovania v ultrafialovej oblasti patrí napríklad to, že pozorované hviezdne toky bývajú väčšinou absolútne kalibrované, čo nám umožňuje zistiť efektívnu teplotu alebo vzdialenosť týchto hviezd.

Ultrafialová spektroskopia je obmedzená na oblasť Balmerovho kontinua s vlnovými dĺžkami v rozsahu 912–3 647 Å. Aj keď teoreticky by sme žiarenie horúcich hviezd mohli detekovať i v oblasti Lymanovho kontinua, v skutočnosti je však takéto žiarenie nepozorovateľné, nakoľko je schopné ionizovať medzi hviezdny vodík. Preto je žiarenie Lymanovho kontinua absorbované medzihviezdny vodíkom a pri fluoroscenčných prechodoch je vyžiarené ako žiarenie s väčšou vlnovou dĺžkou. Aby sme mohli pozorovať žiarenie Lymanovho kontinua, musela by sa horúca hviezdna nachádzať pomerne blízko, v oblastiach chudých na medzi-

hviezdny vodík.

Klasické delenie spektra je na kontinuum a čiary. Avšak v ultrafialovom spektre sú spektrálne čiary ťažších prvkov, hlavne železa, tak početné, že kontinuum tu v podstate nepozorujeme a početné čiary sa navzájom splývajú. Ďalej sú výrazné tiež čiary Lymanovej série vodíku, ktoré vznikajú absorpciou žiarenia v medzihviezdnom prostredí. Ďalšie početné čiary v medzihviezdnom prostredí vznikajú rovnakým spôsobom, pričom najsilnejšie z nich sú nápadné svojim hlbokým a úzkym profilom. V ultrafialovom spektre horúcich hviezd spektrálnej triedy O a nadobrov spektrálnych tried B a A pozorujeme nápadné profily typu P Cygni, ktoré vznikajú v hviezdnom vetre.



# Kapitola 7

## Praktická časť

### 7.1 SPLAT-VO (A VO-enabled Spectral Analysis Tool)

Program SPLAT-VO [e10] je grafický nástroj slúžiaci k vykresľovaniu, porovnávaniu a analýze astronomických spektier uložených vo formáte FITS, TEXT alebo NDF/NDX. Je schopný načítať spektrá z lokálneho disku, stiahnuť ich z internetu alebo je schopný spolupracovať s Virtuálnym observatóriom tak, že priamo v programe môžeme vyhľadať potrebné spektrá z jednotlivých serverov.

Každé vykresľovacie okno v programe je možné použiť na prezeranie jedného alebo viacerých spektier súčasne a môže ich vykresliť, či už ako čiaru, alebo ako body. Okno je možné zväčšiť a rolovať alebo ho môžeme centrovat' na určitej vlnovej dĺžke. Všetky funkcie v tomto programe sú zobrazené v priehľadnom formáte, ktorý je určený predovšetkým pre bežných užívateľov spektrálnej analýzy dát. Súčasná sada nástrojov na analýzu spektier zahŕňa odhad pozadia polynomickým fitovaním zvoleného úseku spektra alebo vykreslením interpolačných čiar, fitovaním Gaussovho, Lorentzovho a Voigtovho profilu emisných a absorbných čiar, filtrovaním spektier použitím priemeru a mediánu a taktiež odstránenie šumu vln a vypočítanie štatistík. Databáza pozícií laboratórnych čiar nám môže pomôcť pri identifikácii jednotlivých spektrálnych čiar.

SPLAT-VO podporuje plný rozsah súradnicových systém použitím najnovších nástrojov knižnice Starlink AST. To nám umožňuje vykresliť súradnice a spojiť ich s rôznymi ďalšími súradnicovými systémami (vlnová dĺžka, frekvencia, energia a rýchlosť) a transformovať medzi týmito a rozdielnými štandardmi ostatných (topocentrické, heliocentrické, dynamické a kinematické lo-

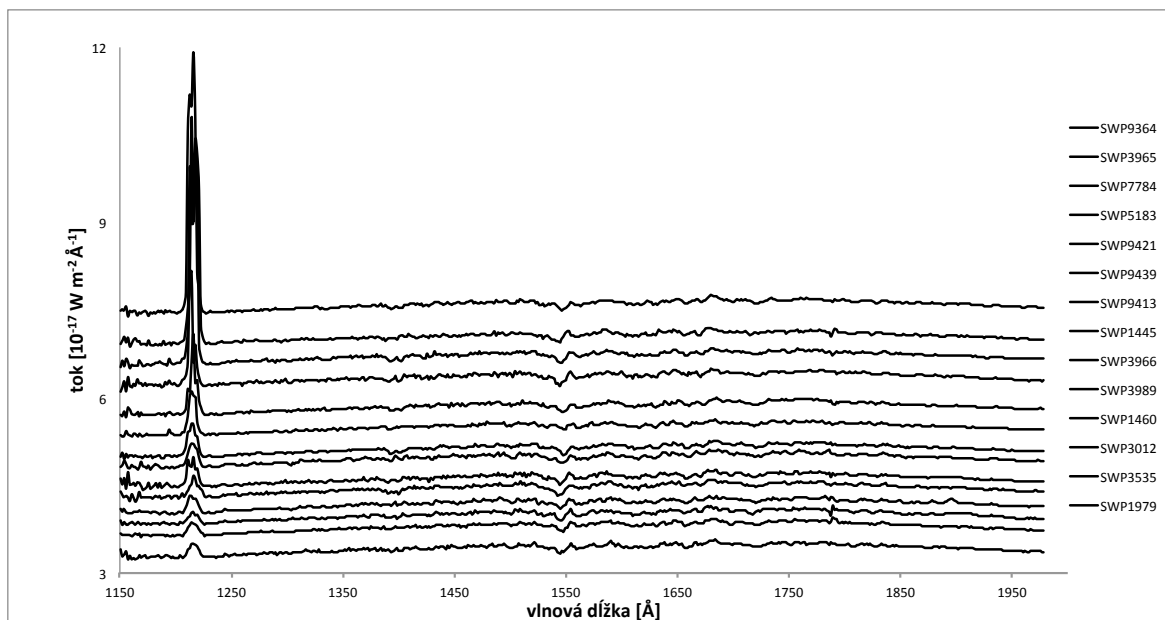
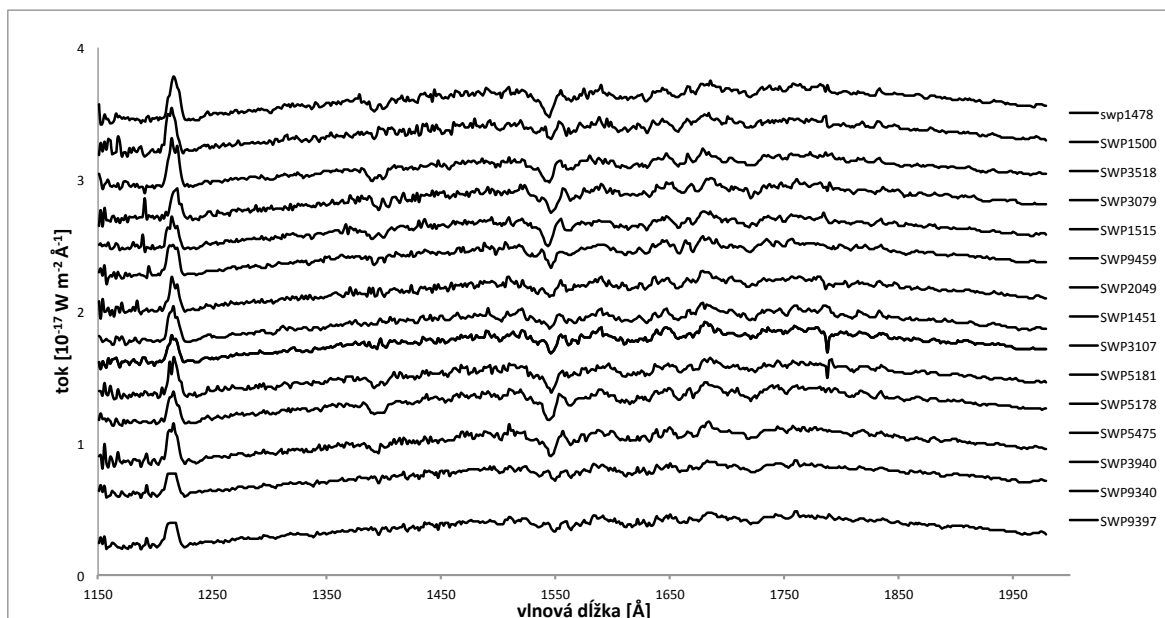
kálne štandardy). SPLAT-VO používa AST na prevod spektier medzi rozličnými systémami tokov. To znamená, že spektrum zo širokého výberu zdrojov môže byť ľahko porovnávané a použité na zostrojenie distribúcie spektrálnej energie. Toto je dôležitou vlastnosťou podpory dodávania heterogénnych dát vo Virtuálnom observatóriu. SPLAT-VO môže taktiež spolupracovať s ostatnými programami použitím protokolu PLASTIC.

## 7.2 Spracovanie dát

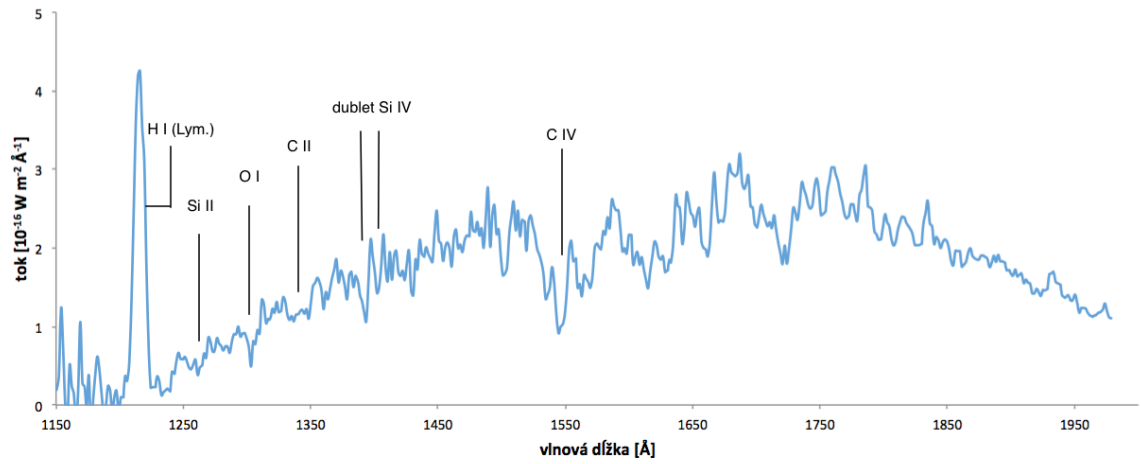
V práci sme použili dátá z archívu družice IUE a následne sme jednotlivé údaje v grafoch získali cez program SPLAT-VO. Konkrétne sa jedná o dátá röntgenovej dvojhviezdy Cyg X-1 v ultrafialovej oblasti získané v období od 30. apríla 1978 do 6. júla 1980. Súradnice danej hviezdy sú: rektascenzia  $\alpha = 19^{\text{h}}58^{\text{m}}21.68^{\text{s}}$ , deklinácia  $\delta = +35^{\circ}12'5.78''$ . Pri snímaní bola použitá veľká apertúra s nízkym rozlíšením a detektor SWP, ktorý pokrýva merania v rozmedzí vlnových dĺžok 1 150–1 975 Å. Expozičná doba jednotlivých spektier je rôzna, majú hodnoty v rozmedzí 1 980–3 600 s. V našej práci sa venujeme premennosti ultrafialového spektra v závislosti na fáze obehu optickej zložky. Preto po tom, ako sme získali jednotlivé spektrá s príslušným časom pozorovania, bolo potrebné zistiť fázu obehu, ktoré zodpovedá jednotlivým okamžikom pozorovania. Fázu obehu je možné získať z nasledujúceho vzťahu:

$$\phi = \text{mod} \frac{\text{HJD} - M_0}{P}, \quad (7.1)$$

kde HJD je čas pozorovania prepočítaný na heliocentrický juliánsky dátum,  $M_0$  je okamžik minima a  $P$  je perióda obehu zložiek dvojhviezdy Cyg X-1. Mod znamená, že zvyšok daného zlomku je práve nami požadovaná fáza. V našej práci sme použili hodnotu okamžiku minima  $M_0 = 2\,441\,163.53$  d a periódu  $P = 5.59\,982$  d (Brocksopp a kol. 1998). Vo všetkých nasledujúcich tabuľkách je potrebné k HJD pripočítať ešte 2 440 000 d.



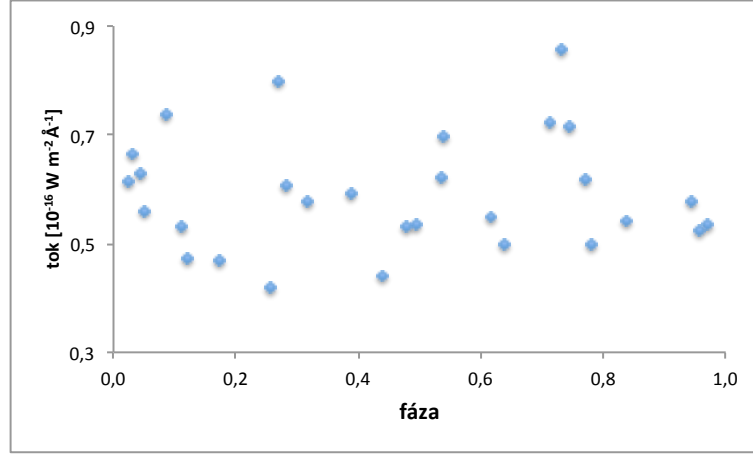
Graf 1: Prehľad použitých ultrafialových spektier Cyg X-1, z ktorých boli získané údaje v jednotlivých grafoch. Poradie popiskov legendy zodpovedá poradiam jednotlivých spektier.



Graf 2: Identifikácia spektrálnych čiar v spektre SWP1445.

V grafe č. 2 sú vyznačené identifikované spektrálne čiary, ktorých parametre sme študovali v našej práci, v jednej z 29 ultrafialových spektrách dvojhviezdy Cyg X-1. Ďalej je vyznačená výrazná emisná čiara Lymanovej série vodíku.

### 7.2.1 Si II ( $\lambda_{\text{Si II, max}} \approx 1261.05 \text{ \AA}$ )

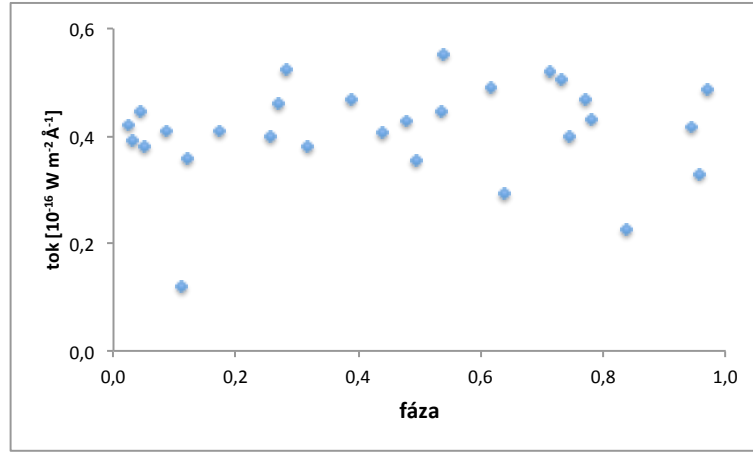


Graf 3: Graf závislosti maxima toku Si II ( $\lambda_{\text{Si II, max}} \approx 1261.05 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.1: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kremík Si II ( $\lambda_{\text{Si II, max}} \approx 1261.05 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [10 <sup>-16</sup> W/m <sup>2</sup> Å]	vlnová dĺžka [Å]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [10 <sup>-16</sup> W/m <sup>2</sup> Å]	vlnová dĺžka [Å]
1445	3629.23	0.32	0.58	1259.54	3966	3894.81	0.75	0.72	1261.22
1451	3629.92	0.44	0.44	1261.22	3989	3896.42	0.03	0.66	1261.22
1460	3630.90	0.62	0.55	1259.54	5178	4002.92	0.05	0.56	1261.22
1478	3632.88	0.97	0.53	1261.22	5181	4003.12	0.09	0.74	1261.22
1500	3636.07	0.54	0.70	1259.54	5183	4003.26	0.11	0.53	1261.22
1515	3638.91	0.05	0.63	1261.22	5475	4035.01	0.78	0.50	1261.22
1979	3701.76	0.27	0.80	1261.22	7784	4265.58	0.96	0.52	1261.22
2049	3708.86	0.54	0.62	1261.22	9340	4412.38	0.17	0.47	1261.22
3012	3799.45	0.71	0.72	1261.22	9364	4416.12	0.84	0.54	1261.22
3079	3802.48	0.26	0.42	1261.22	9397	4419.80	0.50	0.54	1261.22
3107	3804.63	0.64	0.50	1261.22	9413	4422.31	0.94	0.58	1262.90
3518	3845.98	0.02	0.61	1261.22	9421	4423.30	0.12	0.47	1259.54
3535	3848.02	0.39	0.59	1261.22	9439	4425.30	0.48	0.53	1262.90
3940	3892.22	0.28	0.61	1259.54	9459	4426.94	0.77	0.62	1261.22
3965	3894.78	0.73	0.86	1261.22					

## 7.2.2 Si II ( $\lambda_{\text{Si II, min}} = 1259.43 \text{ \AA}$ )

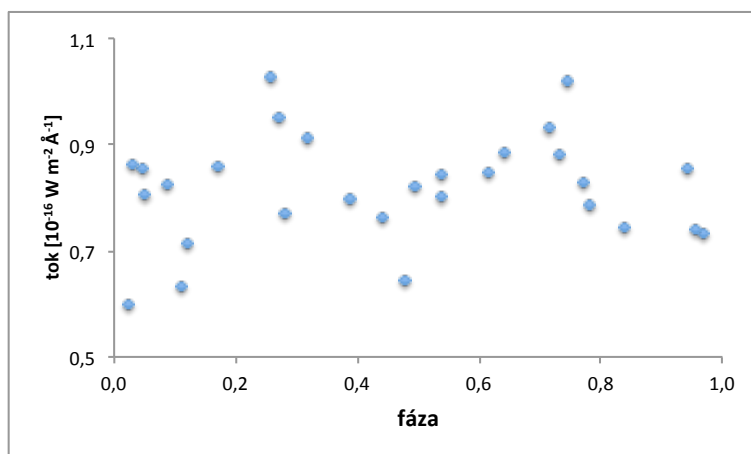


Graf 4: Graf závislosti minima toku Si II ( $\lambda_{\text{Si II, min}} \approx 1259.43 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.2: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kremík Si II ( $\lambda_{\text{Si II, min}} \approx 1259.43 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	0.38	1261.22	3966	3894.81	0.75	0.40	1259.54
1451	3629.92	0.44	0.41	1259.54	3989	3896.42	0.03	0.39	1257.87
1460	3630.90	0.62	0.49	1261.22	5178	4002.92	0.05	0.38	1257.87
1478	3632.88	0.97	0.49	1259.54	5181	4003.12	0.09	0.41	1257.87
1500	3636.07	0.54	0.55	1261.22	5183	4003.26	0.11	0.12	1259.54
1515	3638.91	0.05	0.45	1259.54	5475	4035.01	0.78	0.43	1257.87
1979	3701.76	0.27	0.46	1259.54	7784	4265.58	0.96	0.33	1259.55
2049	3708.86	0.54	0.45	1259.54	9340	4412.38	0.17	0.41	1259.54
3012	3799.45	0.71	0.52	1257.87	9364	4416.12	0.84	0.23	1259.54
3079	3802.48	0.26	0.40	1259.54	9397	4419.80	0.50	0.35	1259.54
3107	3804.63	0.64	0.29	1257.87	9413	4422.31	0.94	0.42	1259.54
3518	3845.98	0.02	0.42	1257.87	9421	4423.30	0.12	0.36	1261.22
3535	3848.02	0.39	0.47	1257.87	9439	4425.30	0.48	0.43	1259.54
3940	3892.22	0.28	0.52	1262.90	9459	4426.94	0.77	0.47	1259.54
3965	3894.78	0.73	0.50	1259.54					

### 7.2.3 O I ( $\lambda_{\text{O I, max}} \approx 1306.31 \text{ \AA}$ )

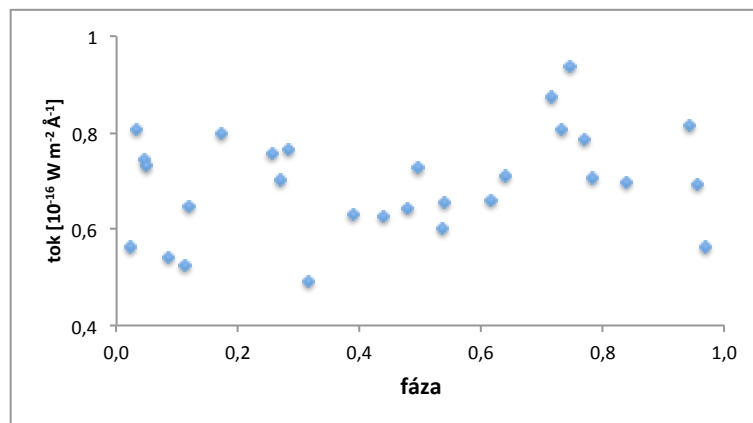


Graf 5: Graf závislosti maxima toku O I ( $\lambda_{\text{O I, max}} \approx 1306.31 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.3: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kyslík O I ( $\lambda_{\text{O I, max}} \approx 1306.31 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	0.81	1304.80	3966	3894.81	0.75	1.01	1306.48
1451	3629.92	0.44	0.92	1306.48	3989	3896.42	0.03	0.99	1306.48
1460	3630.90	0.62	0.86	1304.80	5178	4002.92	0.05	0.86	1306.48
1478	3632.88	0.97	0.94	1306.48	5181	4003.12	0.09	0.85	1306.48
1500	3636.07	0.54	1.10	1306.48	5183	4003.26	0.11	1.03	1306.48
1515	3638.91	0.05	1.00	1304.80	5475	4035.01	0.78	0.74	1306.48
1979	3701.76	0.27	0.87	1306.48	7784	4265.58	0.96	0.76	1306.49
2049	3708.86	0.54	0.80	1304.80	9340	4412.38	0.17	0.87	1306.49
3012	3799.45	0.71	1.12	1304.80	9364	4416.12	0.84	1.00	1308.16
3079	3802.48	0.26	0.86	1304.80	9397	4419.80	0.50	0.77	1306.49
3107	3804.63	0.64	1.14	1306.48	9413	4422.31	0.94	0.78	1306.48
3518	3845.98	0.02	0.87	1306.48	9421	4423.30	0.12	0.73	1306.48
3535	3848.02	0.39	0.83	1306.48	9439	4425.30	0.48	1.05	1308.16
3940	3892.22	0.28	0.87	1304.80	9459	4426.94	0.77	1.01	1308.16
3965	3894.78	0.73	1.03	1308.16					

## 7.2.4 O I ( $\lambda_{\text{OI},\text{min}} \approx 1305.32 \text{ \AA}$ )



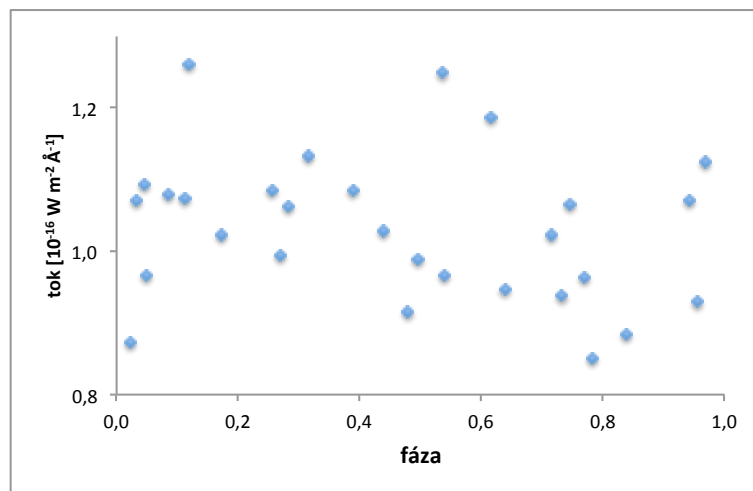
Graf 6: Graf závislosti minima toku O I ( $\lambda_{\text{OI},\text{min}} \approx 1305.32 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.4: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kyslík O I ( $\lambda_{\text{OI},\text{min}} \approx 1305.32 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	0.77	1306.48	3966	3894.81	0.75	0.93	1304.80
1451	3629.92	0.44	0.80	1304.80	3989	3896.42	0.03	0.72	1304.80
1460	3630.90	0.62	0.85	1306.48	5178	4002.92	0.05	0.65	1304.80
1478	3632.88	0.97	0.83	1304.80	5181	4003.12	0.09	0.54	1304.80
1500	3636.07	0.54	1.07	1304.80	5183	4003.26	0.11	0.72	1304.80
1515	3638.91	0.05	0.91	1306.48	5475	4035.01	0.78	0.58	1304.80
1979	3701.76	0.27	0.85	1304.80	7784	4265.58	0.96	0.66	1304.81
2049	3708.86	0.54	0.73	1306.48	9340	4412.38	0.17	0.72	1304.80
3012	3799.45	0.71	1.05	1306.48	9364	4416.12	0.84	0.70	1304.80
3079	3802.48	0.26	0.84	1306.48	9397	4419.80	0.50	0.67	1304.80
3107	3804.63	0.64	0.63	1304.80	9413	4422.31	0.94	0.72	1304.80
3518	3845.98	0.02	0.72	1304.80	9421	4423.30	0.12	0.71	1304.80
3535	3848.02	0.39	0.75	1304.80	9439	4425.30	0.48	0.90	1306.48
3940	3892.22	0.28	0.86	1306.48	9459	4426.94	0.77	0.91	1304.80
3965	3894.78	0.73	1.01	1306.48					



## 7.2.5 C II ( $\lambda_{\text{C II, max}} \approx 1333.99 \text{ \AA}$ )

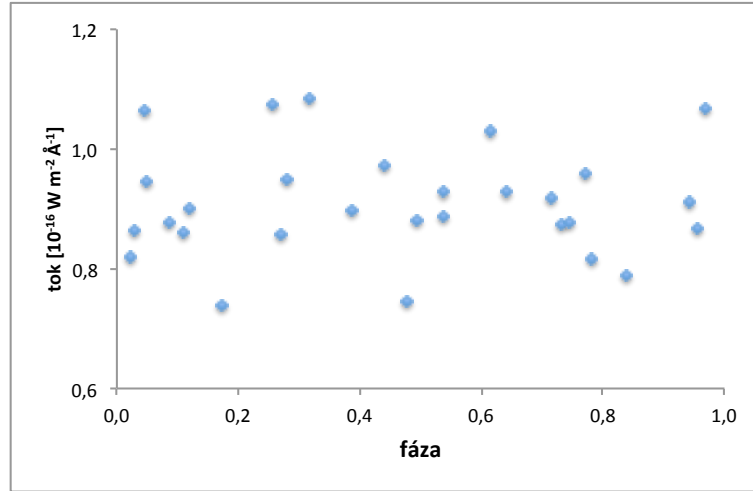


Graf 7: Graf závislosti maxima toku C II ( $\lambda_{\text{C II, max}} \approx 1333.99 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.5: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre uhlík C II ( $\lambda_{\text{C II, max}} \approx 1333.99 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	1.13	1334.98	3966	3894.81	0.75	1.07	1336.65
1451	3629.92	0.44	1.03	1333.30	3989	3896.42	0.03	1.07	1334.98
1460	3630.90	0.62	1.19	1333.30	5178	4002.92	0.05	0.97	1334.98
1478	3632.88	0.97	1.13	1334.98	5181	4003.12	0.09	1.08	1333.30
1500	3636.07	0.54	0.97	1333.30	5183	4003.26	0.11	1.07	1333.30
1515	3638.91	0.05	1.09	1334.98	5475	4035.01	0.78	0.85	1334.98
1979	3701.76	0.27	0.99	1333.30	7784	4265.58	0.96	0.93	1334.99
2049	3708.86	0.54	1.25	1334.98	9340	4412.38	0.17	1.02	1333.30
3012	3799.45	0.71	1.02	1334.98	9364	4416.12	0.84	0.88	1333.30
3079	3802.48	0.26	1.08	1334.98	9397	4419.80	0.50	0.99	1331.63
3107	3804.63	0.64	0.95	1333.30	9413	4422.31	0.94	1.07	1333.30
3518	3845.98	0.02	0.87	1333.30	9421	4423.30	0.12	1.26	1333.30
3535	3848.02	0.39	1.08	1333.30	9439	4425.30	0.48	0.92	1333.30
3940	3892.22	0.28	1.06	1333.30	9459	4426.94	0.77	0.96	1333.30
3965	3894.78	0.73	0.94	1334.98					

### 7.2.6 C II ( $\lambda_{\text{C II, min}} \approx 1334.63 \text{ \AA}$ )

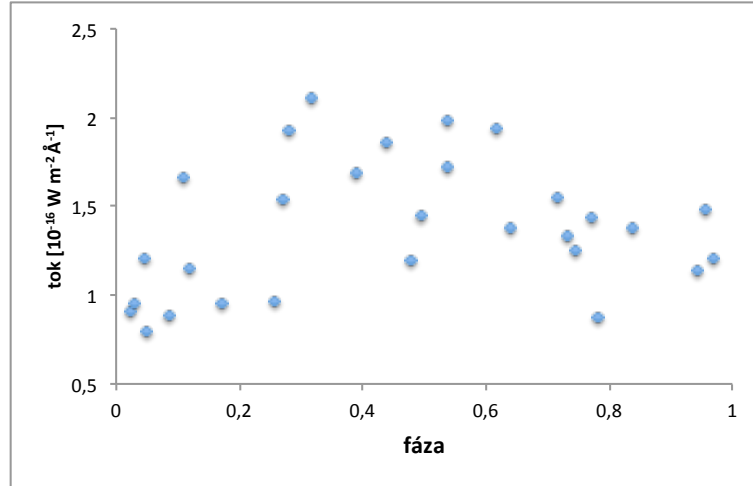


Graf 8: Graf závislosti minima toku C II ( $\lambda_{\text{C II, min}} \approx 1334.63 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.6: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre uhlík C II ( $\lambda_{\text{C II, min}} \approx 1334.63 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	1.08	1333.30	3966	3894.81	0.75	0.88	1333.30
1451	3629.92	0.44	0.97	1334.98	3989	3896.42	0.03	0.86	1333.30
1460	3630.90	0.62	1.03	1334.98	5178	4002.92	0.05	0.95	1333.30
1478	3632.88	0.97	1.07	1333.30	5181	4003.12	0.09	0.88	1336.65
1500	3636.07	0.54	0.89	1334.98	5183	4003.26	0.11	0.86	1334.98
1515	3638.91	0.05	1.07	1333.30	5475	4035.01	0.78	0.82	1333.30
1979	3701.76	0.27	0.86	1336.65	7784	4265.58	0.96	0.87	1336.66
2049	3708.86	0.54	0.93	1333.30	9340	4412.38	0.17	0.74	1334.98
3012	3799.45	0.71	0.92	1333.30	9364	4416.12	0.84	0.79	1334.98
3079	3802.48	0.26	1.08	1333.30	9397	4419.80	0.50	0.88	1336.65
3107	3804.63	0.64	0.93	1334.98	9413	4422.31	0.94	0.91	1336.65
3518	3845.98	0.02	0.82	1334.98	9421	4423.30	0.12	0.90	1334.98
3535	3848.02	0.39	0.90	1334.98	9439	4425.30	0.48	0.74	1334.98
3940	3892.22	0.28	0.95	1334.98	9459	4426.94	0.77	0.96	1334.98
3965	3894.78	0.73	0.87	1333.30					

### 7.2.7 Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1395.15 \text{ \AA}$ )

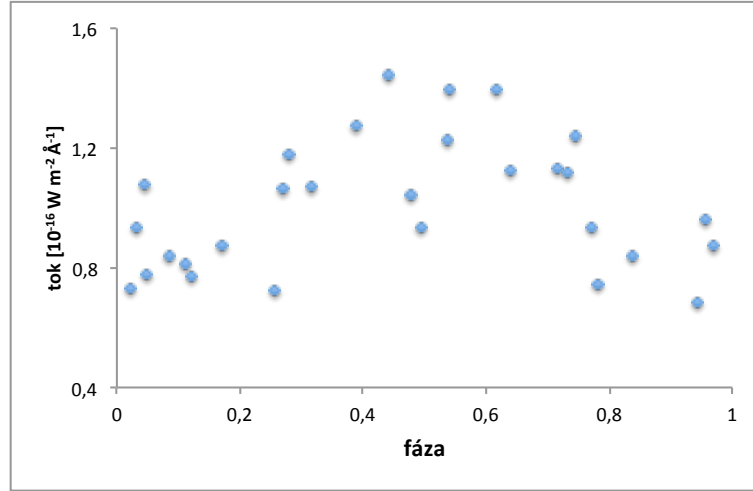


Graf 9: Graf závislosti maxima toku Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1395.15 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.7: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kremík Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1395.15 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	2.11	1397.00	3966	3894.81	0.75	1.25	1393.65
1451	3629.92	0.44	1.85	1397.00	3989	3896.42	0.03	0.96	1393.65
1460	3630.90	0.62	1.93	1397.00	5178	4002.92	0.05	0.80	1393.65
1478	3632.88	0.97	1.21	1397.00	5181	4003.12	0.09	0.88	1393.65
1500	3636.07	0.54	1.98	1395.33	5183	4003.26	0.11	1.66	1397.00
1515	3638.91	0.05	1.20	1395.33	5475	4035.01	0.78	0.87	1393.65
1979	3701.76	0.27	1.54	1395.33	7784	4265.58	0.96	1.48	1391.98
2049	3708.86	0.54	1.72	1395.33	9340	4412.38	0.17	0.95	1393.65
3012	3799.45	0.71	1.55	1395.33	9364	4416.12	0.84	1.38	1397.00
3079	3802.48	0.26	0.97	1393.65	9397	4419.80	0.50	1.45	1391.97
3107	3804.63	0.64	1.38	1393.65	9413	4422.31	0.94	1.13	1397.00
3518	3845.98	0.02	0.91	1395.33	9421	4423.30	0.12	1.15	1397.00
3535	3848.02	0.39	1.69	1397.00	9439	4425.30	0.48	1.19	1391.97
3940	3892.22	0.28	1.93	1397.00	9459	4426.94	0.77	1.44	1395.33
3965	3894.78	0.73	1.33	1397.00					

### 7.2.8 Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1394.05 \text{ \AA}$ )

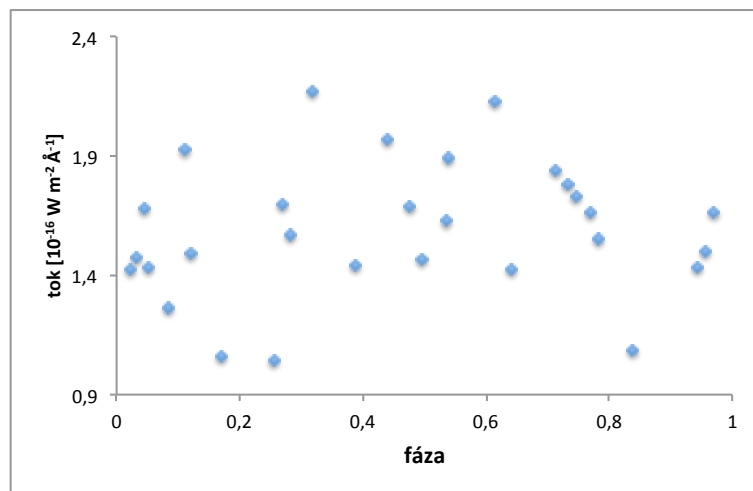


Graf 10: Graf závislosti minima toku Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1394.05 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.8: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre kremík Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1394.05 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2\text{\AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2\text{\AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	1.07	1393.65	3966	3894.81	0.75	1.24	1395.33
1451	3629.92	0.44	1.44	1393.65	3989	3896.42	0.03	0.93	1395.33
1460	3630.90	0.62	1.40	1393.65	5178	4002.92	0.05	0.78	1395.33
1478	3632.88	0.97	0.88	1393.65	5181	4003.12	0.09	0.84	1395.33
1500	3636.07	0.54	1.40	1393.65	5183	4003.26	0.11	0.82	1391.97
1515	3638.91	0.05	1.08	1393.65	5475	4035.01	0.78	0.74	1395.33
1979	3701.76	0.27	1.06	1393.65	7784	4265.58	0.96	0.96	1395.34
2049	3708.86	0.54	1.23	1393.65	9340	4412.38	0.17	0.87	1395.34
3012	3799.45	0.71	1.13	1393.65	9364	4416.12	0.84	0.84	1393.65
3079	3802.48	0.26	0.73	1395.33	9397	4419.80	0.50	0.94	1395.33
3107	3804.63	0.64	1.12	1395.33	9413	4422.31	0.94	0.68	1393.65
3518	3845.98	0.02	0.73	1393.65	9421	4423.30	0.12	0.77	1391.97
3535	3848.02	0.39	1.27	1393.65	9439	4425.30	0.48	1.04	1393.65
3940	3892.22	0.28	1.18	1393.65	9459	4426.94	0.77	0.93	1391.97
3965	3894.78	0.73	1.12	1393.65					

### 7.2.9 Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1404.43 \text{ \AA}$ )

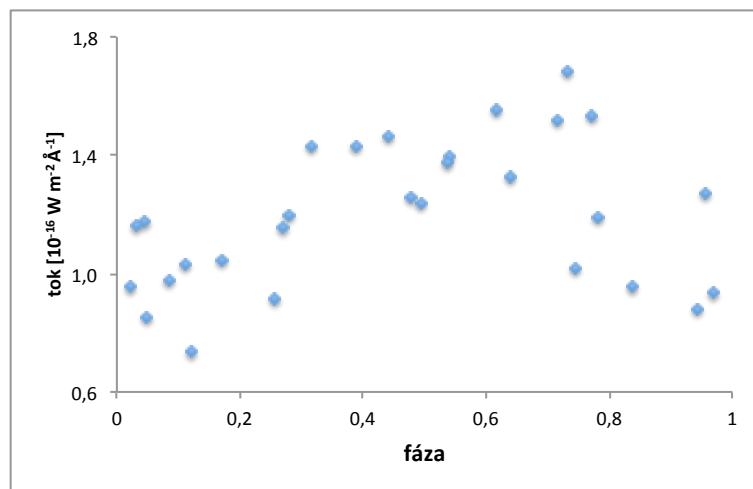


Graf 11: Graf závislosti maxima toku dubletu Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1404.43 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.9: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre dublet kremíku SI IV ( $\lambda_{\text{Si IV, max}} \approx 1404.43 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{\AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	2.17	1407.06	3966	3894.81	0.75	1.73	1403.71
1451	3629.92	0.44	1.97	1405.38	3989	3896.42	0.03	1.47	1403.71
1460	3630.90	0.62	2.13	1405.38	5178	4002.92	0.05	1.43	1403.71
1478	3632.88	0.97	1.66	1407.06	5181	4003.12	0.09	1.26	1403.71
1500	3636.07	0.54	1.89	1407.06	5183	4003.26	0.11	1.92	1405.38
1515	3638.91	0.05	1.68	1407.06	5475	4035.01	0.78	1.55	1405.38
1979	3701.76	0.27	1.70	1405.38	7784	4265.58	0.96	1.50	1402.04
2049	3708.86	0.54	1.63	1405.38	9340	4412.38	0.17	1.06	1403.71
3012	3799.45	0.71	1.84	1403.71	9364	4416.12	0.84	1.08	1403.71
3079	3802.48	0.26	1.04	1402.03	9397	4419.80	0.50	1.47	1402.03
3107	3804.63	0.64	1.43	1403.71	9413	4422.31	0.94	1.43	1407.06
3518	3845.98	0.02	1.42	1403.71	9421	4423.30	0.12	1.49	1407.06
3535	3848.02	0.39	1.44	1402.03	9439	4425.30	0.48	1.69	1405.38
3940	3892.22	0.28	1.57	1403.71	9459	4426.94	0.77	1.67	1403.71
3965	3894.78	0.73	1.78	1402.03					

### 7.2.10 Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1402.09 \text{ \AA}$ )

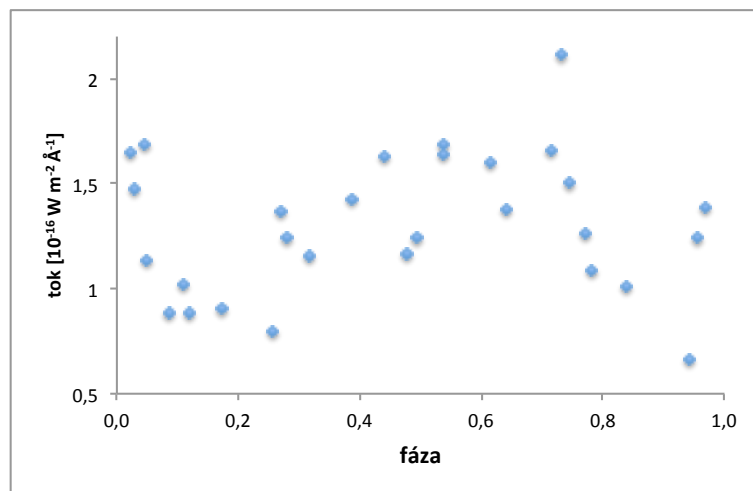


Graf 12: Graf závislosti minima toku dubletu Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1402.09 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.10: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre dublet kremíku Si IV ( $\lambda_{\text{Si IV, min}} \approx 1402.09 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [Å]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [Å]
1445	3629.23	0.32	1.43	1402.03	3966	3894.81	0.75	1.02	1400.35
1451	3629.92	0.44	1.47	1402.03	3989	3896.42	0.03	1.16	1402.03
1460	3630.90	0.62	1.55	1402.03	5178	4002.92	0.05	0.85	1400.35
1478	3632.88	0.97	0.93	1402.03	5181	4003.12	0.09	0.98	1402.03
1500	3636.07	0.54	1.40	1402.03	5183	4003.26	0.11	1.03	1402.03
1515	3638.91	0.05	1.17	1402.03	5475	4035.01	0.78	1.19	1402.03
1979	3701.76	0.27	1.16	1402.03	7784	4265.58	0.96	1.27	1403.72
2049	3708.86	0.54	1.38	1402.03	9340	4412.38	0.17	1.04	1402.03
3012	3799.45	0.71	1.52	1402.03	9364	4416.12	0.84	0.96	1400.35
3079	3802.48	0.26	0.91	1403.71	9397	4419.80	0.50	1.24	1403.71
3107	3804.63	0.64	1.32	1402.03	9413	4422.31	0.94	0.88	1402.03
3518	3845.98	0.02	0.95	1402.03	9421	4423.30	0.12	0.74	1402.03
3535	3848.02	0.39	1.43	1403.71	9439	4425.30	0.48	1.26	1400.35
3940	3892.22	0.28	1.20	1402.03	9459	4426.94	0.77	1.53	1402.03
3965	3894.78	0.73	1.68	1403.71					

### 7.2.11 C IV ( $\lambda_{\text{CIV,max}} \approx 1549.43 \text{ \AA}$ )

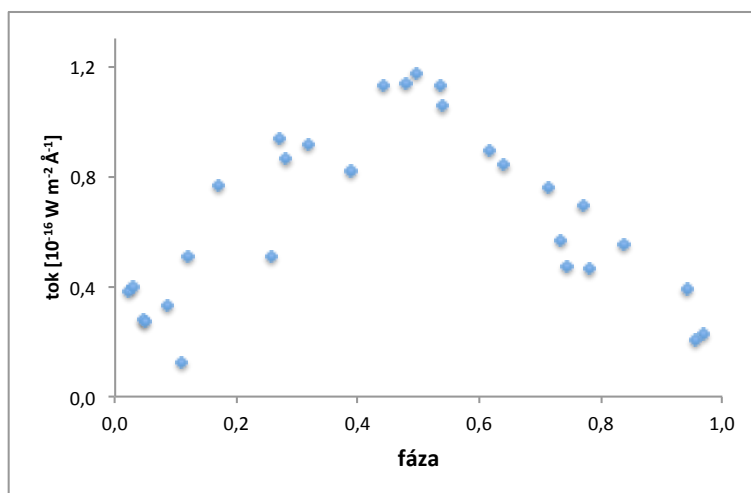


Graf 13: Graf závislosti maxima toku C IV ( $\lambda_{\text{CIV,max}} \approx 1549.43 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.11: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre uhlík C IV ( $\lambda_{\text{CIV,max}} \approx 1549.43 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok max [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [ $\text{ \AA}$ ]
1445	3629.23	0.32	1.16	1549.55	3966	3894.81	0.75	1.51	1549.55
1451	3629.92	0.44	1.63	1549.55	3989	3896.42	0.03	1.47	1549.55
1460	3630.90	0.62	1.60	1549.55	5178	4002.92	0.05	1.13	1549.55
1478	3632.88	0.97	1.39	1549.55	5181	4003.12	0.09	0.88	1549.55
1500	3636.07	0.54	1.68	1549.55	5183	4003.26	0.11	1.02	1549.55
1515	3638.91	0.05	1.69	1549.55	5475	4035.01	0.78	1.09	1549.55
1979	3701.76	0.27	1.37	1549.55	7784	4265.58	0.96	1.24	1547.89
2049	3708.86	0.54	1.64	1549.55	9340	4412.38	0.17	0.90	1549.55
3012	3799.45	0.71	1.66	1549.55	9364	4416.12	0.84	1.01	1549.55
3079	3802.48	0.26	0.79	1549.55	9397	4419.80	0.50	1.24	1547.87
3107	3804.63	0.64	1.37	1549.55	9413	4422.31	0.94	0.66	1549.55
3518	3845.98	0.02	1.65	1549.55	9421	4423.30	0.12	0.89	1549.55
3535	3848.02	0.39	1.43	1549.55	9439	4425.30	0.48	1.17	1549.55
3940	3892.22	0.28	1.25	1549.55	9459	4426.94	0.77	1.26	1549.55
3965	3894.78	0.73	2.12	1549.55					

### 7.2.12 C IV ( $\lambda_{\text{CIV, min}} \approx 1547.70 \text{ \AA}$ )



Graf 14: Graf závislosti minima toku C IV ( $\lambda_{\text{CIV, min}} \approx 1547.70 \text{ \AA}$ ) na fáze.

Tabuľka 7.12: Tabuľka použitých spektier s príslušným časom pozorovania a získaných hodnôt z analýzy spektier pre uhlík C IV ( $\lambda_{\text{CIV, min}} \approx 1547.70 \text{ \AA}$ ).

spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [Å]	spekt. SWP	HJD [d]	fáza	tok min [ $10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ \AA}$ ]	vlnová dĺžka [Å]
1445	3629.23	0.32	1.02	1547.87	3966	3894.81	0.75	1.12	1546.20
1451	3629.92	0.44	1.21	1546.12	3989	3896.42	0.03	1.19	1547.87
1460	3630.90	0.62	1.33	1547.87	5178	4002.92	0.05	0.91	1547.87
1478	3632.88	0.97	1.37	1547.87	5181	4003.12	0.09	0.54	1547.87
1500	3636.07	0.54	1.14	1547.87	5183	4003.26	0.11	0.61	1547.87
1515	3638.91	0.05	0.38	1547.87	5475	4035.01	0.78	0.80	1547.87
1979	3701.76	0.27	1.19	1547.87	7784	4265.58	0.96	0.68	1547.87
2049	3708.86	0.54	0.69	1547.87	9340	4412.38	0.17	1.18	1549.47
3012	3799.45	0.71	0.38	1547.87	9364	4416.12	0.84	0.85	1547.87
3079	3802.48	0.26	0.87	1546.20	9397	4419.80	0.50	0.82	1547.87
3107	3804.63	0.64	0.69	1547.87	9413	4422.31	0.94	1.17	1549.55
3518	3845.98	0.02	0.82	1547.87	9421	4423.30	0.12	0.39	1547.87
3535	3848.02	0.39	0.99	1547.87	9439	4425.30	0.48	1.39	1547.87
3940	3892.22	0.28	0.82	1547.87	9459	4426.94	0.77	0.70	1546.20
3965	3894.78	0.73	0.86	1546.20					



## 7.3 Diskusia

V grafoch závislosti toku spektrálnych čiar ultrafialového spektra dvojhviezdy Cyg X-1 je vidieť, že tok spektrálnych čiar Si IV a C IV je naozaj premenný. V ďalších grafoch, kde O je neutrálny a Si, C jedenkrát ionizovaný, je premennosť menej výrazný. Rozdiel v premennosti toku v spektrálnych čiarach je spôsobený hlavne tým, že Si IV a C IV vznikajú v hviezdnom vetre, ktorého rýchlosť straty hmoty sa môže líšiť v závislosti na fáze v dôsledku vplyvu druhej zložky, zatiaľ čo O I, Si II a C II vznikajú v hviezdnej atmosfére. Fáza 0.0 v jednotlivých grafoch zodpovedá pozície pozorovateľ, čierna diera a optická zložka a fáza 0.5 zodpovedá pozície pozorovateľ, optická zložka a čierna diera. V grafoch je tiež vidieť výrazná emisná čiara Lymanovej série vodíku (H I). Presný pôvod tejto čiary v Cyg X-1 nie je známy, ale je pravdepodobné, že táto čiara pochádza z geokoróny. Pre lepšiu priehľadnosť, a taktiež preto, aby sa jednotlivé spektrá navzájom neprekrývali, sme jednotlivé ultrafialové spektrá Cyg X-1 v grafe č.1 vzájomne posunuli.

# Záver

Predmetom tejto bakalárskej práce je štúdium premennosti ultrafialového spektra dvojhviezdy Cyg X-1 v závislosti na fáze obehu primárnej (optickej) zložky. V práci sme vychádzali hlavne z publikácie Treves a kol. z roku 1980. Spravili sme analýzu piatich spektrálnych čiar z 29 spektier nasnímaných družicou IUE v rokoch 1978–1980. Pri snímaní bol použitý detektor SWP s nízkym rozlíšením, ktorý pokrýva rozmedzie vlnových dĺžok 1 110–2 000 Å. Ku každému spektru sme najprv priradili fázu obehu optickej zložky.

Všetky spektrálne čiary boli identifikované v programe SPLAT-VO. Jednotlivé hodnoty tokov spektrálnych čiar v závislosti na fáze sme v tomto programe získali manuálne, odčítaním hodnôt príslušnej spektrálnej čiary v ultrafialových spektrách dvojhviezdy Cyg X-1. Následne sme získané hodnoty spracovali v programe MS Excel. V grafe č. 1 sú zobrazené všetky použité ultrafialové spektrá dvojhviezdy Cyg X-1, v ktorých sme odčítali hodnoty toku spektrálnych čiar. V rôznych grafoch závislosti toku spektrálnych čiar na fáze je rozdielna premennosť toku, čo je spôsobené rozdielnym pôvodom spektrálnych čiar, či už z hviezdnej atmosféry alebo z hviezdneho vetra.

# Literatúra

- [1] Reig, P.: *Be/X-ray Binaries*. Astrophysics and Space Science 332, s. 1, 2011.
- [2] Karino, S.: *Bimodality of Wind-fed Accretion in High Mass X-ray Binaries*. Astronomical Society of Japan 66, s. 2, 2014.
- [3] Slettebak, A.: *The Be Stars*. Astronomical Society of the Pacific 100, s. 770, 1988.
- [4] Harmanec, P. a kol.: *Binary Nature and Orbital Elements of  $\gamma$  Cas*. A&A 364, s. 85, 2000.
- [5] Colpi, M., Casella, P., Gorini, V., Moschella, U., Possenti, A.: *Physics of Relativistic Objects in Compact Binaries: From Birth to Coalescence*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2009.
- [6] Karitskaya, E. A.: *Multi-Technique Study of the X-Ray Binary Cygnus X-1*. IAU Symposium 282, s. 53, 2011.
- [7] Böhm-Vitense, E.: *Introduction to Stellar Astrophysics*. Vol. 3. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [8] Mikulášek, Z., Krtyčka, J.: *Základy fyziky hvězd*. Brno: skriptá MU, 2005.
- [9] Phillips, A. C.: *The Physics of Stars*. 2nd ed. Manchester: Wiley, 1999.
- [10] Ziółkowski, J.: *Black Hole Candidates*. Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics, s. 411, 2003.
- [11] Walsh, J. L., Barth, A. J., Ho, L. C., Sarzi, M.: *The M87 Black Hole Mass from Gas-dynamical Models of Space Telescope Imaging Spectrograph Observations*. ApJ 770, s. 86, 2013.

- [12] Ghez, A. M. a kol.: *Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits*. ApJ 689, s. 1044, 2008.
- [13] Mikulášek, Z.: *Fyzika horkých hvězd I*. Brno: skriptá MU, 2011.
- [14] Harmanec, P., Brož, M.: *Stavba a vývoj hvězd*. Praha: Matfyzpress, 2011.
- [15] Lamers, H. J. G. L. M., Cassinelli, J. P.: *Introduction to Stellar Winds*. New York: Cambridge University Press, 1999.
- [16] Gális, R.: *Základy astronómie a astrofyziky*. Košice: skriptá UPJS, 2014.
- [17] Bhat, M. a kol.: *Energetics of the Kerr-Newman Black Hole by the Penrose Process*. A&A 6, s. 85, 1985.
- [18] Reimers, D.: *On the Absolute Scale of Mass-loss in Red Giants*. A&A 61, s. 217, 1977.
- [19] Brocksopp, C. a kol.: *An Improved Orbital Ephemeris for Cygnus X-1*. A&A 343, s. 861, 1998.
- [20] Orosz, J. A. a kol.: *The Mass of the Black Hole in Cygnus X-1*. ApJ 742, s. 84, 2011.
- [21] Herrero, A. a kol.: *A Spectroscopic Analysis of HDE 226 868 and the Mass of Cygnus X-1*. A&A 297, s. 556, 1995.
- [22] Pfahl, E. a kol.: *A New Class of High-Mass X-Ray Binaries: Implications for Core Collapse and Neutron Star Recoil*. ApJ 574, s. 364, 2002.
- [23] Podsiadlowski, Ph. a kol.: *On the Formation and Evolution of Black Hole Binaries*. MNRAS 341, s. 385, 2003.

### Internetové zdroje

- [e1] <https://subatomicssoup.wordpress.com>
- [e2] <http://jto.s3.amazonaws.com/wp-content/uploads/2013/05/fe20130512rhb.jpg>
- [e3] <http://archive.stsci.edu/iue/about.html>
- [e4] <http://science.nasa.gov/missions/hst/>
- [e5] <http://www.lib.cas.cz/space.40/1990/INDEX1.HTM>

- [e6] <http://science.nasa.gov/missions/euve/>
- [e7] <http://www.lib.cas.cz/space.40/1992/INDEX1.HTM>
- [e8] <http://www.galex.caltech.edu/about/overview.html>
- [e9] <http://www.galex.caltech.edu/about/overview.html>
- [e10] <http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat-vo/sun243.ps>
- [e11] <http://www.oa.uj.edu.pl/research/cygx1.html>