



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Studium variability extragalaktických objektů

Eva Šinoglová

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Brno 2016

Bibliografický záznam

Autor: Eva Šinoglová
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Studium variability extragalaktických objektů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Akademický rok: 2015/2016

Počet stran: 52

Klíčová slova: aktivní jádra galaxií, blazar, světelná křivka,
chaos, fázový portrét

Bibliographic entry

Author: Eva Šinoglová
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of thesis: The study of variability in extragalactic objects

Degree programme: Physics

Field of study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2015/2016

Number of Pages: 52

Keywords: active galactic nuclei, blazar, light curve,
chaos, phase portrait

Poděkování

Ráda bych poděkovala Filipu Hrochovi, který poskytl mnoho cenných rad při zpracování a byl téměř vždy k dispozici. Dále bych chtěla poděkovat Viktoru Votrubovi za poskytnutí námětů a materiálů k problematice chaosu. Velké díky patří mému příteli za psychickou podporu a rady v programovací a L^AT_EX-ové sféře. Poděkování patří také mé rodině a všem přátelům, že na to se mnou měli nervy. Děkuji!

Some of the data presented in this paper were obtained from the Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST). STScI is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under NASA contract NAS5-26555. Support for MAST for non-HST data is provided by the NASA Office of Space Science via grant NNX09AF08G and by other grants and contracts.

This paper includes data collected by the Kepler mission. Funding for the Kepler mission is provided by the NASA Science Mission directorate.

Prohlášení

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

V Brně dne

Eva Šinoglová

Abstrakt:

Tato práce se zabývá studiem světelných křivek blazarů S5 0716+714 a W2R 1926+42. Pozorování blazaru S5 0716+714 proběhlo jednu noc, data k sestavení světelné křivky W2R 1926+42 byla získána z archivu MAST družice Kepler. V teoretické části se zabýváme dělením aktivních galaxií, jejich charakteristikami a mechanismy vzniku záření. Dále se zaměřujeme na fotometrii, fotometrické systémy a principem rekonstrukce fázového portréту. V praktické části se věnujeme zpracování napozorovaných a stažených dat, ve kterých následně hledáme znaky možného chaotického chování.

Abstract:

This thesis deals with light curves of two blazars S5 0716+714 and W2R 1926+42. The observation of the blazar S5 0716+714 took one night. The data needed to construct the light curve of the blazar W2R 1926+42 were obtained from archive MAST of the Kepler's spacecraft. The theoretical part concerns with sorting out active galaxies, their characteristics, and mechanisms of radiation. It also focuses on the photometrics, photometric systems, and the principle of the reconstruction of the phase portrait. The practical part is dedicated to the processing of observed and downloaded data and to the following search for signs of possible chaotic behaviour.



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2015/2016

Ústav: Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Studentka: Eva Šinoglová

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: Studium variability extragalaktických objektů

Téma práce anglicky: Time Variability Of Extragalactic Light Sources

Oficiální zadání:

Observační studie kvasarů a blazarů ukazují, že změny jejich jasů jsou dvojího typu. Pravděpodobně jde o důsledek různých fyzikálních procesů. Krátkodobé změny jasnosti (na škále hodin až dnů) při kterých se mění barva blazaru a dlouhodobé bez těchto změn. Úkolem této práce je získat více barevnou světelnou křivku vybraného objektu v průběhu jedné nebo více nocí a identifikovat tyto změny.

Jazyk závěrečné práce: čeština

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.


Datum zadání práce: 2. 11. 2015

V Brně dne: 17. 12. 2015

Souhlasím se zadáním (podpis, datum):


.....
Eva Šinoglová
studentka


.....
Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
vedoucí práce


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

Obsah

Úvod	9
1 Galaxie	10
1.1 Historie	10
1.2 Aktivní galaxie	11
1.2.1 Historie objevování AGN	11
1.3 Povaha aktivních galaxií	11
1.3.1 Rudý posuv	11
1.3.2 Černé díry	13
1.3.3 Akrece a vznik jetu	13
1.4 Dělení aktivních galaxií	15
1.4.1 Rádiové galaxie	15
1.4.2 Seyfertovy galaxie	16
1.4.3 LINERy	16
1.4.4 Kvazary	17
1.4.5 OVV kvazary	17
1.4.6 BL Lac	17
2 Mechanismy vzniku záření	19
2.1 Comptonův jev	19
2.2 Inverzní Comptonův jev	19
2.3 Cyklotronové záření	20
2.4 Synchrotronové záření	20
3 Fotometrie	22
3.1 Fotometrické veličiny	22
3.1.1 Intenzita	22
3.1.2 Svítivost	22
3.1.3 Osvětlení	22
3.1.4 Světelný tok	23
3.1.5 Tok záření ve filtru	23
3.2 Fotometrické systémy	24
3.2.1 Johnsonův–Morganův systém <i>UBV(RI)</i>	24
3.2.2 Strömgrenův systém <i>ubvy</i>	25
3.2.3 <i>JHKLM</i> systém	26
4 Chaos a chaotický systém	27
4.1 Rekonstrukce fázového portréту	27

5	Získání a zpracování dat	28
5.1	Volba objektu	28
5.2	Pořizování dat	29
5.3	Analýza dat	30
5.3.1	Histogram	30
5.3.2	Spline	30
5.3.3	Gaussovo rozdělení	30
5.3.4	Světelná křivka	31
5.4	Družice Kepler	43
5.4.1	Data z družice Kepler	43
	Závěr	49
	Literatura	50

Úvod

"Twinkle, twinkle quasi-star
Biggest puzzle from afar
How unlike the other ones
Brighter than a billion suns
Twinkle, twinkle, quasi-star
How I wonder what you are."

– George Gamow, "Quasar" 1964. [21]

Galaxie jsou nejpozoruhodnějšími vesmírnými útvary, které můžeme pozorovat a zároveň nad nimi žasnout. Jsou tak různorodé a velkolepé. Vždyť i my se nacházíme uvnitř jedné z nich, jedné z mnoha dalších. Jak malí jsme ve srovnání s nimi. Tyto a podobné myšlenky se nejspíše vyjevily prvním pozorovatelům těchto vesmírných ostrovů. Postupem času a značnému technologickému pokroku bylo možné je detailněji studovat. Stále však nepřestáváme žasnout. Již bylo učiněno mnoho objevů v této galaktické „sféře“ a snad jich ještě více v budoucnosti čeká.

V následující práci se budeme orientovat na aktivní galaxie, jejich historii, fyzikální povaze a členěním do jednotlivých skupin. Dále se budeme snažit analyzovat a popsat chování dvou vybraných galaxií.

Kapitola 1

Galaxie

1.1 Historie

Galaxie odjakživa patřily a dodnes patří k jednomu z nejzářivějších objektů v celém viditelném vesmíru.

Mezi prvními astronomy, kteří se jimi soustavně zabývaly, byl i Charles Messier (1730–1817) [20]. Sestavil katalog (Messierův katalog [17]) tzv. mlhovinných objektů. Mezi těmito objekty nebyly pouze galaxie, ale i jiné „plynné“ objekty, u kterých se Messier mylně domníval, že jde rovněž o galaxie. Dalším astronomem, který se jimi zabýval, byl William Herschel (1792–1871) následován svým synem sirem Johnem Herschelem (1792–1871), autorem katalogu mlhovin a hvězdokup. V neposlední řadě bychom měli zmínit J. L. E. Dreyera, který vytvořil vlastní katalog galaxií – New General Catalogue (zkráceně NGC). Při jeho tvorbě vycházel z Herschelova katalogu. NGC obsahoval kromě galaxií i mlhoviny a hvězdokupy. Až s příchodem Williama Parsonse a jeho tehdy největšího dalekohledu, vyvstala otázka povahy těchto vesmírných struktur. Díky detailnějšímu pozorování bylo možné odhalit jejich spirální charakter.

Dlouho po té následovala Velká debata, týkající se povahy již zmíněných mlhovinných struktur. Hlavními účastníky byly Harlow Shapley z observatoře na Mount Wilsonu a Heber D. Curtis z Lickovy observatoře.

Počátek sporu mezi astronomy sahá do roku 1918, kdy Harlow Shapley díky pulzujícím proměnným hvězdám zjistil vzdálenosti asi 90 kulových hvězdokup. Na základě tohoto měření předpokládal, že hvězdokupy tvoří kostru Galaxie jejíž střed odpovídá samotnému centru hvězdné soustavy. Centrum této soustavy se mělo nacházet poblíž souhvězdí Střelce (cca 15 kpc). Učinil rovněž odhad celkového rozměru Galaxie, který činil kolem 100 kpc v průměru.

Na druhé straně Heber D. Curtis obhajoval tzv. Kapteynův model Galaxie. Tento model představoval soustavu zploštělých sféroidů se zvolna klesající hustotou hvězd směrem k centru. Galaxie měla rozměry $8500 \text{ pc} \times 1700 \text{ pc}$ a Slunce se nacházelo poblíž středu soustavy.[13]

Nicméně Shapley byl toho názoru, že Galaxie je přinejmenším o řád větší než tvrdí Kapteynův model a v tomto případě tak Galaxie představuje celý vesmír. Velká debata však nebyla rozhodnuta ve prospěch žádného z uvedených modelů.

Velkým posunem v poznávání okolního vesmíru byl objev Edwina Hubblea, který roku 1923 pozoroval na observatoři Mount Wilson nejbližší galaxie a rozlišil v nich i jednotlivé hvězdy. Mezi těmito hvězdami byly také Cefeidy a vzhledem ke známému

vztahu mezi periodou jejich pulzace a absolutní hvězdnou velikostí se Galaxie rázem „přemístily“ do vzdáleností stovek kpc od nás.

Neméně známým astronomem byl i Jan Oort, který dokázal, že samotná Galaxie rotuje. Zjistil to na základě vzájemných pohybů Slunce a okolních hvězd, které se pohybovaly po soustředných kružnicích, jejich střed rotace ležel poblíž souhvězdí Střelce.

Nyní máme tedy jasnější obraz o minulosti zkoumání naší Galaxie. Dále se zaměříme na specifický druh galaxií – aktivní galaxie.

1.2 Aktivní galaxie

Světlo galaxií v optickém oboru spektra je vyzařováno zejména hvězdami v dané galaxii. Toto záření může být aproximováno Planckovým spektrem, které odpovídá červeným hvězdám s teplotami kolem 2000 K.

Naproti tomu existují galaxie, které mají odlišné spektrum a září více například v rádiové oblasti, v rentgenové oblasti apod. Toto spektrum ale není hvězdného původu. Jeho zdrojem je centrum galaxie – malé kompaktní aktivní jádro, z toho plyne i jejich označení AGN – z anglického active galactic nuclei.

Aktivní galaxie jsou velmi různorodé, liší se jak ve vzhledu spekter, tak i ve své svítivosti.

1.2.1 Historie objevování AGN

První doloženou aktivní galaxií byla NGC 1068 (galaxie v souhvězdí Velryby) objevena Carlem Seyfertem roku 1943. Byl jedním z mála astronomů, který se systematicky zabýval tímto druhem galaxií (galaxie tohoto typu označujeme dodnes jako Seyfertovy galaxie).

Dalším pokrokem bylo vytvoření 3C a 3CR [24] katalogů kolem roku 1960. Jedná se o přehledky rádiových zdrojů severní oblohy ($\delta > -22^\circ$). V roce 1963 Thomas Matthews a Allan Sandage zjistili, že jeden z rádiových zdrojů (3C48) jeví hvězdě podobnou strukturu. Ve stejném roce Maarten Schmidt identifikoval rádiový zdroj 3C273 jako bodový zdroj s emisními čarami na neobvyklých vlnových délkách. Díky všem objevům byly souhrnně podobné zdroje nazvány kvazary (quasi-stellar radio source – hvězdě podobný rádiový zdroj).

1.3 Povaha aktivních galaxií

V této části se budeme zabývat charakteristickými vlastnostmi a jevy, které u aktivních galaxií nejčastěji pozorujeme.

1.3.1 Rudý posuv

Víme, že světlo je velmi důležitou informací, kterou jsme schopni detekovat a následně „přečíst“. Ale samotná interpretace získané informace může být zavádějící. Světlo ze vzdálených zdrojů prochází mnohými změnami, jako například posunem vlnové délky.

Zpravidla rozlišujeme dva posuvy. Modrý posuv (tj. posuv ke kratším vlnovým délkám) nám říká, že se k nám daný objekt přibližuje, zatímco rudý posuv značí, že se objekt od nás vzdaluje.

Obecný vztah pro rudý posuv má podobu

$$z = \Delta\lambda/\lambda_0, \quad (1.1)$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, \quad (1.2)$$

kde λ značí detekovanou vlnovou délku a λ_0 laboratorně naměřenou vlnovou délku daného záření.

Dopplerův jev

Tento jev pozorujeme v astronomii velmi často. Princip souvisí rovněž se změnou vlnové délky (či frekvence) detekovaného záření oproti záření emitovanému. Dává do souvislosti posun vlnové délky (frekvence) a radiální rychlost sledovaného objektu. Vlnová délka a frekvence jsou ve vztahu $\nu = c/\lambda$, kde c značí rychlost světla.

Vztah pro radiální rychlost pohybujícího se zdroje má tvar

$$v = c \cdot z, \quad (1.3)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}, \quad (1.4)$$

kde v je radiální rychlost zdroje a c je rychlost světla. Vztah můžeme použít jen v případě rychlostí mnohem menších než je rychlost světla ($v \ll c$). Jinak platí relativistický vztah

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}, \quad (1.5)$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že pro libovolně velké z nikdy nedosáhneme rychlosti světla c .

Gravitační rudý posuv

Někdy se také používá název Einsteinův posuv [26]. Můžeme jej vysvětlit tak, že emitované fotony pohybující se ven z gravitačního pole, ztrácí část své energie a tím snižují svou frekvenci (prodlužují vlnovou délku). Naopak když se fotony blíží k objektu se silným gravitačním polem (např. k černé díře), jejich frekvence se zvýší (zkrátí vlnovou délku). Vztah pro tento posuv

$$z = \frac{1}{2} \frac{r_s}{R} = \frac{GM}{c^2 R}, \quad (1.6)$$

kde r_s je Schwarzschildův poloměr, R vzdálenost mezi středem objektu, vytvářejícím gravitační pole, a místem emise fotonu, M je hmotnost objektu, G je gravitační konstanta [26].

Kosmologický rudý posuv

Kosmologický rudý posuv je způsoben expanzí vesmíru. Vlnová délka emitovaných fotonů se prodlužuje k červené části spektra s tím, jak se rozpíná prostor. Opět můžeme

říci, že číselná hodnota rudého posuvu ukazuje, jak rychle se od nás konkrétní objekt vzdaluje

$$v = H_0 D, \quad (1.7)$$

$$1 + z = H_0 D / v, \quad (1.8)$$

kde H_0 je Hubbleova konstanta, D je vzdálenost galaxie od nás, v je rychlost vzdalování (dané galaxie), z je posun vlnové délky.

Hubbleova konstanta má hodnotu $H(t) = (71 \pm 7) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ [42]. Její převrácená hodnota udává Hubbleův čas t_H

$$t_H = 1/H(t), \quad (1.9)$$

$$t_H = 4,55 \cdot 10^{17} \text{ s} = 14,4 \cdot 10^9 \text{ let.} \quad (1.10)$$

Hubbleův čas nám říká, jak by byl vesmír starý, pokud by jeho expanze probíhala lineárně [25].

1.3.2 Černé díry

Obecně je černá díra řešením Einsteinovy teorie obecné relativity, která popisuje gravitační pole bodového objektu [23]. Jde o natolik hmotný a kompaktní objekt, že nic neunikne jeho gravitačnímu působení, včetně světla.

Většina galaxií kolem nás má ve svém centru černou díru (zkráceně BH). Aktivní galaxie mají ve svém centru také černou díru – supermasivní černou díru (SMBH). Pro srovnání hvězdné černé díry dosahují hmotností řádově desítek hmotností Slunce, supermasivní galaktické černé díry mohou dosahovat hmotností v řádech stovek až tisíců hmotností Slunce.

Schwarzschildův poloměr

Je pojmenován po Karlu Schwarzschildovi (1873–1916), který našel řešení pro Einsteinovy rovnice pole. Dle tohoto řešení je černá díra hmota, koncentrovaná do rozměru menšího, než je Schwarzschildův poloměr r_s .

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} = 3 \cdot 10^5 \text{ cm} \frac{M}{M_\odot} \quad (1.11)$$

kde c značí rychlost světla.

1.3.3 Akrece a vznik jetu

V okolí černé díry se nachází množství částic plynu, který vytváří kolem černé díry disk vlivem působení jejího gravitačního pole. Materiál ale nepadá na černou díru přímo kvůli jeho nenulovému momentu hybnosti.

Důsledkem pohybu a tření mezi částicemi disku se jeho teplota výrazně zvyšuje. V závislosti na vzdálenosti od černé díry, má disk v různých částech různou teplotu (částice na vnitřních drahách se pohybují rychleji, než ty na vnějších drahách). Tření vede ke zmenšování rotační rychlosti a tak se částice zvolna pohybují blíže k černé

díře. Důkazem toho jevu je záření vycházející z akrečního disku. Emitované záření je detekováno v různých oborech elektromagnetického spektra: infračerveném oboru, rádiovém oboru atd.

Můžeme říci, že akreční disky jsou energeticky dopovány díky uvolněné potenciální energii akreující hmoty. S ohledem na viriálový teorém [8] se celková uvolněná energie přemění na rotační kinetickou energii a na vnitřní energii dle vztahu

$$2 \langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = 0, \quad (1.12)$$

$$\langle U \rangle = \langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = \frac{1}{2} \langle E_p \rangle = -\langle E_k \rangle. \quad (1.13)$$

Nejjednodušším modelem akrece je *sférická akrece*, kdy je černá díra sféricky obklopena hmotou. Částice jsou přitahovány k centru a zahřívány na velmi vysokou teplotu. Část energie se tak vyzáří. Účinnost tohoto mechanismu je však velmi malá a vzhledem k pozorováním tento způsob akrece nemůžeme považovat jako dostatečný zdroj záření u AGN. Jde tedy pouze o idealizovaný model.

Vznik jetu

Mějme model, kdy se kolem černé díry utvoří značně tlustý akreční disk se strmými vnitřními stěnami. Tyto strmé stěny akreující hmoty vytvářejí kolem osy rotace černé díry jakýsi dvojitý „trychtýř“. Převážná část energie je vyzařována vnitřními stěnami tohoto útvaru (zde dochází k mnohonásobným absorpcím, rozptylům a reemisím fotonů). Výsledné záření disku bude silně neizotropní a většina záření bude emitována v úzkých kuželech podél rotační osy.

Již víme, že okolo rotující hmota nepadá na černou díru přímo. Dopadne-li však hmota na černou díru, je vysokou rychlostí vyvržena do prostoru. Vznikají tak mohutné výtrysky – jety. Proudění takto ionizovaného plynu a vysokoenergetických částic vylétávají v obou protilehlých směrech podél rotační osy černé díry. Směr proudů a záření je tak pevně a dlouhodobě svázán s touto osou [32].

Nadsvětelný pohyb

Vypracováno na základě zdroje [10].

Dalším důkazem, potvrzující existenci černé díry v centru aktivní galaxie, je pozorovaný nadsvětelný pohyb. Výsledky získané z projektu VLBI (Very Long Baseline Interferometry)[33] to potvrzují. Jedná se o rozpor mezi vysokou rychlostí pohybujícího se jetu a konečnou rychlostí světla.

Řekněme, že bod v jetu se pohybuje rychlostí v a směrem od jádra se pohybuje jet pod úhlem ϕ od směru našeho pohledu viz. obr. 1.1. V čase $t = 0$ je jet nejbližší jádru, v čase $t = t_e$ je jet ve vzdálenosti $v t_e$ od původní pozice. Kolmá vzdálenost jetu od jádra vzhledem k pozorovateli je

$$\Delta r = v t_e \sin(\phi). \quad (1.14)$$

Zřejmě v čase $t = t_e$ je jet k pozorovateli mnohem blíže, než tomu bylo v pozici s časem $t = 0$. Světlo tak potřebuje daleko méně času, aby k pozorovateli dospělo. Tedy fotony emitované v časech $t = 0$ a $t = t_e$ detekujeme v časovém rozmezí

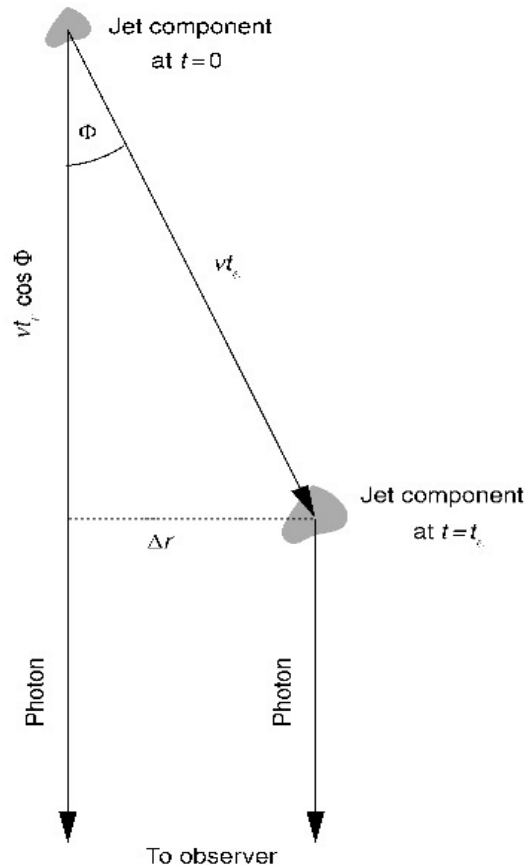
$$\Delta t = t_e - \frac{v t_e \cos(\phi)}{c} = t_e (1 - \beta \cos(\phi)), \quad \beta = \frac{v}{c}. \quad (1.15)$$

Toto časové rozmezí je však kratší než čas t_e . Zdánlivá rychlost, kterou naměříme je

$$v_z = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{v \sin(\phi)}{1 - \beta \cos(\phi)}. \quad (1.16)$$

Tato rychlost je relativní a závisí na směru pohybu objektu a směru pozorovatelova pohledu na studovaný systém.

Uvažujme například velikost rychlosti jetu $v = 0,9c$, úhel $\phi = 15^\circ$ a rychlost světla $c \doteq 3 \cdot 10^8 \text{ km s}^{-1}$. Po dosazení do vztahu 1.16 získáme velikost zdánlivé rychlosti $v_z \doteq 1,8c$!



Obrázek 1.1: Nadsvětelný pohyb [10]

1.4 Dělení aktivních galaxií

1.4.1 Rádiové galaxie

Jedná se zejména o eliptické galaxie, jejichž jádra vysílají nejvíce záření v blízké rádiové oblasti. Tyto galaxie dělíme dle šířky emisních čar. Galaxie s širokými emisními čarami ve spektru označujeme BLRG (Broad-Line Radio Galaxy) a s úzkými emisními čarami NLRG (Narrow-Line Radio Galaxy).

1.4.2 Seyfertovy galaxie

Tyto aktivní galaxie poprvé pozoroval Karl Keenan Seyfert roku 1943. Jedná se většinou o spirální a nepravidelné galaxie. Galaxie vysílají elektromagnetické záření ve viditelném i rentgenovém oboru. Vyskytují se i galaxie s nepříliš rozeznatelnými rádiovými výtrysky.

Seyfertovy galaxie můžeme rozdělit do několika skupin. **Seyfert 1** jsou typické svými úzkými a širokými emisními čarami ve spektru. Dále typ **Seyfert 2**, u kterých nalézáme zejména úzké emisní čáry. Místa vzniku širokých emisních čar bývají často stíněna diskem látky kolem jádra galaxie. Tedy při pohledu do roviny disku nám široké emisní čáry zcela zmizí.

Příkladem galaxie typu S2 může být galaxie Circinus v souhvězdí Kružítko.



Obrázek 1.2: Galaxie Circinus [34]

1.4.3 LINERy

Podobnými objekty, jako jsou Seyfertovy galaxie, jsou tzv. LINERy (Low-Ionization Nuclear Emission-Line Regions). U těchto galaxií pozorujeme spektrální čáry slabě ionizovaných až neutrálních atomů kyslíku, dusíku a síry. Zástupcem tohoto typu je například galaxie Sombrero (M 104).

1.4.4 Kvazary

Počátkem šedesátých let dvacátého století bylo provedeno několik pozorování rádiových zdrojů, jejichž protějšky byly v optickém oboru přisuzovány hvězdám s výrazným červeným posuvem. Pokud by červený posuv byl způsoben kosmologickým rozpínáním vesmíru, muselo by jít o extrémně zářivé zdroje srovnatelné s galaxiemi.

Kvazary jsou velmi vzdálené galaktické objekty. Název kvazary byl odvozen z toho, že v běžných optických dalekohledech se jeví jako bodové objekty podobné hvězdám, tedy z anglického quasi-stellar radio source – hvězdě podobný rádiový zdroj.

Kvazarů v těchto dnech známe přes 200 000, jejich červený posuv se pohybuje v intervalu 0,056 až 7,085. Co se týče jejich vzdálenosti, nejvíce je jich zaznamenáno a popsáno díky přehlídkovému projektu SDSS – Sloan Digital Sky Survey (cca 120 000 kvazarů) a rozmezí vzdáleností je mezi 600 miliony až téměř 3 miliardami světelných let. Se vzrůstající vzdáleností se díváme na mladší a mladší struktury a my tak můžeme sledovat kvazary v jejich dřívějších vývojových fázích [27].

Kvazary dělíme do dvou základních skupin, *Rádiově tiché kvazary* – (radio quiet quasars) a *rádiově hlasité kvazary* – (radio loud quasars).

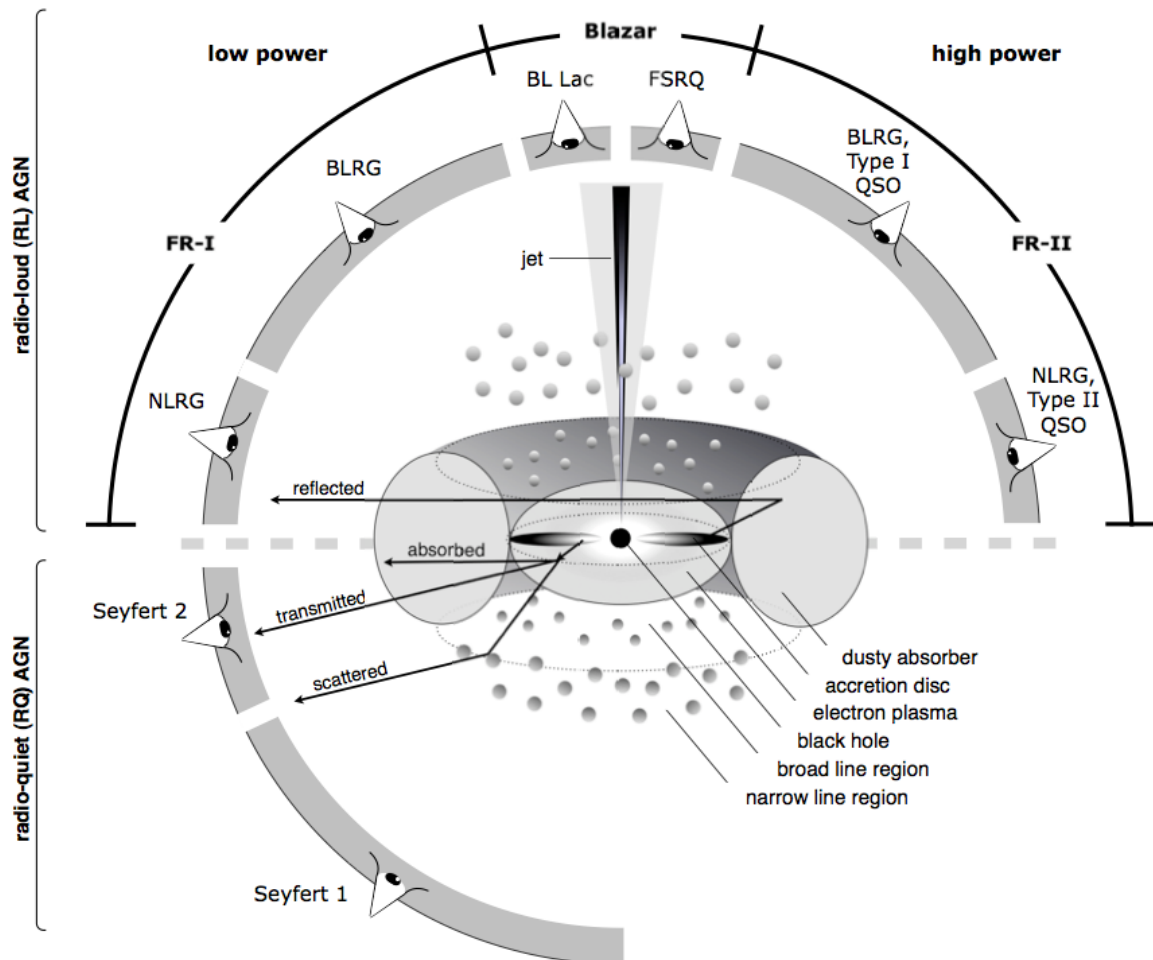
1.4.5 OVV kvazary

Podskupinou kvazarů jsou OVV kvazary neboli Optically Violently Variable quasars. Tyto galaxie jsou charakterizovány výraznými a velmi rychlými změnami v optické části spektra. Světelný tok se může značně měnit v řádech pouhých dnů. Mezi jejich další vlastnosti patří vysoká polarizace emitovaného záření a silné emise v rádiovém oboru.

1.4.6 BL Lac

Hlavním představitelem této skupiny galaxií je objekt BL Lacetae, zkráceně BL Lac. U těchto aktivních galaxií pozorujeme zejména proměnnost v optické části spektra a vysokou polarizaci vycházejícího záření. Dále se objevuje proměnnost v rádiové oblasti a také v oblasti gama záření. Tyto změny jsou připisovány synchrotronové emisi z relativistického výtrysku (jetu).

OVV kvazary a objekty BL Lac bývají souhrnně označovány jako *blazary*. Název vznikl spojením slov BL Lac a quasar – blazar.



Obrázek 1.3: Schéma aktivních galaxií [15]

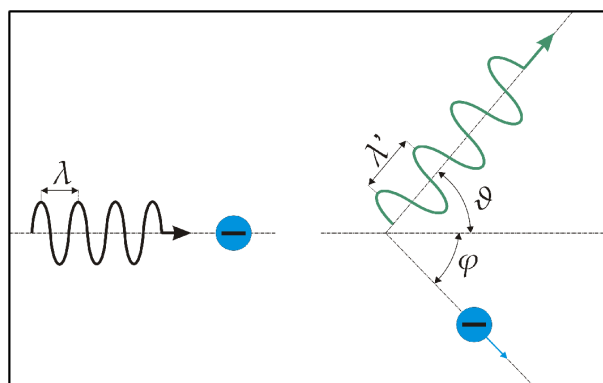
Kapitola 2

Mechanismy vzniku záření

Převážná většina informací, které získáváme z okolního vesmíru, k nám přichází v podobě elektromagnetického záření. Toto záření nám může sdělit mnoho o tom, jaké fyzikální podmínky panují v místě jeho vzniku.

2.1 Comptonův jev

Comptonův jev neboli Comptonův rozptyl sledujeme v případě, kdy se foton rozptýlí na elektronu (nezáleží na tom, zda jde o elektron volný nebo vázaný). Důležité je, že foton při srážce nezaniká, jako je tomu u fotoelektrického jevu. Foton tedy předá část své energie a hybnosti elektronu, tím se sníží energie fotonu a vlnová délka se prodlouží. Směr pohybu elektronu a fotonu se také změní. Při srážce platí zákon zachování energie a hybnosti.



Obrázek 2.1: Schéma Comptonova rozptylu [35]

2.2 Inverzní Comptonův jev

Jde o jev opačný ke Comptonovu rozptylu. V tomto procesu jsou relativistické elektrony rozptylovány na nízkoenergetických fotonech. Fotony o frekvenci ν mají po srážce s elektronem o energii $\gamma m_e c^2$ frekvenci $\nu' \approx \gamma^2 \nu$, tedy vyšší energii než před srážkou. γ označuje Lorentzův faktor (viz. 2.3).

2.3 Cyklotronové záření

Jedná se o druh brzděného záření, které emitují nabitě částice v magnetickém poli. Při pohybu částic v tomto poli na ně působí Lorentzova síla, která zakřivuje jejich trajektorie – pohybují se po šroubovici. V obou případech je osa rotace pohybu částic rovnoběžná s vektorem magnetické indukce. Při takovémto spirálovitém pohybu nabitých částic dochází k jejich brždění a elektrony emitují cyklotronové záření.

Cyklotronové záření pozorujeme hlavně u elektronů. Kvůli své nízké hmotnosti mohou být urychlovány na vysoké rychlosti a při kruhovém pohybu mají tedy i největší radiální zrychlení. U dalších nabitých částic (protonů a pod.) je toto záření také detekováno, nicméně nemá takovou intenzitu jako u elektronů.

2.4 Synchrotronové záření

Záření je vysíláno rovněž pohybujícími se elektrony. V tomto případě jsou urychlovány na tak vysoké rychlosti, že pozorujeme relativistické jevy. Emitované záření je fokusováno do kuželu ve směru pohybujících se elektronů. Vzniklé záření má na rozdíl od cyklotronového spojitě spektrum. Detekujeme jej hlavně v rádiové oblasti a často je lineárně polarizováno.

Energie elektronu je dána vztahem

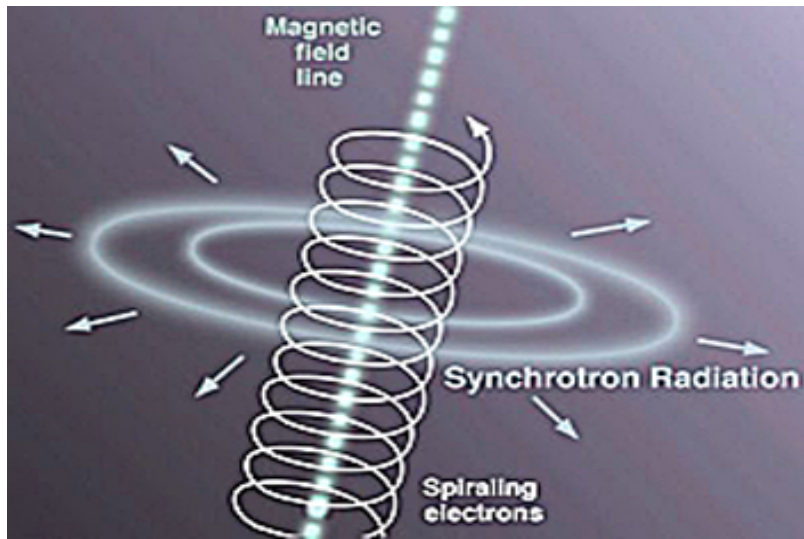
$$E = \gamma m_e c^2, \quad (2.1)$$

charakteristická frekvence při emisi je

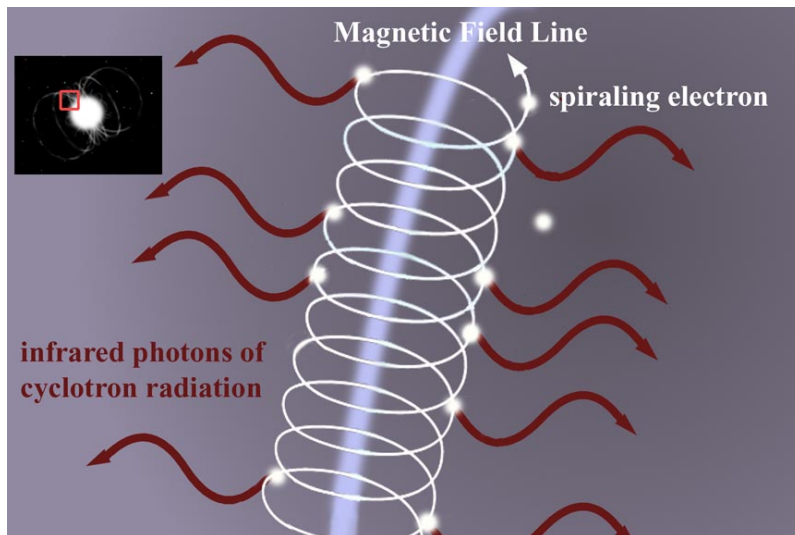
$$\nu_c = \frac{3\gamma^2 e B}{4\pi m_e c} \sim 4,2 \cdot 10^6 \gamma^2 \left(\frac{B}{1\text{G}} \right) \text{ Hz}, \quad (2.2)$$

kde B značí magnetickou indukci, e je náboj elektronu, m_e je hmotnost elektronu a γ je Lorentzův faktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}. \quad (2.3)$$



Obrázek 2.2: Synchrotronové záření [39]



Obrázek 2.3: Cyklotronové záření [40]

Kapitola 3

Fotometrie

Název fotometrie je odvozen ze dvou latinských slov *fotos* – světlo a *metron* – měřit. Fotometrie je odvětvím optiky, které se v astronomii využívá na analýzu a měření zářivé energie přicházející z vesmírných objektů.

3.1 Fotometrické veličiny

3.1.1 Intenzita

Intenzitu záření I definujeme jako energii přenesenou elektromagnetickou vlnou, která projde za jednotku času jednotkovou plochou v prostoru. Její jednotkou je $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$.

3.1.2 Svítivost

Svítivost bodového zdroje je podíl části světelného toku $d\Phi$ vyslaného z bodového zdroje v určeném směru do malého prostorového úhlu $d\Omega$ steradiánu

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}. \quad (3.1)$$

Pro izotropní zdroj záření platí

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}. \quad (3.2)$$

Jednotkou je kandela $[\text{cd}]$ a jde také o základní jednotkou soustavy SI. Definice: 1 kandeles odpovídá svítivost zdroje, který vysílá v daném směru monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz a jehož intenzita v tomto směru je $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$; $1 \text{ cd} = [\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}]$.

3.1.3 Osvětlení

Veličina osvětlení je definována jako podíl světelného toku k velikosti plochy, na kterou dopadá

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad (3.3)$$

Osvětlení závisí i na úhlu, pod kterým světlo dopadá na plochu S . Element prostorového úhlu si můžeme vyjádřit jako

$$d\Phi = \frac{dS}{r^2}, \quad (3.4)$$

$$E = \frac{d\Phi}{d\Omega r^2}. \quad (3.5)$$

Pro osvětlení dopadající kolmo na plochu

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (3.6)$$

zahrnutím úhlu α můžeme vztah přepsat do tvaru

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (3.7)$$

kde I je svítivost, α je úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou k ploše, na níž záření dopadá, r vzdálenost zdroje od plochy. Jednotkou osvětlení je lux [lx], [lx] = [lm · m⁻²].

Výše uvedené jednotky jako *lux*, *kandela* a *lumen* jsou definovány vzhledem k jejich působení na lidské oko (přibližně odpovídá citlivosti filtru V).

3.1.4 Světelný tok

Světelný tok F můžeme definovat jako podíl zářivého výkonu a plochy (pro bodový zdroj)

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}, \quad (3.8)$$

Obecně platí

$$F = \int I d\Omega, \quad (3.9)$$

kde $d\Omega$ je část prostorového úhlu.

3.1.5 Tok záření ve filtru

Vypracováno na základě zdroje [6]

Fotometrické filtry se omezují na určitou část elektromagnetického spektra. Je to dáno zejména propustností atmosféry, citlivostí detektoru apod.

Tyto filtry můžeme charakterizovat propustností $t(\lambda)$, která závisí na vlnové délce a je definována jako poměr mezi prošlým a dopadajícím zářením

$$t(\lambda) = \frac{F_{\text{out}}(\lambda)}{F_{\text{in}}(\lambda)}, 0 \leq t(\lambda) \leq 1. \quad (3.10)$$

Filtry jsou dále popsány dvěma parametry a to efektivní vlnovou délkou a efektivní šířkou filtru. Efektivní vlnová délka λ_0 (pro obecný filtr)

$$\lambda_0 = \frac{1}{T} \int_0^\infty t(\lambda) \lambda d\lambda, \quad (3.11)$$

efektivní šířka filtru

$$(\Delta\lambda)^2 = \frac{1}{T} \int_0^\infty t(\lambda) (\lambda - \lambda_0)^2 d\lambda, \quad (3.12)$$

kde T označuje normovací podmínku

$$T = \int_0^\infty t(\lambda) d\lambda. \quad (3.13)$$

Vzhledem k omezenému množství energie, které máme k dispozici, by měla být plocha pod filtrem konečná

$$\int_0^\infty t(\lambda) d\lambda < \infty. \quad (3.14)$$

Záření které projde filtrem $t(\lambda)$ od zdroje s normovaným spektrem na jednotku vlnové délky $F_\lambda(\lambda)$

$$F = \int_0^\infty F_\lambda(\lambda) t(\lambda) d\lambda, \quad (3.15)$$

kde $t(\lambda)$ má smysl pravděpodobnosti průchodu záření o dané vlnové délce přes určený filtr.

3.2 Fotometrické systémy

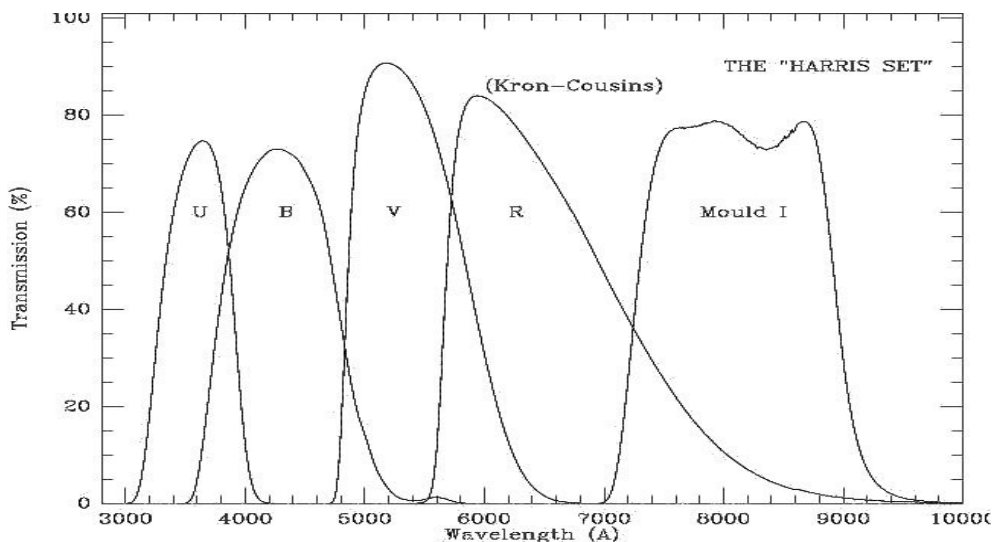
V astronomii používáme fotometrické systémy ke zjištění a změření, jak září určitý kosmický objekt. Systémy jsou určeny speciálními filtry s definovaným pásmem propustnosti, které v závislosti na vlnové délce detekovaného světla jej propouští přímo k detektoru.

Fotometrické systémy rozdělujeme do tří skupin podle šířky pásma propustnosti na širokopásmové, středněpásmové a úzkopásmové systémy. *Širokopásmové* systémy (například systém *UBVRI*) pokrývají kolem 100 nm v každém filtru, *středněpásmové* (např. *ubvy* systém) s pásmy od 10 do 30 nm a *úzkopásmové* systémy s propustností v řádech jednotek nm, propouštějících jen velmi malou část z elektromagnetického spektra. Uvedeme si nejpoužívanější systémy.

3.2.1 Johnsonův–Morganův systém *UBV(RI)*

Tento systém se skládá ze tří širokopásmových filtrů a to *U* (300 nm–420 nm) s maximem propustnosti na 365 nm, *B* (360 nm–500 nm) s maximem ve 440 nm a *V* (460 nm–740 nm) s maximem v 550 nm. Filtry *R* a *I* s maximem propustnosti na 720 nm a 900 nm byly přidány mnohem později.

Dále byly zavedeny barevné indexy ($U - B$), který zahrnuje atmosférickou extinkci a ($B - V$) z něhož můžeme zjistit teplotu sledovaného objektu. Nulový barevný index i počátek tohoto systému byl stanoven pro hvězdu *Vegu* (α Lyrae).



Obrázek 3.1: Johnsonův–Morganův systém [31]

Filtr	λ_0 [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
<i>U</i>	365	70
<i>B</i>	440	100
<i>V</i>	550	90
<i>R</i>	720	220
<i>I</i>	900	240

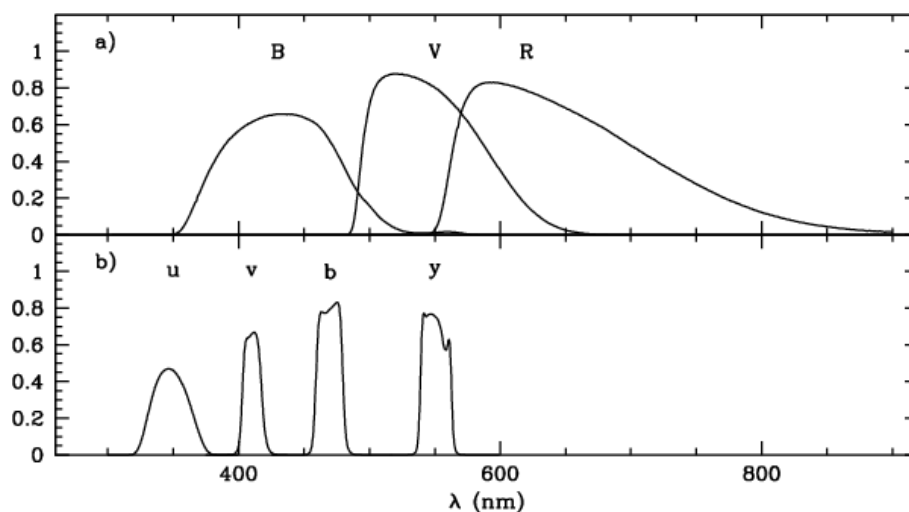
Tabulka 3.1: Charakteristiky Johnsonova–Morganova systému [11]

3.2.2 Strömgenův systém *ubvy*

Jedná se o středněpásmový systém. Tento systém překonává některé nedokonalosti Johnsonova systému, jako například menší výskyt absorpčních čar ve spektru poblíž 550 nm. Naopak šířka filtrů je dána tak, aby propustnost atmosféry byla v daných pásmech co možná nejvyšší.

Filtr	λ_0 [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]
<i>u</i>	350	34
<i>v</i>	410	20
<i>b</i>	470	16
<i>y</i>	550	24

Tabulka 3.2: Charakteristiky Strömgenova systému [11]



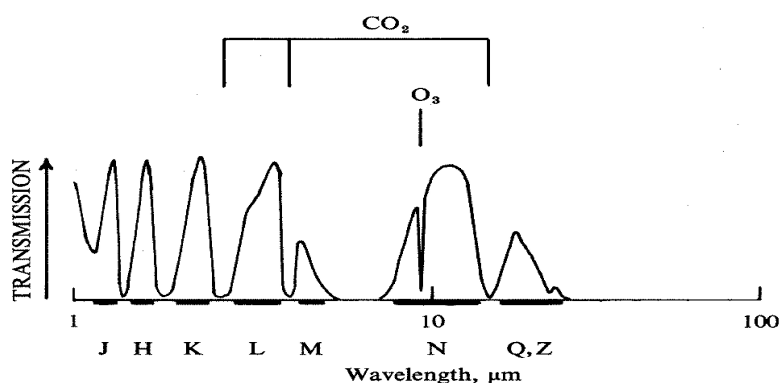
Obrázek 3.2: Srovnání propustnosti systémů *BVR* a *uvby* [41]

3.2.3 *JHKLM* systém

Jedná se o systém s filtry s pásmem propustnosti v infračervené oblasti spektra. V těchto pásmech je atmosféra také velmi dobře propustná. Nulový barevný index tohoto infračerveného systému byl stanoven rovněž pro hvězdu Vega (α Lyrae).

Filtr	λ_0 [μm]	$\Delta\lambda$ [nm]
<i>J</i>	1,25	380
<i>H</i>	1,65	480
<i>K</i>	2,20	700
<i>L</i>	3,50	1200
<i>M</i>	4,80	5700

Tabulka 3.3: Charakteristiky *JHKLM* systému [11]



Obrázek 3.3: Infračervený systém *JHKL* [30]

Kapitola 4

Chaos a chaotický systém

Vysvětlit pojem chaos bychom mohli následovně: jde o dlouhodobé aperiodické chování v deterministickém systému, který vykazuje velkou míru citlivosti vůči počátečním podmínkám.[7]

Deterministický systém je systém, jehož budoucí chování je plně určeno počátečními podmínkami. Tedy náhodnost budoucích stavů systému vzhledem k počátečním podmínkám je zcela vyloučena. I menší odchylka od těchto podmínek postupně přerůstá v exponenciální odchylky.

Vývoj dynamického systému můžeme popsat pomocí fázového prostoru, prostor obecných souřadnic x_i a hybností p_i . Vyvíjí-li se systém v čase, ve fázovém prostoru se objevuje křivka (spojitý čas) nebo množina bodů (diskrétní čas). Tento útvar nazýváme atraktor (*attract* – přitahovat). Jedná-li se o uzavřenou křivku, jde o periodické změny v systému. [2]

4.1 Rekonstrukce fázového portréту

Problematikou rekonstrukce fázového portréту se zabývá Takensův teorém. Ten říká, že dynamický chaotický systém může být zrekonstruován ze série pozorování určitého stavu tohoto systému při vhodně zvolené dimenzi vnoření. Z teorému dále vyplývá, že ke správnému zkonstruování portréту postačí splnění podmínky pro dimenzi vnoření K : $K \geq (2M + 1)$, kde M je dimenze prostoru [2]. Tedy k rekonstrukci postačí znalost časového zpoždění τ a dimenze vnoření.

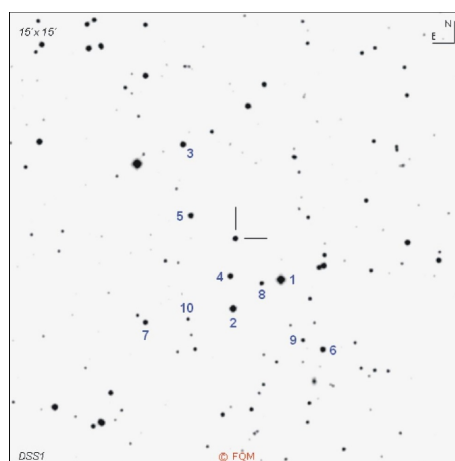
Rekonstrukci můžeme provést podobným způsobem z časové řady jako je popsáno v článku [19]. Veličiny z této řady odpovídají veličinám stavovým. Další veličiny (souřadnice) získáme tak, že dané časové zpoždění budeme experimentálně zvětšovat koeficienty z předem zadaného intervalu hodnot. Hledané souřadnice budou $(x_i, x_{i-\tau}, x_{i-2\tau}, \dots, x_{i-N\tau})$, kde N je příslušný koeficient z intervalu ($N = 1, 2, \dots$) a τ je časové zpoždění.

Kapitola 5

Získání a zpracování dat

5.1 Volba objektu

Blazar s označením S50716 + 714 je jedním z nejpozorovanějších blazarů. Nachází se v souhvězdí Žirafy (cirkumpolární souhvězdí). Souřadnice pozorovaného blazaru jsou $\alpha = 07^{\text{h}} 21^{\text{m}} 53,448^{\text{s}}$, $\delta = +71^{\circ} 20' 36,36''$. Jde o velmi aktivní blazar, který jeví variabilitu v řádech hodin až dnů.



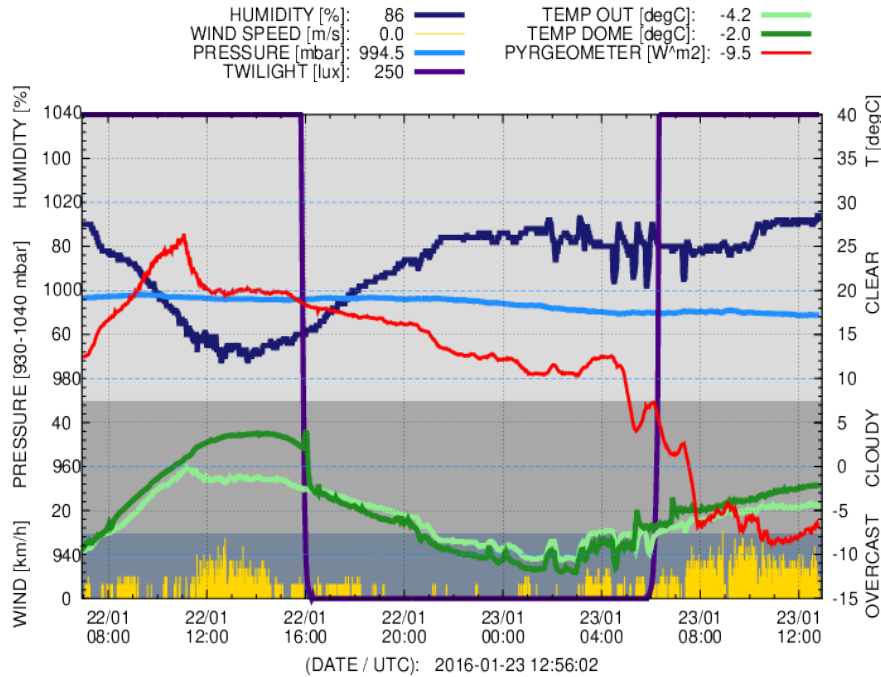
Obrázek 5.1: Snímek hvězdného pole blazaru a srovnávacích hvězd [29]

Hvězda	B	V	R
1	$11,54 \pm 0,01$	$10,99 \pm 0,02$	$10,63 \pm 0,01$
2	$12,02 \pm 0,01$	$11,46 \pm 0,01$	$11,12 \pm 0,01$
3	$13,04 \pm 0,01$	$12,43 \pm 0,02$	$12,06 \pm 0,01$
4	$13,66 \pm 0,01$	$13,19 \pm 0,02$	$12,89 \pm 0,01$
5	$14,15 \pm 0,01$	$13,55 \pm 0,02$	$13,18 \pm 0,01$
6	$14,24 \pm 0,01$	$13,63 \pm 0,02$	$13,26 \pm 0,01$
7	$14,55 \pm 0,01$	$13,74 \pm 0,02$	$13,32 \pm 0,01$
8	$14,70 \pm 0,01$	$14,10 \pm 0,02$	$13,79 \pm 0,02$

Tabulka 5.1: Hvězdné velikosti srovnávacích hvězd v jednotlivých filtrech [29]

5.2 Pořizování dat

Pozorování vybraného blazaru S5 0716+714 proběhlo v noci z 22. 1. na 23. 1. 2016 na observatoři Masarykovy univerzity (MUO) na Kraví Hoře v Brně. K pozorování byl použit 62 cm zrcadlový dalekohled typu Newton, ohnisková vzdálenost dalekohledu je 2,78 m s paralaktickou montáží. Dále CCD kamera G2-4000 s *UBVRI* filtry.



Obrázek 5.2: Meteogram

UTC	vlhkost vzduchu [%]	venkovní teplota [°C]
17:00	65	-3,0
18:00	69	-4,0
19:00	73	-4,7
20:00	76	-5,5
21:00	78	-6,9
22:00	82	-8,5
23:00	83	-9,0
00:00	83	-9,2
01:00	84	-10,4
02:00	82	-8,5
03:00	82	-10,5
04:00	80	-7,4
05:00	80	-7,7

Tabulka 5.2: Meteodata

5.3 Analýza dat

5.3.1 Histogram

Graficky zobrazuje rozdělení četností hodnot spojité veličiny v příslušných intervalech. Výšku sloupce udává četnost naměřené veličiny v daném intervalu.

5.3.2 Spline

V případě naměřených hodnot bylo nutné data proložit spline křivkou. Spline sestává z aproximační polynomicke funkce, která je spojitá a obecně má spojité derivace v koncových bodech zadaného intervalu. Při prokládání křivky se snažíme o minimalizaci následující podmínky

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\mu}(x_i))^2 + \lambda \int_{x_1}^{x_n} \hat{\mu}''(x)^2 dx, \quad (5.1)$$

kde Y_i označuje hodnoty napozorovaných dat ($i = 1, 2, \dots, n$), $\hat{\mu}(x_i)$ je funkční hodnota a $\hat{\mu}''(x)$ je druhá derivace funkce [43].

Volbou λ řídíme míru přilehlosti funkce. Při volbě $\lambda \rightarrow 0$ prochází křivka všemi vynešenými body, při volbě $\lambda \rightarrow \infty$ se změní spline funkce na obyčejnou funkci polynomu 1. řádu (druhá derivace bude rovna 0).

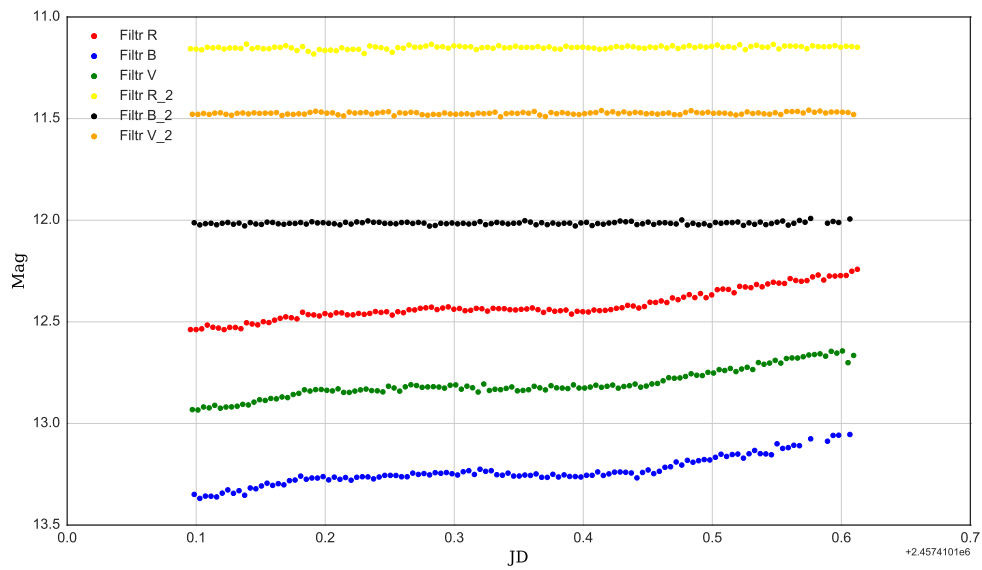
5.3.3 Gaussovo rozdělení

Gaussovo nebo také normální rozdělení je rozdělení spojité náhodné veličiny. Tedy zastoupení hodnot této veličiny je dáno Gaussovou funkcí [35]. Gaussova funkce má tvar

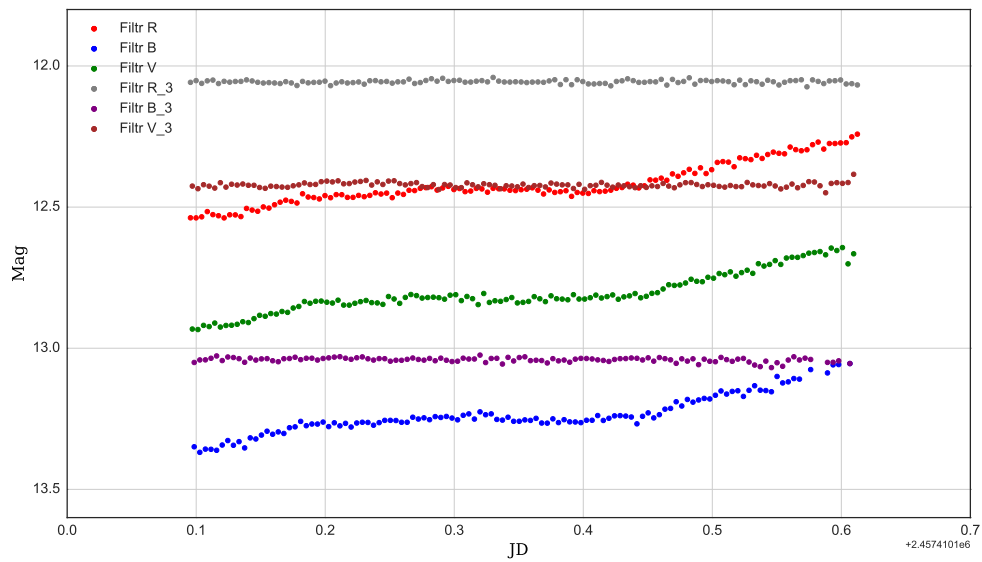
$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.2)$$

kde μ je střední hodnota a funkce zde nabývá svého extrému, σ^2 je rozptyl a udává šířku křivky v inflexním bodu této křivky.

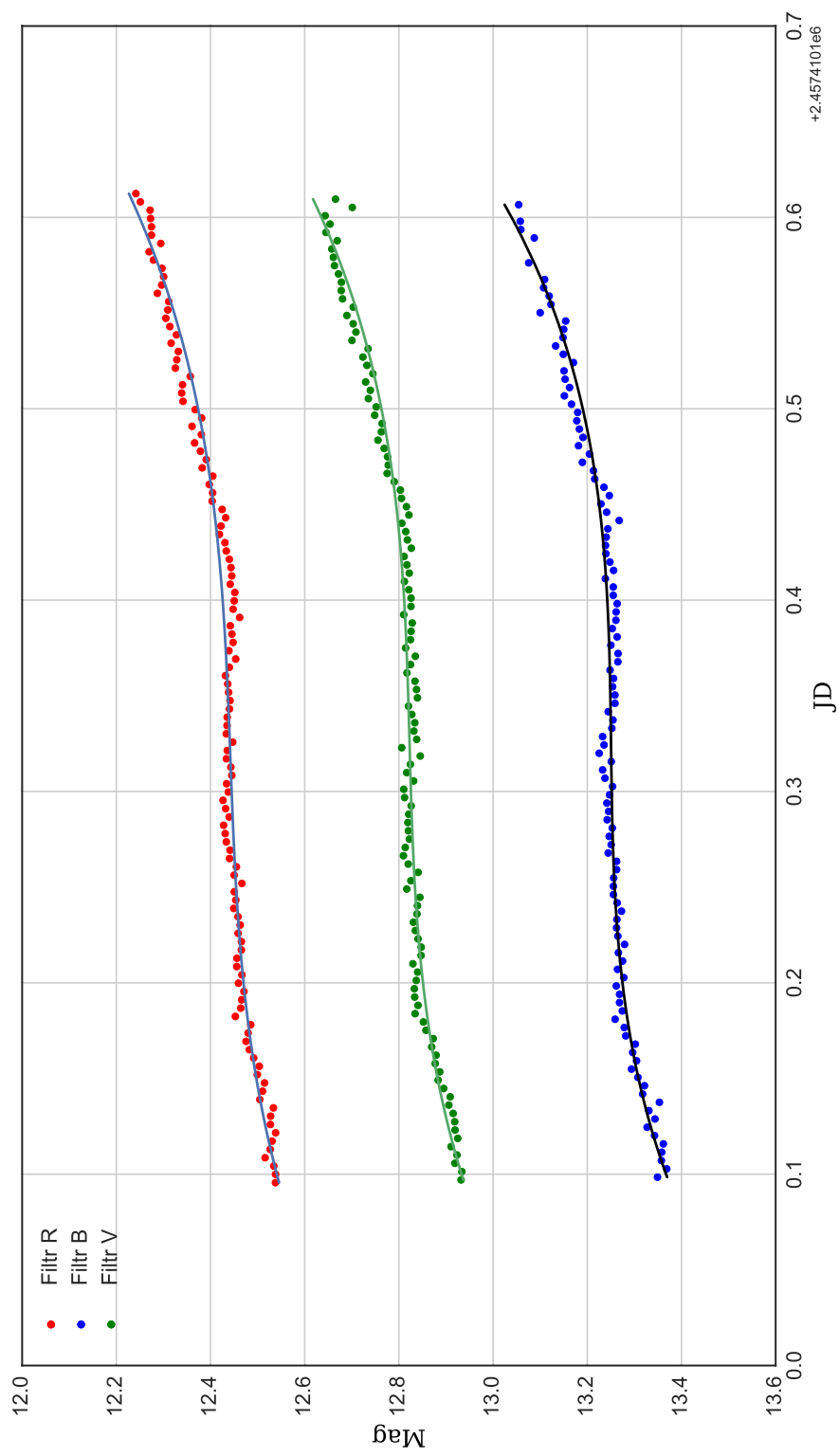
5.3.4 Světelná křivka



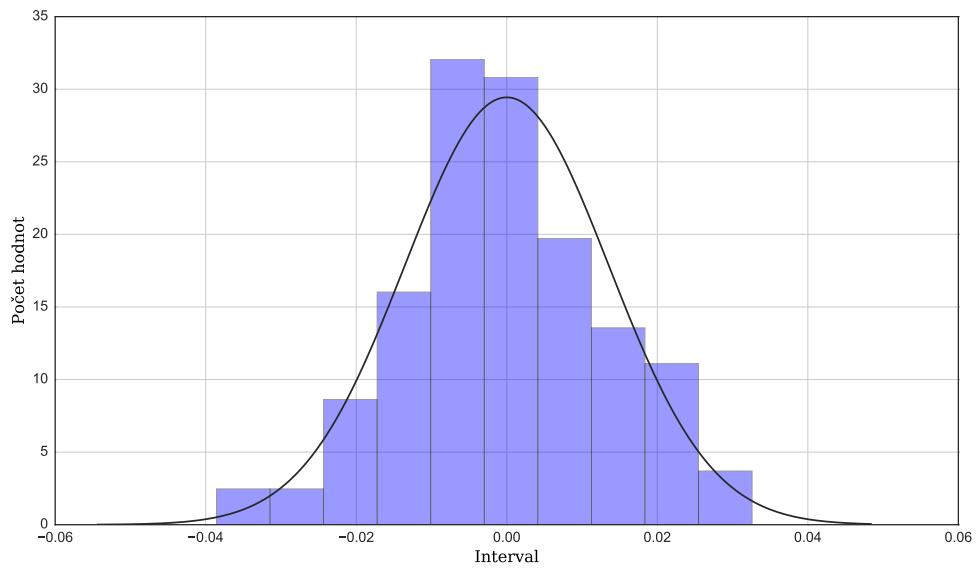
Obrázek 5.3: Světelná křivka blazaru a 2. porovnávací hvězdy



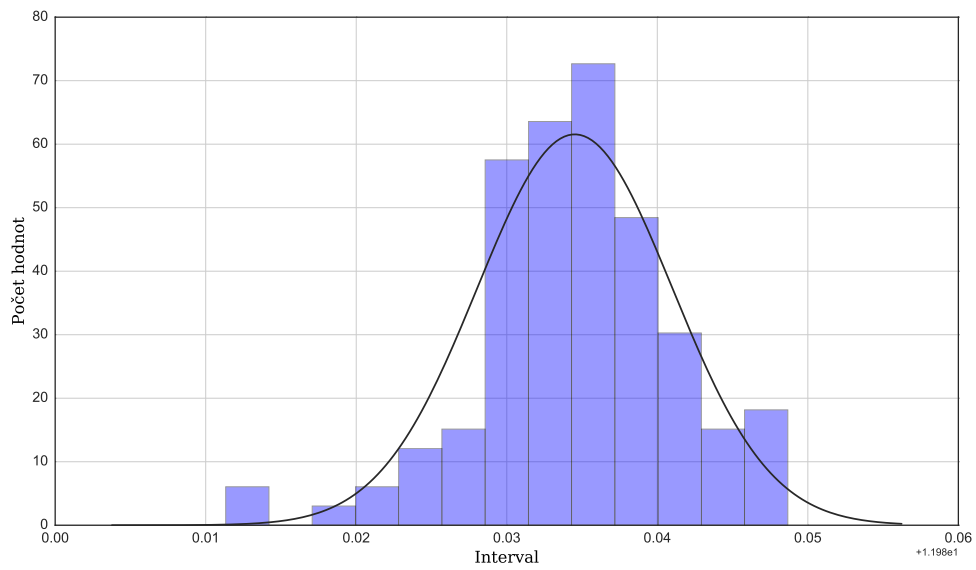
Obrázek 5.4: Světelná křivka blazaru a 3. porovnávací hvězdy



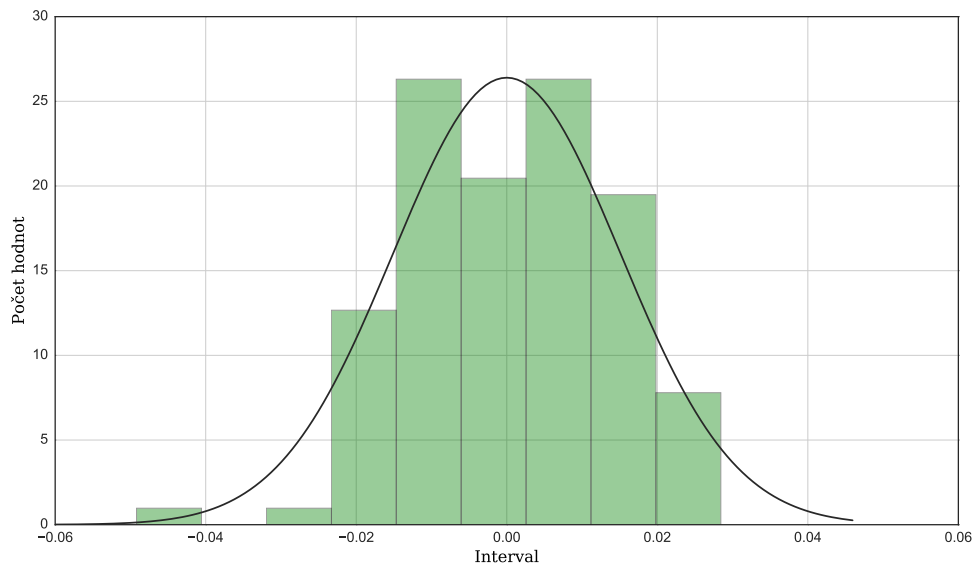
Obrázek 5.5: Proložení dat spline funkcí ve filtrech B , V a R



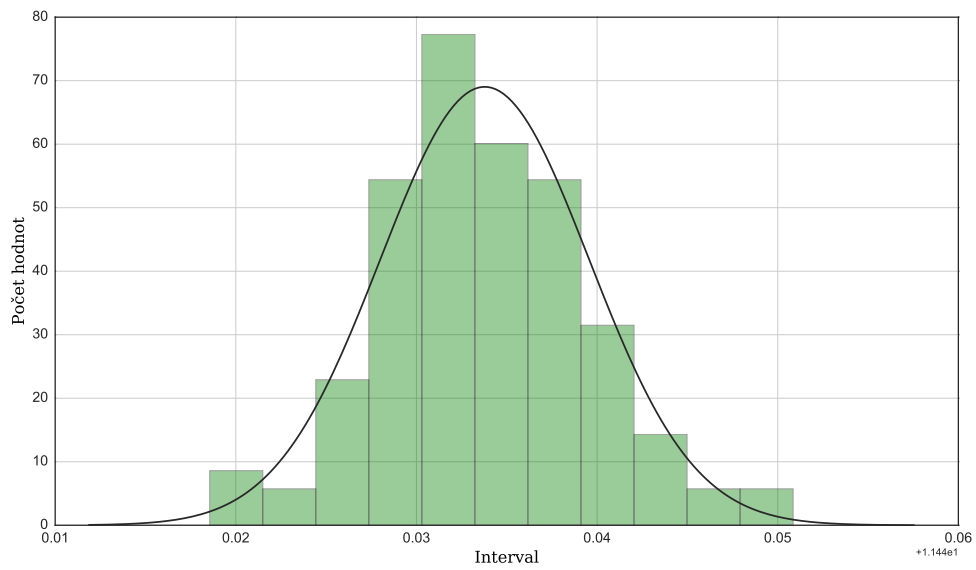
Obrázek 5.6: Histogram rozdílu toku z blazaru ve filtru B a proložené funkce spline



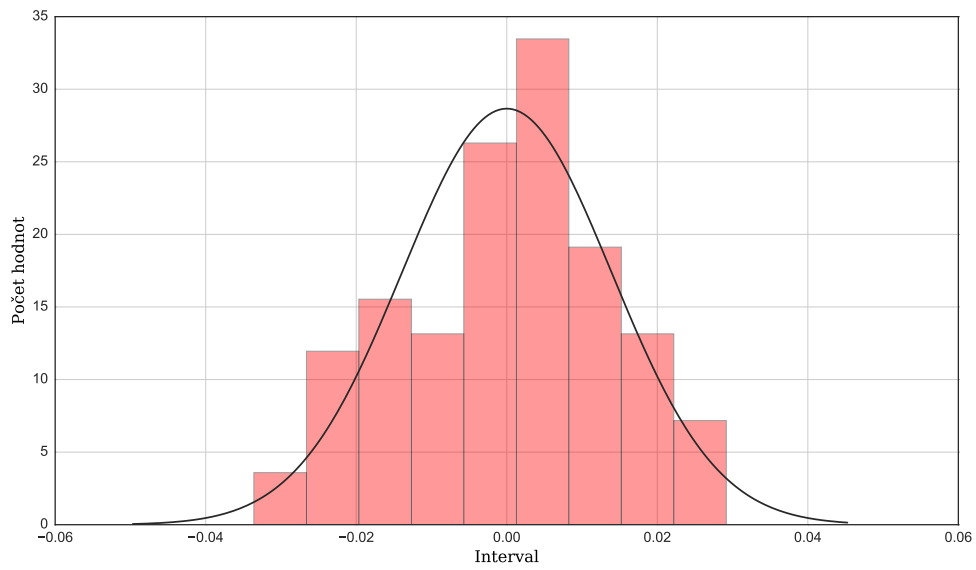
Obrázek 5.7: Histogram toku z 2. srovnávací hvězdy ve filtru B



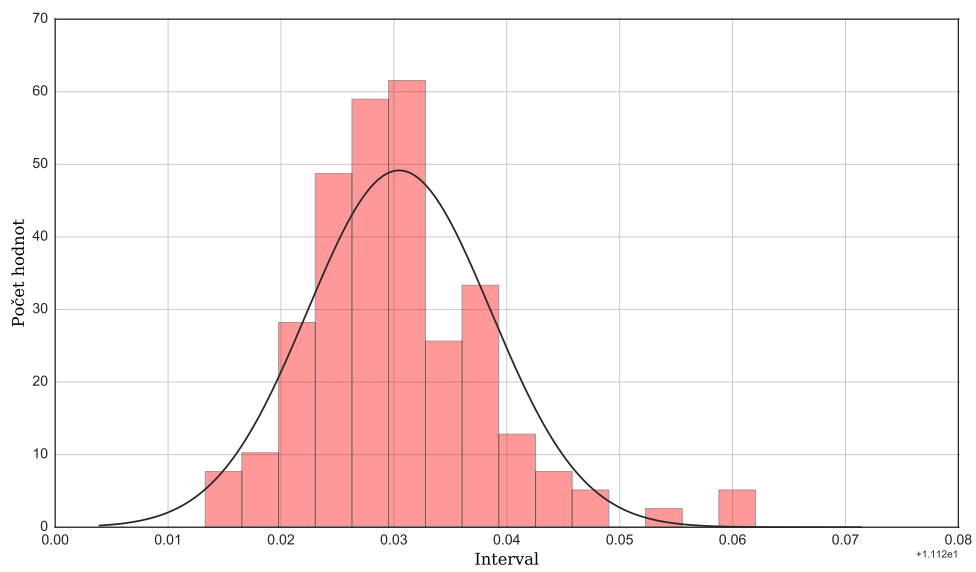
Obrázek 5.8: Histogram rozdílů toku z blazaru ve filtru V a proložené funkce spline



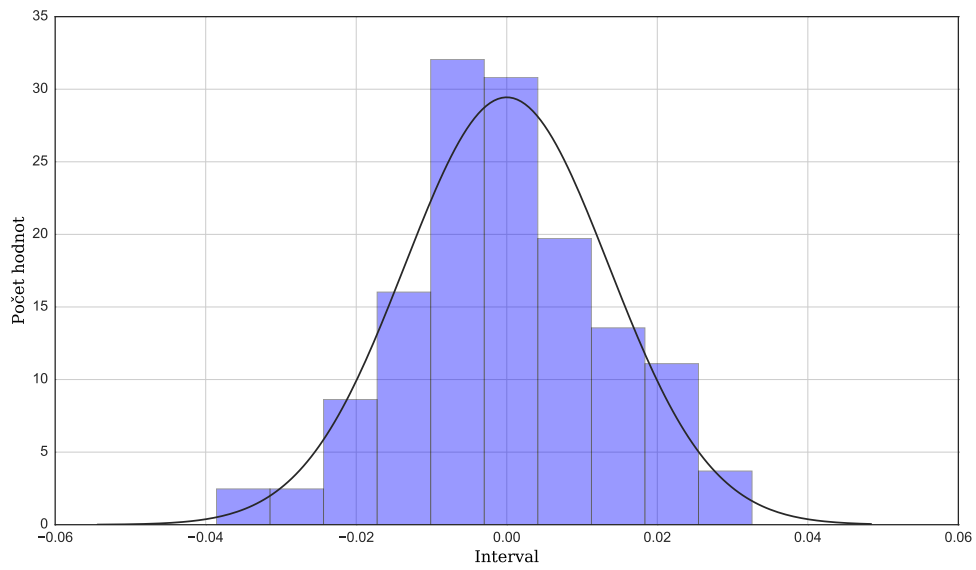
Obrázek 5.9: Histogram toku z 2. srovnávací hvězdy ve filtru V



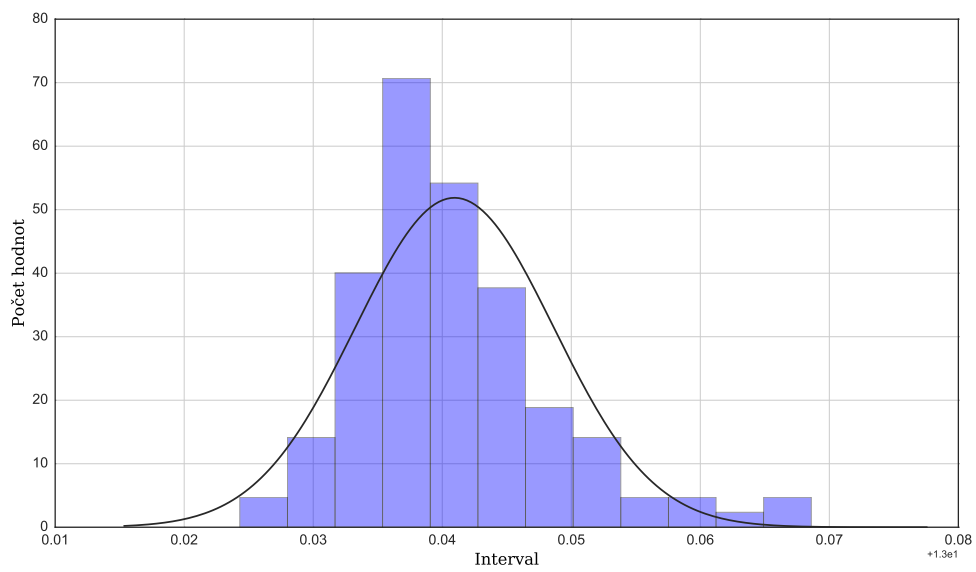
Obrázek 5.10: Histogram rozdílu toku z blazaru ve filtru R a proložené funkce spline



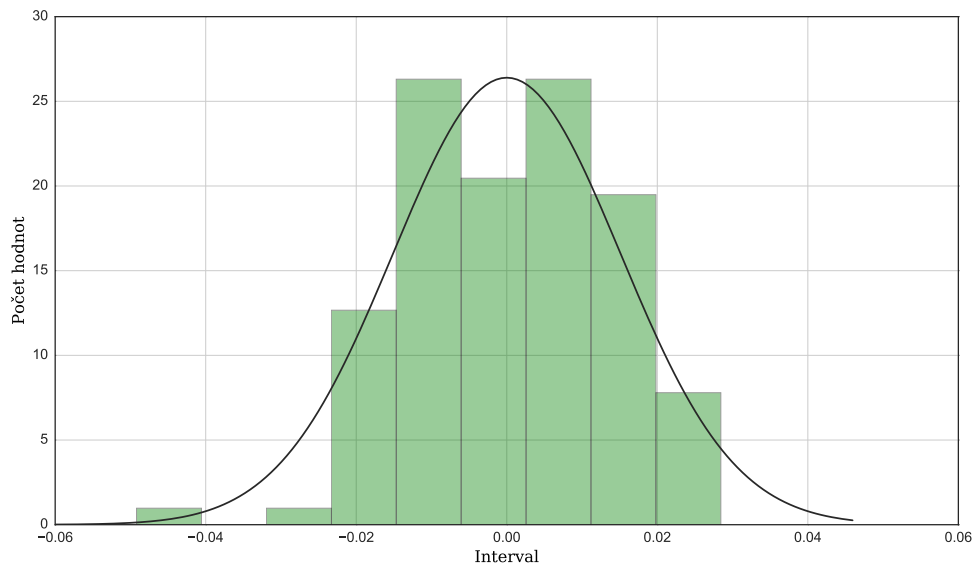
Obrázek 5.11: Histogram toku z 2. srovnávací hvězdy ve filtru R



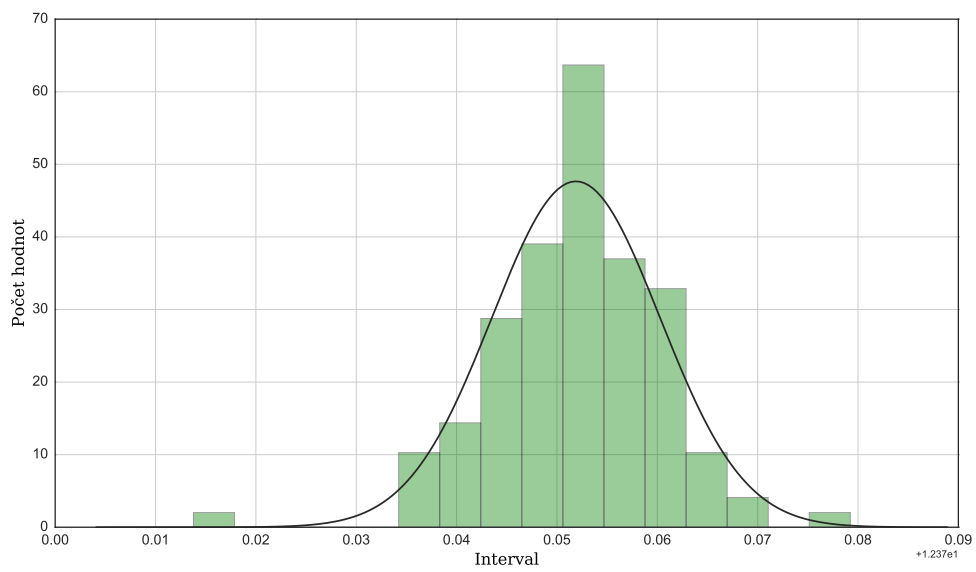
Obrázek 5.12: Histogram rozdílu toku z blazaru ve filtru B a proložené funkce spline



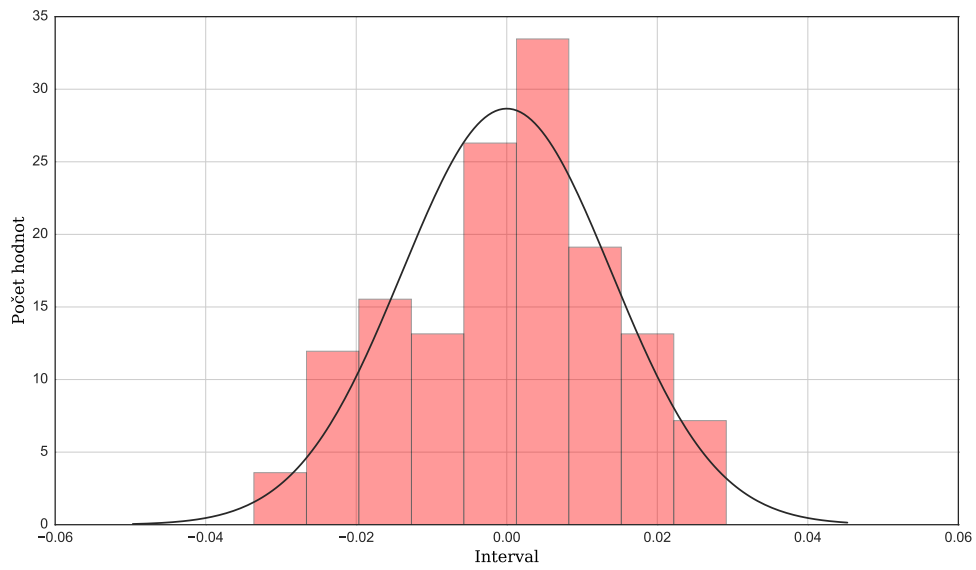
Obrázek 5.13: Histogram toku z 3. srovnávací hvězdy ve filtru B



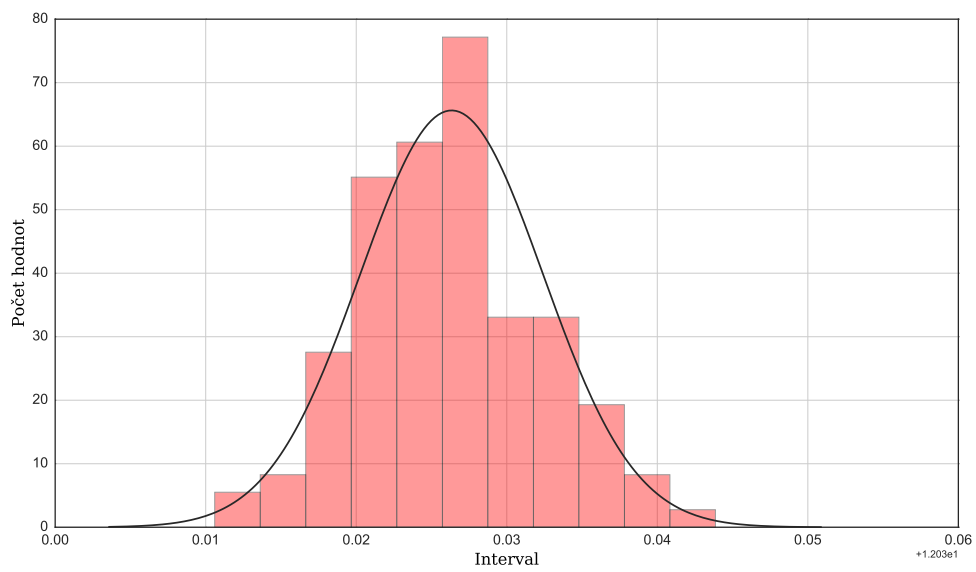
Obrázek 5.14: Histogram rozdílu toku z blazaru ve filtru V a proložené funkce spline



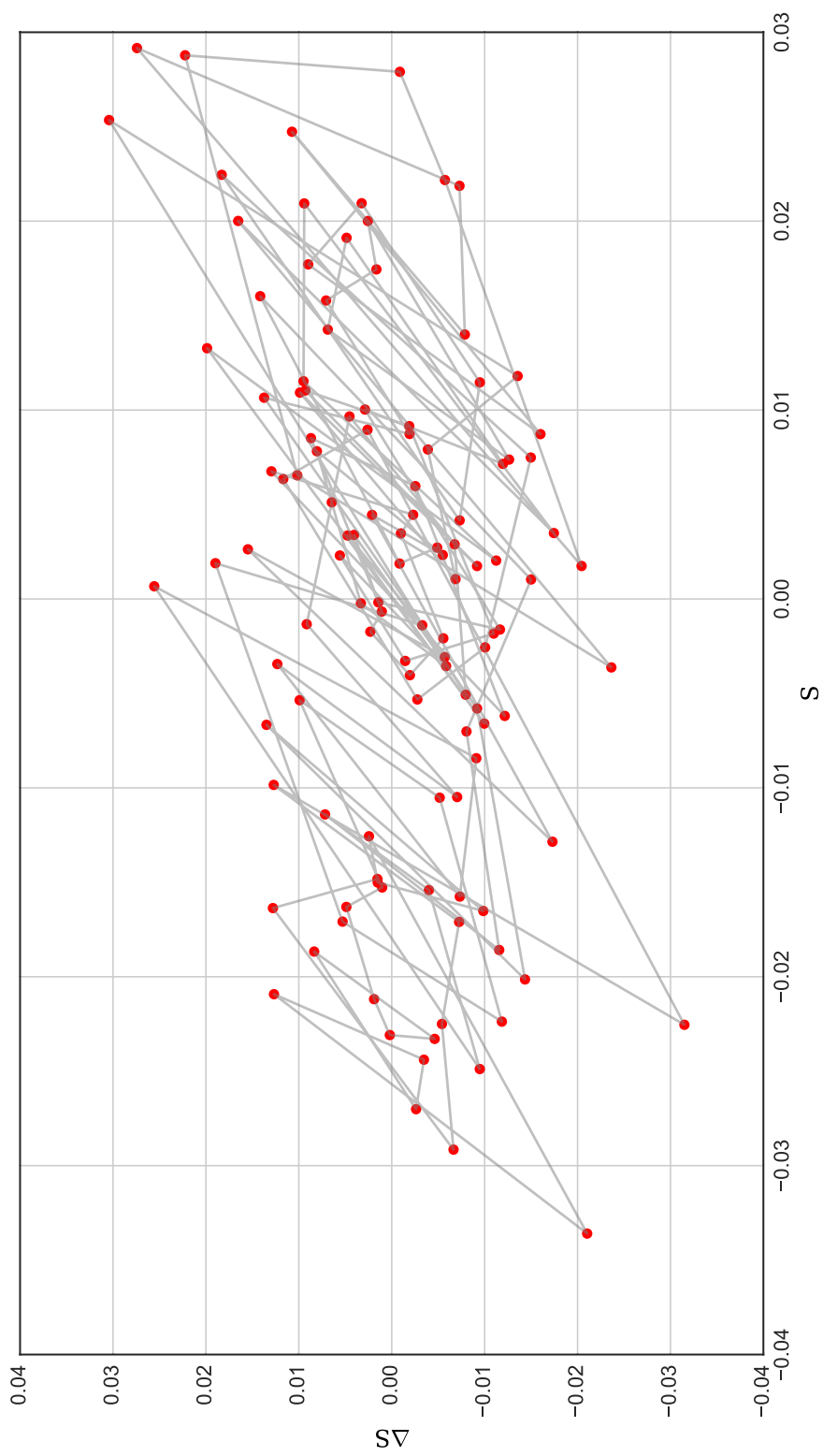
Obrázek 5.15: Histogram toku z 3. srovnávací hvězdy ve filtru V



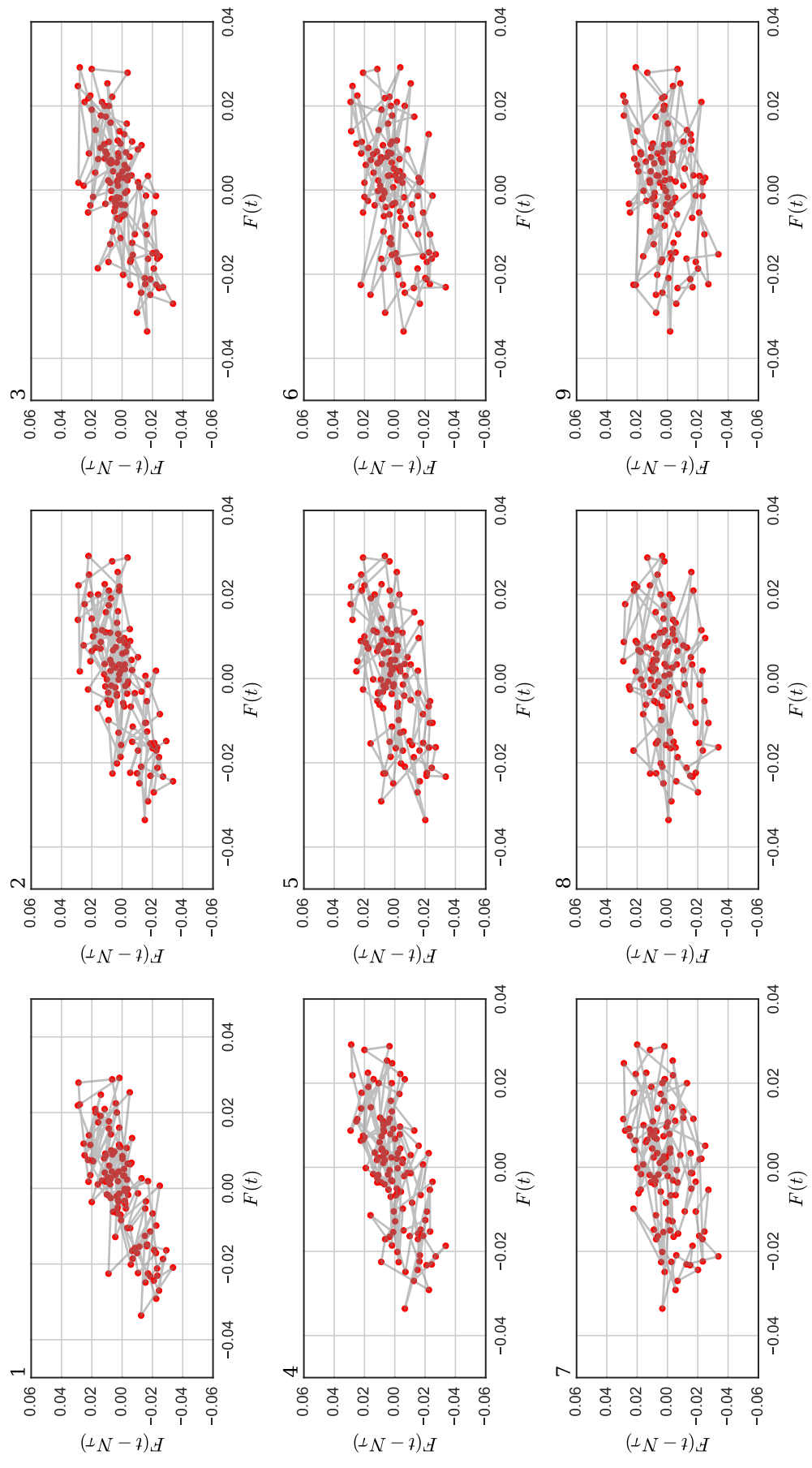
Obrázek 5.16: Histogram rozdílu toku z blazaru ve filtru R a proložené funkce spline



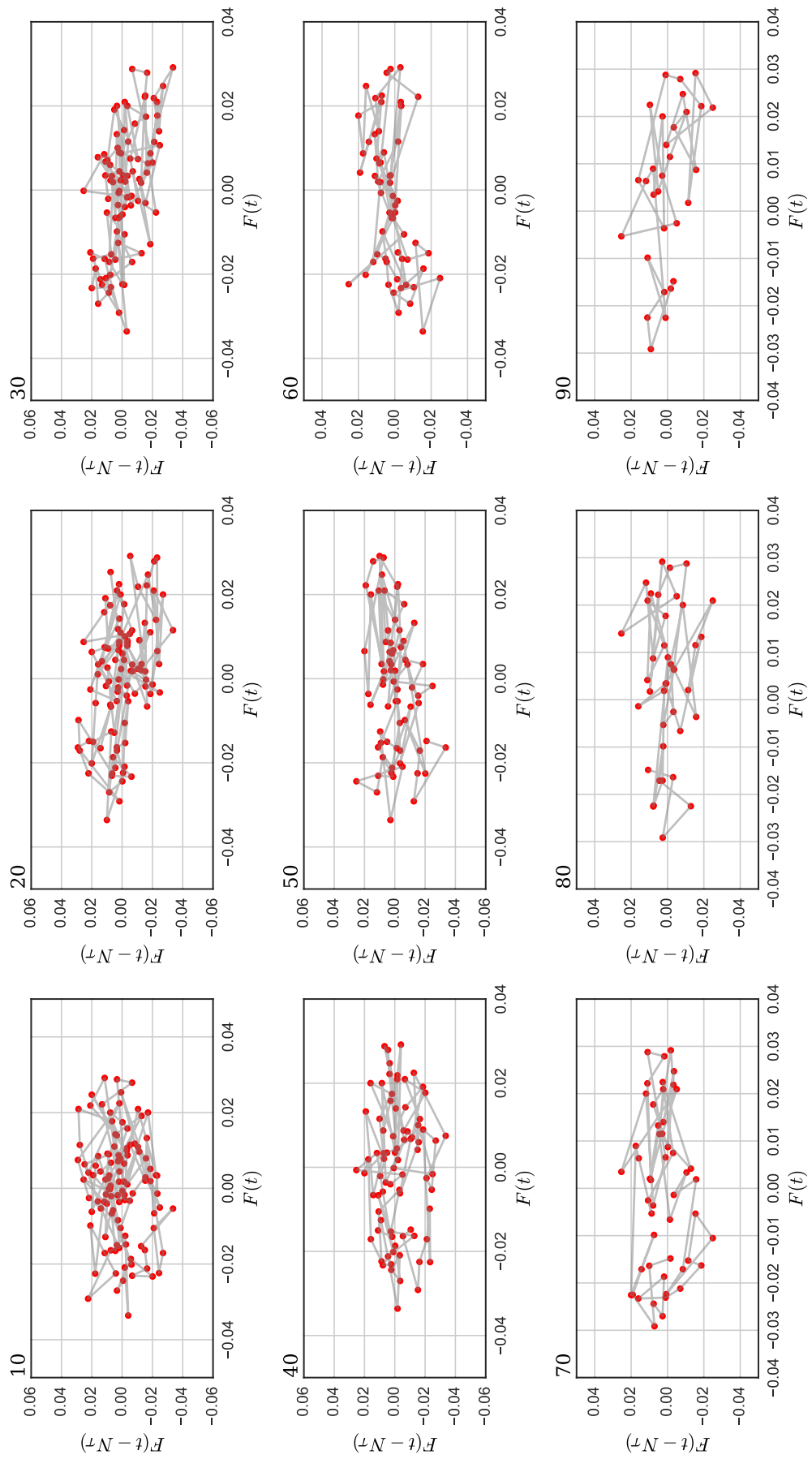
Obrázek 5.17: Histogram toku z 3. srovnávací hvězdy ve filtru R



Obrázek 5.18: Závislost rozdílu reziduí ΔS na reziduích S



Obrázek 5.19: Časové zpoždění zvětšené koeficienty z intervalu hodnot (1 – 9)



Obrázek 5.20: Časové zpoždění zvětšené koeficienty z intervalu hodnot (10 – 90)

Diskuze

Pozorování bylo zahájeno v 16.40 22.1.2016 UTC, konec pozorování 5.09 23.1.2016 UTC. Pozorovací podmínky byly velmi dobré vzhledem k trvajícím mrazům. Shodou okolností se jednalo o nejchladnější noc zimy v Brně. Nicméně vzhledem k pozdnímu zahájení pozorování a následné ranní oblačnosti, bylo nutné použít pro redukci snímků flat snímky z noci 8.1.2016. Tyto snímky jsme mohli využít, protože teplota CCD čipu se během noci pohybovala kolem $-24,7^{\circ}\text{C}$ a teplota čipu během našeho pozorování byla kolem $-20,2^{\circ}\text{C}$. Celkem bylo vytvořeno 360 snímků, po 120 snímcích v každém filtru s expozicí 120 s.

Pořízené snímky, dark snímky a převzaté flat snímky, byly zpracovávány pomocí programu *Munipack* (<http://munipack.physics.muni.cz/>) jehož autorem je Filip Hroch. Byla provedena fotometrická korekce o dark a flat snímky, aperturní fotometrie, astrometrie a fotometrická kalibrace. Během zpracování bylo nutné vyřadit poslední 4 snímky u filtru B, jelikož byly zatíženy hrubými chybami způsobenými sníženou kvalitou pozorovacích podmínek. Pro jednodušší práci se snímky z noci 8.1.2016 byl vytvořen jednoduchý skript (viz. příloha), který vytrídil snímky podle druhu (dark, flat) a dle expoziční doby. K následné práci byl využit programovací jazyk *Python* v prostředí *Jupyter* (viz. příloha).

Ze zpracovaných dat byly vytvořeny světelné křivky blazaru spolu s vhodně zvolenými srovnávacími hvězdami 2. a 3., jejichž tok je v čase konstantní. Do grafu byly postupně vynášeny závislosti změny hvězdné velikosti na čase (obr. 5.3 a 5.4).

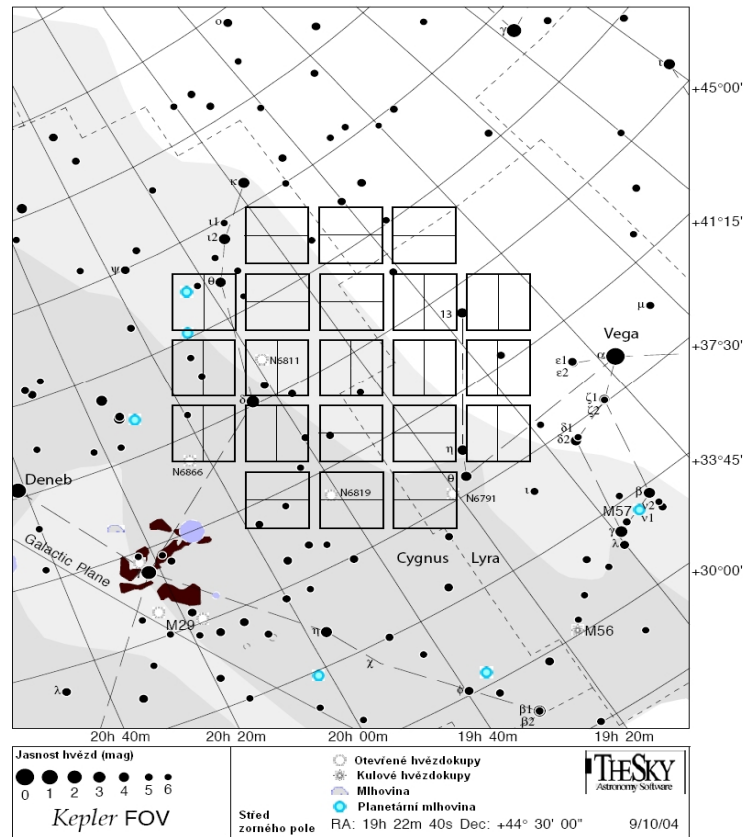
Dále byla světelná křivka blazaru proložena spline aproximací, kde jsme se snažili vystihnout a popsat rostoucí trend získaných hodnot (obr. 5.5). Poté byly rozdíly funkčních a naměřených hodnot použity k sestavení histogramů pro každý filtr. Z histogramů můžeme zjistit rozptyl hodnot během pozorování (obr. 5.6 až 5.17). U blazaru si můžeme všimnout, že hodnoty Gaussovu rozdělení neodpovídají. Srovnávací hvězdy 2. a 3. jsem použila pro zjištění „šumu“ hvězd, kdy kolísání detekovaného toku u těchto hvězd se pohybuje kolem určité střední hodnoty jak histogramy ukazují.

K rekonstrukci fázového portréту jsme využili závislosti hvězdné velikosti na čase, což byla stavová veličina, z níž jsme dále vycházeli. Nejdříve jsme určili zpoždění tak, že odpovídalo časovému rozdílu dvou po sobě naměřených hodnot. Pro příklad byla do grafu (obr. 5.18) na vodorovnou osu vynášena veličina S označující rezidua, tj. rozdíl funkční a naměřené hodnoty hvězdné veličiny v čase, a na svislou osu rozdíl těchto hodnot ΔS . Dále jsme vynášeli hodnoty hvězdné velikosti v čase t označené $F(t)$ na vodorovnou osu a na svislou osu veličinu $F(t - N\tau)$, kdy bylo časové zpoždění zvětšováno o koeficienty N z intervalu hodnot (1-9) a (10-90).

Můžeme sledovat, že při použití koeficientů 1-4 (obr. 5.19) se body blíží přímce. Při volbě koeficientů 5-9 se uspořádání mění a body se pohybují kolem počátku jednotlivých kvadrantů. V poslední řadě jsme koeficienty volili po desítkách (10-90). Z obrázku 5.20 je zřejmé, že při volbě koeficientů 40 a více dochází k výraznému úbytku bodů a tedy nemůžeme tyto výsledky brát v úvahu.

5.4 Družice Kepler

Družice Kepler byla vynesena na oběžnou dráhu v březnu roku 2009. Družice sleduje hvězdné okolí souhvězdí Labutě a Lyry. V rozmezí desítek minut pořizuje snímky tohoto hvězdného pole. Primárním cílem družice Kepler je hledání exoplanet kolem hvězd podobných našemu Slunci. Dále se snaží odhadnout počet exoplanet, identifikovat další objekty podobné planetám, zjišťovat vlastnosti a parametry mateřských hvězd exoplanet. S touto družicí souvisí projekt K2. Ten se zabývá hledáním horkých planet kolem jasných hvězd, identifikování supernov typu Ia, hledáním binárních systémů, dlouhodobě sleduje aktivitu AGN v optické části spektra a mnoho dalšího [28].



Obrázek 5.21: Zorné pole družice Kepler [37]

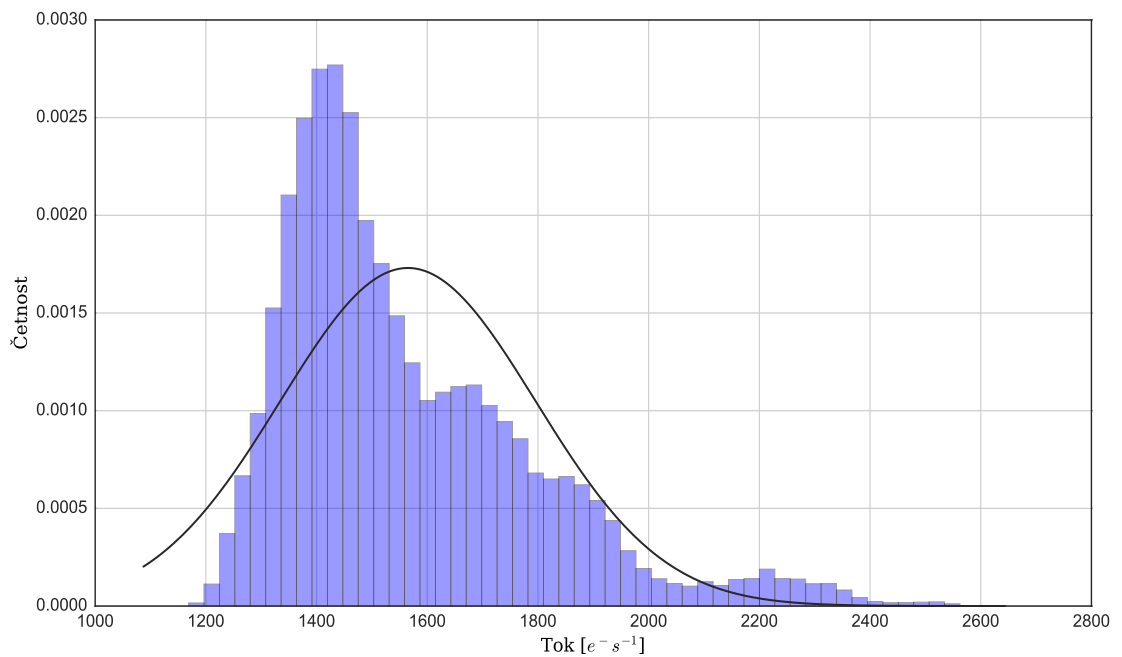
5.4.1 Data z družice Kepler

Data z družice jsou zpracovávána v NASA Ames Research Center. Všechna data, včetně předzpracovaných světelných křivek jsou pak ukládána do archivů MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes) a NExA (The NASA Exoplanet Archive).

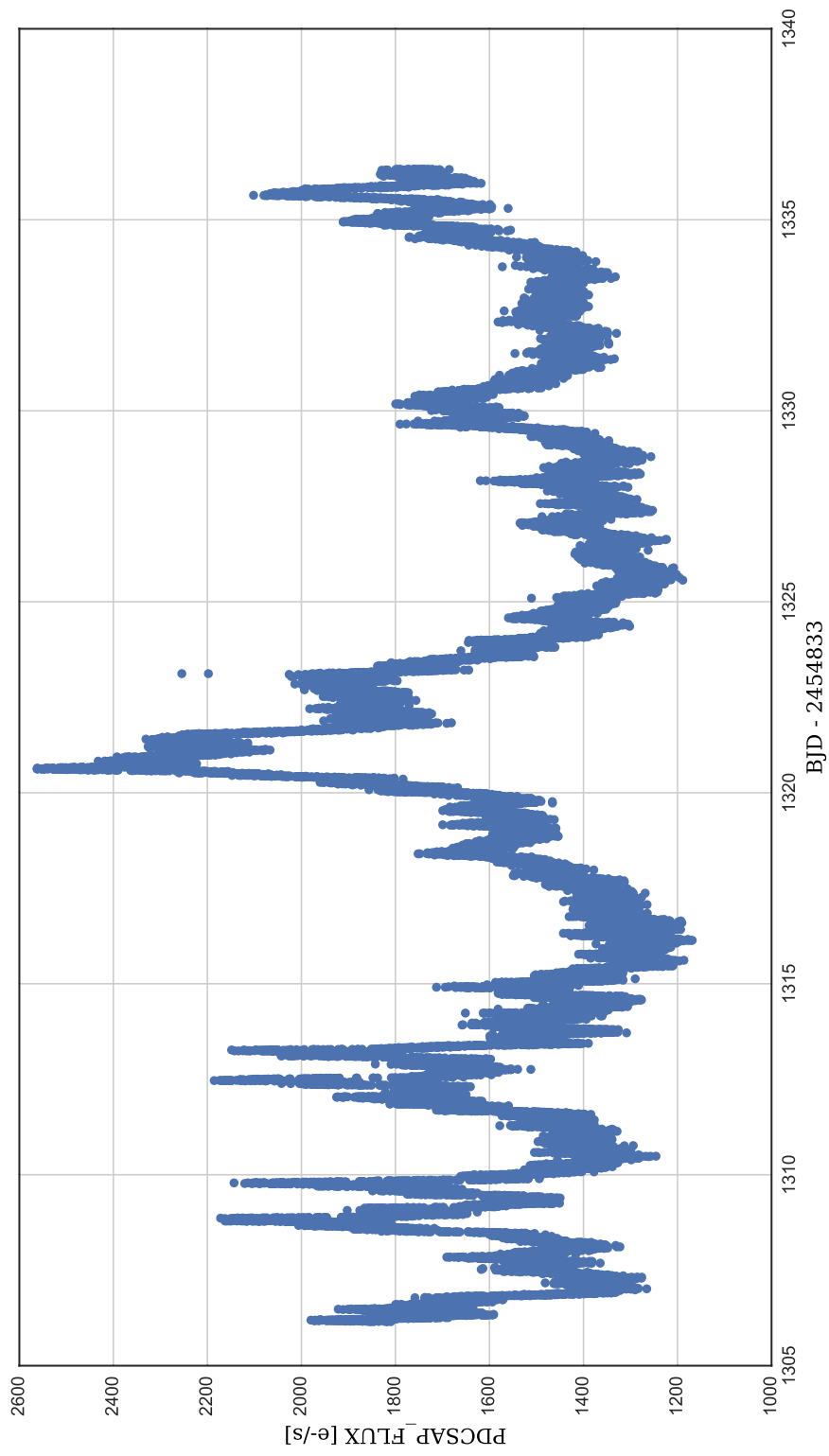
Zkoumaným objektem byla aktivní galaxie typu BL Lac s označením W2R 1926+42. Souřadnice $\alpha = 19^{\text{h}} 26^{\text{m}} 31^{\text{s}}$, $\delta = +42^{\circ} 9' 59''$. Data byla získána na <http://archive.stsci.edu/> a rozdělena dle typu pozorování na llc (long cadency) a slc (short cadency), viz. tabulka 5.3.

pořadí	datový soubor	časový úsek (BJD)
1	kplr006690887 – 2012088054726 llc.fits	1126,65 - 1153,99
2	kplr006690887 – 2012179063303 llc.fits	1182,76 - 1273,33
3	kplr006690887 – 2012211050319 slc.fits	1274,13 - 1305,00
4	kplr006690887 – 2012242122129 slc.fits	1306,15 - 1336,31
5	kplr006690887 – 2012277125453 llc.fits	1306,18 - 1371,32
6	kplr006690887 – 2012277125453 slc.fits	1337,17 - 1371,33
7	kplr006690887 – 2013011073258 llc.fits	1373,51 - 1471,14
8	kplr006690887 – 2013098041711 llc.fits	1488,69 - 1557,96
9	kplr006690887 – 2013131215648 llc.fits	1559,25 - 1581,58

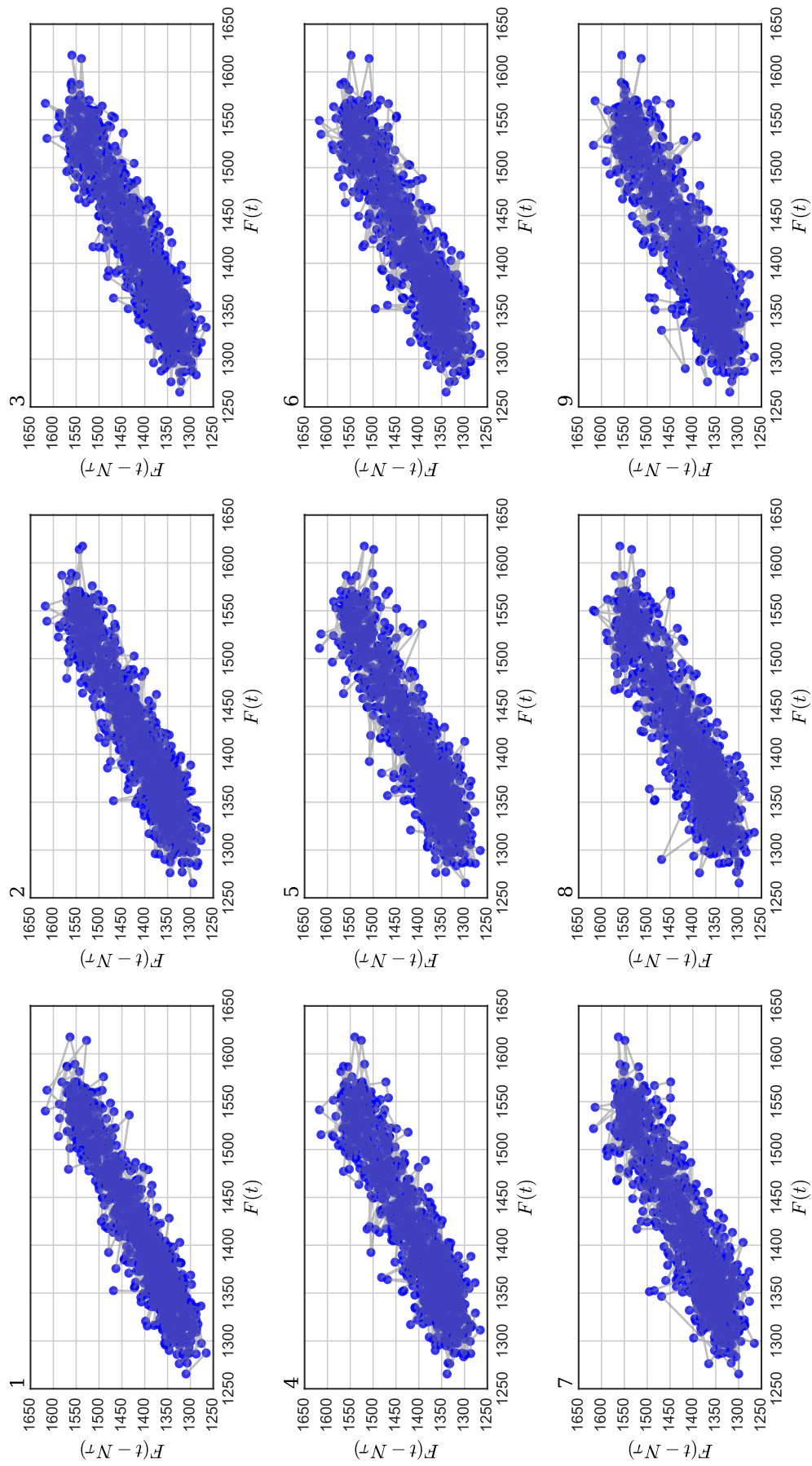
Tabulka 5.3: Seznam datových souborů W2R 1926 + 42



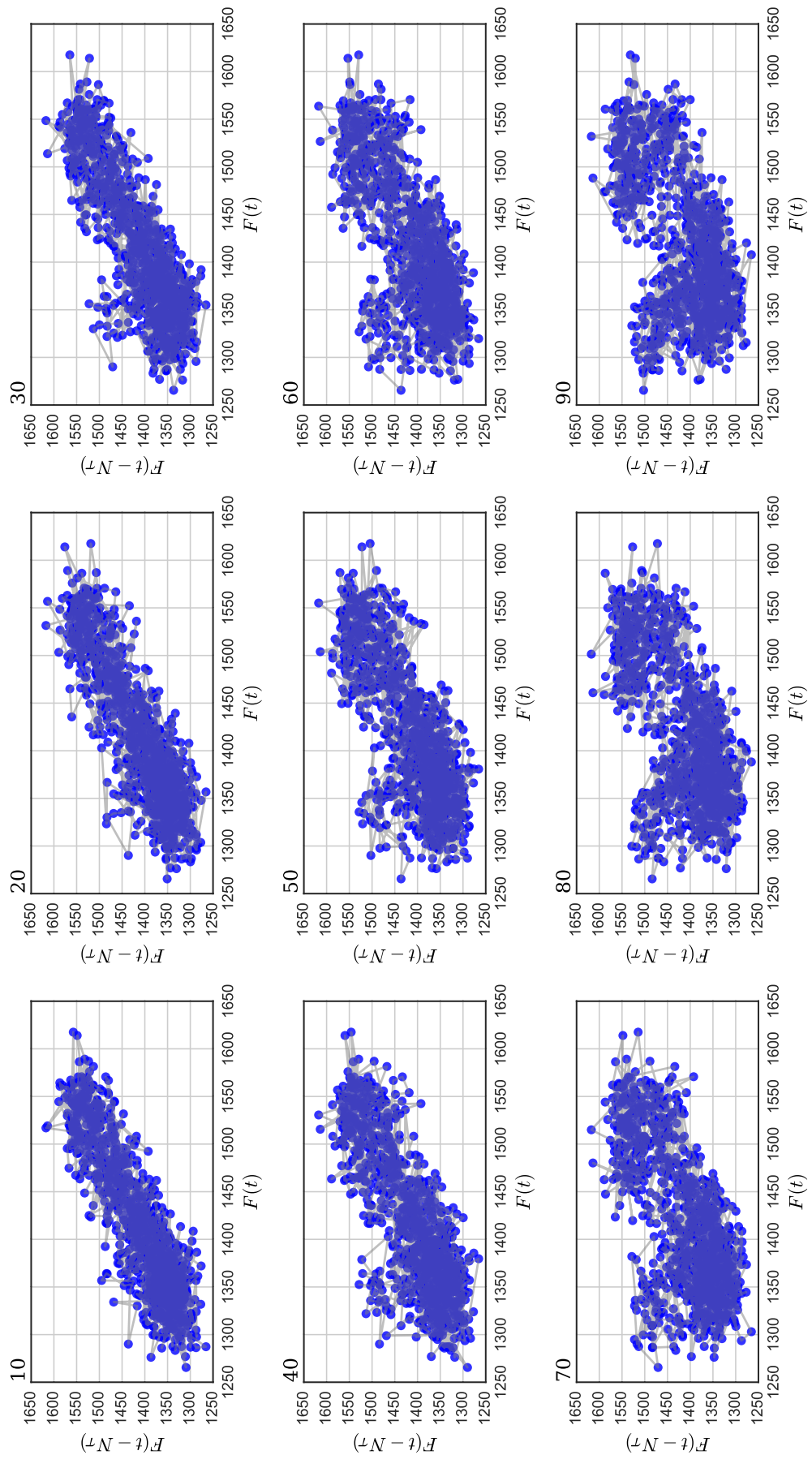
Obrázek 5.22: Histogram pro hodnoty toku z datového souboru č. 4



Obrázek 5.23: Světelná křivka sestavená z datového souboru č. 4



Obrázek 5.24: Časové zpoždění zvětšené koeficienty z intervalu hodnot (1 – 9)



Obrázek 5.25: Časové zpoždění zvětšené koeficienty z intervalu hodnot (10 – 90)

Diskuze

Ze získaných dat byla sestavena světelná křivka blazaru. Do grafu byly na vodorovnou osu vynášeny hodnoty *BJD* (Barycentrické Juliánské Datum) a na svislou osu hodnoty *PDCSAP_FLUX* (Pre-search Data Conditioning Simple Aperture Photometry Flux) tj. hodnoty toku byly předzpracovány kvůli odstranění systematických chyb [18].

Ze světelné křivky (obr. 5.23) můžeme vidět, že se jedná o velmi aktivní blazar. Po vynesení dat do histogramu je patrné, že hodnoty nemají Gaussovo rozdělení (obr. 5.22).

Pro rekonstrukci fázového portréту bylo nejprve třeba zjistit, zda jsou data v čase kontinuální. Proces zahrnoval opravu o časovou korekci, která byla již k dispozici v datovém souboru. Po provedení korekce však některé úseky nevykazovaly vhodnou časovou kontinuitu a tak bylo třeba vybrat takový časový úsek, na který bychom mohli aplikovat obdobnou proceduru jako u pozorovaného blazaru a zrekonstruovat tak fázový portrét.

Při rekonstrukci jsme opět volili časové zpoždění odpovídající rozdílu dvou po sobě následujících hodnot toku v čase. Následně jsme toto zpoždění zvětšovali o koeficienty z intervalu hodnot (1–9) a (10–90). Z obrázku 5.24 vidíme, že pro koeficienty z intervalu (1–9) se portrét mění do podoby přímky. Obrázek 5.25 ukazuje, že při volbě hodnot z intervalu (10–90) se portrét zdeformuje od hodnoty 50 a nejvíce pro hodnotu 90.

Závěr

Cílem této práce byla analýza světelných křivek blazarů S50716+714 a W2R 1926+42. V úvodních kapitolách jsem se zabývala problematikou aktivních galaxií, fotometrií a principem rekonstrukce fázového portréту. K analýze blazaru S50716+714 jsem použila napozorovaná data z jedné noci, pro blazar W2R 1926+42 byla použita data z archivu družice Kepler.

Pozorování proběhlo skrze filtry *BVR* a snímky byly dále důkladně zpracovány v programu Munipack, pro následnou práci bylo napsáno několik skriptů vzhledem ke množství zpracovávaných dat.

K sestavení světelné křivky jsem využila závislosti magnitudy na čase a to pro všechny filtry. Tuto světelnou křivku jsem dále porovnávala se světelnými křivkami vhodně zvolených srovnávacích hvězd.

Dále jsem zjišťovala statistický charakter dat a to, jaký mají naměřené hodnoty rozptyl. K tomu jsem využila histogramů, sestavených jak pro blazar ve filtrech *B*, *V* a *R*, tak i pro srovnávací hvězdy. U blazaru byla data modifikována spline aproximací. Nicméně i po provedené aproximaci neodpovídaly hodnoty normálnímu rozdělení, což může být způsobeno nelineárním zjasňováním blazaru během noci.

Dále jsem přistoupila k rekonstrukci fázového portréту blazaru pro ověření, zda systém vykazuje chaotické chování. V tomto procesu bylo použito 120 bodů, což odpovídalo 120 snímkům ve filtru *R*. Obrázek 5.18 ukazuje závislost při použití zpoždění odpovídajícího rozdílu dvou po sobě jdoucích bodů v čase. Koeficienty byly určovány pouze experimentálně. Vzhledem k malému počtu dat nelze posoudit, zda systém vykazuje chaotické chování.

Data z družice Kepler již byla předzpracována, tedy bylo pouze nutné vybrat časovou řadu v níž byla data relativně časově ekvidistantní. Po vybrání takovéto křivky jsem sestavila histogram (obr. 5.22). Lze vidět, že pro nízké toky je četnost velmi vysoká a rozdělení tedy neodpovídá Gaussovu rozdělení.

Dále jsem se pokusila zrekonstruovat fázový portrét, kdy jsem vycházela ze znalosti změny toku na čase. Aplikovala jsem stejný postup jako u pozorovaného blazaru s rozdílem, že zde bylo k dispozici mnohem více bodů. Vzhledem k výsledným grafům (obr. 5.24 a 5.25) se touto metodou chaotické chování nepotvrdilo. Výsledek jsem porovnávala s prací [14], kde se zabývali ověřováním chaotického chování téhož blazaru, pouze aplikovali jinou metodu. Dospěli však k obdobnému závěru.

Literatura

- [1] ALMÁŠI, M.: *Fotometrická kalibrace detektorů velmi nízkých světelných toků* [online]. Brno, 2011 [cit. 2016-05-02]. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Filip Hroch Dostupné z: http://is.muni.cz/th/323472/prif_b/
- [2] DVOŘÁK, I., ŠIŠKA, J.: *Teorie deterministického chaosu a některé její aplikace (2. část)*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie 36.3 (1991): 155-171. Dostupné z: <http://eudml.org/doc/36834>. [cit. 2016-05-05]
- [3] GRYGAR, J.: *Rudý posuv v astronomii*, Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, vol. 18 (1973), issue 1, s. 18-26. Dostupné z: http://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138297/PokrokyMFA_18-1973-1_4.pdf [cit. 2016-03-06]
- [4] HORÁK, J., KRLÍN, L.: *Deterministický chaos a matematické modely turbulence*. Praha: Academia, 1996. ISBN 80-200-0416-5. [cit. 2016-04-27]
- [5] HOWELL, Steve B.: *Handbook of CCD astronomy*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. Cambridge observing handbooks for research astronomers, 5. ISBN 0-521-61762-6. [cit. 2016-02-15]
- [6] HROCH, F.: *Astronomické praktikum*. Masarykova univerzita, Brno 2006. [cit. 2016-01-13]
- [7] MATĚCHOVÁ, L.: *Analýza chaotických systémů v astronomii*. Brno, 2011 [cit. 2016-05-03]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Viktor Votruba. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/211484/prif_m/
- [8] MIKULÁŠEK, Z., KRTIČKA, J.: *Základy fyziky hvězd*, Masarykova univerzita, Brno 2005 [cit. 2016-03-24]
- [9] OTT, E., SAUER, J., YORKE, J.A.: *Coping with chaos: analysis of chaotic data and the exploitation of chaotic systems*. New York: J. Wiley, c1994. ISBN 0471025569. [cit. 2016-04-20]
- [10] SCHNEIDER, P.: *Extragalactic Astronomy and Cosmology, An introduction*, Springer Berlin Heidelberg, New York, 2015. Dostupné z: <http://www.bruzual.org/~gbruzual/direccion/libro.pdf>. [cit. 2015-11-05]
- [11] STERKEN, Ch., a MANFROID, J.: *Astronomical photometry: a guide*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, c1992. Astrophysics and space science library, vol. 175. ISBN 0-7923-1776-9. [cit. 2016-02-25]

- [12] VOTRUBA, V.: *Numerické algoritmy pro nelineární dynamiku*. Brno, 2000 [cit. 2016-04-25]. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce doc. RNDR. Jan Celý, CSc.
- [13] ZEJDA, M.: *Základy astronomie II*. 2013. [cit. 2015-11-23]

Elektronické zdroje

- [14] BACHEV, R., MUKHOPADHYAY, B., STRIGACHEV, B.: *A search for chaos in the optical light curve of a blazar: W2R 1926+42*. *Astronomy and Astrophysics* [online]. 2015, 576, A17- [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1051/0004-6361/201425563. ISSN 00046361. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361/201425563>
- [15] BECKMANN, V., SHRADER, C. R.: *Active galactic nuclei: open issues*. Dostupné z <http://arxiv.org/pdf/1302.1397.pdf> [cit. 2016-05-12]
- [16] EDELSON, R., MUSHOTZKY, R., VAUGHAN, S., et al.: *Kepler Observations of rapid optical variability in the BL Lacertae Object W2R 1926+42*. *The Astrophysical Journal* [online]. 2013, 766(1), 16- [cit. 2016-05-02]. DOI: 10.1088/0004-637X/766/1/16. ISSN 0004637x. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0004-637X/766/i=1/a=16?key=crossref.be2bb74af5378e5750f16eb2c76a7550>
- [17] GINGERICH, O.: *The Missing Messier Objects*, October 1960, Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System [online]. Dostupné z: <http://messier.seds.org/xtra/Mcat/mcat1781.html/sharp%20messier1781> [cit. 2016-03-05]
- [18] KINEMUCHI, K., M. FANELLI, J. PEPPER, M. STILL a Steve B. HOWELL. *Demystifying Kepler Data: A Primer for Systematic Artifact Mitigation*. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* [online]. 2012, 124(919), 963-984 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.1086/667603. ISSN 00046280. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1086/667603>
- [19] PACKARD, N. H., J. P. CRUTCHFIELD, J. P., FARMER, J. D., and SHAW, R. S.: *Geometry from a Time Series*. *Physical Review Letters* [online]. 45, 712 – Published 1 September 1980 [cit. 2016-05-13]. Dostupné: <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.45.712>
- [20] <http://messier.seds.org/xtra/history/biograph.html>. [cit. 2016-03-06]
- [21] https://www.aavso.org/vsots_bllac. [cit. 2016-02-17]
- [22] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_43_qua.php. [cit. 2016-04-14]
- [23] <http://astronuklfyzika.cz/Gravitace2-5.htm>. [cit. 2016-02-12]
- [24] https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept04/Kellermann/Kellermann2_1.html. [cit. 2016-04-14]
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Hubble%27s_law. [cit. 2016-04-11]

- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_redshift. [cit. 2016-04-17]
- [27] <http://www.exoplanety.cz/2009/02/11/kepler-veda/>. [cit. 2016-04-22]
- [28] <http://keplerscience.arc.nasa.gov/objectives.html>. [cit. 2016-04-22]
- [29] <http://joy.chara.gsu.edu/PEGA/charts/?0716.714>. [cit. 2016-03-30]
- [30] <http://www.starlink.rl.ac.uk/docs/sc6.htx/sc6se8.html>. [cit. 2016-04-24]
- [31] <http://www.noao.edu/kpno/manuals/dim/#UBVRI>. [cit. 2016-04-24]
- [32] <http://astronuklfyzika.cz/Gravitace4-8.htm>. [cit. 2016-02-17]
- [33] <http://www.cpi.com/projects/vlbi.html>. [cit. 2016-04-27]
- [34] <http://spacetelescope.org/images/opo0037a/>. [cit. 2016-04-28]
- [35] http://www.wikiskripta.eu/index.php/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD[cit. 2016-05-01]
- [36] http://www.kitnarf.cz/publications/2001/2001.02.www_rekonstrukce/2001.02.www_rekonstrukce.html. [cit. 2016-04-30]
- [37] <http://kepler.nasa.gov/Science/about/targetFieldOfView/>. [cit. 2016-04-19]
- [38] <http://www.hungry-lord.wz.cz/data/Popis.php>. [cit. 2016-04-26]
- [39] <http://www.gemini.edu/node/73>. [cit. 2016-05-09]
- [40] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/synchrotron_radiation.html. [cit. 2016-05-09]
- [41] http://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2010/13/aa13544-09/aa13544-09.html. [cit. 2016-05-09]
- [42] <https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/hubble/>. [cit. 2016-05-11]
- [43] https://en.wikipedia.org/wiki/Smoothing_spline. [cit. 2016-05-18]]