

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2013

PATRIK ŽILKA



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Analýza světelných křivek blazarů

Bakalářská práce

Patrik Žilka

Vedoucí práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D. Brno 2013

Bibliografický záznam

Autor: Patrik Žilka
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Analýza světelných křivek blazarů

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

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

Akademický rok: 2012/13

Počet stran: viii + 34

Klíčová slova: blazary; AGN; aktivní galaxie; spektrální index; fraktální dimenze; korelační dimenze; 0716+714; Markarian 421

Bibliografický záznam

Autor: Patrik Žilka
Prírodovedecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretickej fyziky a astrofyziky

Názov práce: Analýza svetelných kriviek blazarov

Študijný program: Fyzika

Študijný odbor: Astrofyzika

Vedúci práce: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Akademický rok: 2012/13

Počet strán: viii + 34

Kľúčové slová: blazary; AGN; aktívne galaxie; spektrálny index; fraktálna dimenzia; korelačná dimenzia; 0716+714; Markarian 421

Bibliographic Entry

Author: Patrik Žilka
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Analysis of Light Curves of Blazars

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2012/13

Number of Pages: viii + 34

Keywords: blazars; AGN; active galaxies; spectral index; fractal dimension; correlation dimension; 0716+714; Markarian 421

Abstrakt

V této práci se zabývám zpracováním a analýzou světelných křivek dvou blazarů, přičemž blazar s označením 0716+714 byl pozorovaný po dobu jedné noci a Markarian 421 po dobu dvou nocí. Při jejich analýze bylo určeno frekvenční spektrum, spektrální index a korelační (fraktální) dimenze, která by měla charakterizovat případné chaotické chování. To nakonec nemohlo být potvrzené pro malý počet naměřených hodnot a malý poměr signálu k šumu.

Abstrakt

V tejto práci sa zaoberám spracovaním a analýzou svetelných kriviek dvoch blazarov, pričom blazar s označením 0716+714 bol pozorovaný počas jednej noci a Markarian 421 počas dvoch nocí. Pri ich analýze bolo určené frekvenčné spektrum, spektrálny index a korelačná (fraktálna) dimenzia, ktorá by mala charakterizovať prípadné chaotické správanie. To nakoniec nemohlo byť potvrdené pre malý počet nameraných hodnôt a malý pomer signálu k šumu.

Abstract

In the thesis, I deal with the processing and analysis of light curves of two blazars. The first blazar, labeled as 0716+714, and the second Markarian 421 were observed for one and two nights respectively. In the analysis, the frequency spectrum, the spectral index and the correlation (fractal) dimension, that should characterize possible chaotic behavior, were estimated. Ultimately, the chaotic behaviour couldn't have been confirmed for a small number of measured values and small signal to noise ratio.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Patrik Žilka

Studijní program : Fyzika

Studijní obor : Astrofyzika

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

Analýza světelných křivek blazarů

Analysis of Light Curves of Blazars

Zásady pro vypracování:

Blazary jsou aktivní galaktická jádra u nichž, díky geometrii, sledujeme aktivní jet --- proud hmoty směřující k Zemi. Jeho prostorové rozlišení je možné pouze za pomoci rádiové interferometrie. Avšak zkoumání mikrovariability světelných křivek je naopak ideální za pomoci malých a středních dalekohledů. Cílem práce je fotometrická analýza světelných křivek blazarů s použitím různých metod zaměřených na analýzu variability a analýzu chaotického chování.

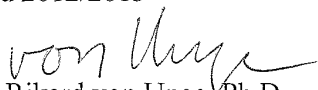
Práce bude napsána v jazyce slovenském.

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

Datum zadání bakalářské práce : září 2012

Datum odevzdání bakalářské práce : dle harmonogramu ak. roku 2012/2013

V Brně dne 23. 11. 2012


Prof. Rikard von Unge, Ph.D.
ředitel Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky
PřF MU

Zadání bakalářské práce převzal dne:

Podpis studenta



Pod'akovanie

Na tomto mieste by som sa chcel poďakovať vedúcemu tejto práce Filipovi Hrochovi, za jeho pomoc a podporu pri jej písaní. Taktiež by som sa chcel poďakovať Petrovi Fatkovi za pomoc pri pozorovaní blazarov a nemalé poďakovanie patrí aj ostatným mojím priateľom a rodine.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 24. května 2013

.....
Patrik Žilka

Obsah

Úvod	1
Kapitola 1. Blazary ako aktívne galaxie	2
1.1 Aktívne galaxie	2
1.2 Unifikovaný model AGN	4
1.3 Blazary podrobnejšie	6
Kapitola 2. Získanie a spracovanie dát	7
2.1 Výber objektu pre pozorovanie	7
2.1.1 Blazar 0716+714	7
2.1.2 Markarian 421	7
2.2 Pozorovanie blazara 0716+714	8
2.3 Pozorovanie blazara Markarian 421	12
Kapitola 3. Analýza svetelných kriviek	17
3.1 Redukcia šumu a interpolácia	17
3.2 Fourierova analýza	19
3.3 Určenie spektrálneho indexu	21
3.4 Deskriptory chaosu	22
3.4.1 Rekonštrukcia trajektórie vo fázovom priestore	22
3.4.2 Korelačná dimenzia	24
Záver	30
Zoznam použitých zdrojov	32

Úvod

Už od pradávna ľudia pozorovali na oblohe rôzne spočiatku neznáme objekty. Medzi nimi boli aj dnes ničím nezvyčajné Slnko, Mesiak a planéty. Týmto objektom priradzovali rôzne vlastnosti, ktoré si nevedeli vysvetliť a ktoré nevedeli prirovnať k žiadnym pozemským javom. Preto boli často označované ako nadprirodzené a nadpozemské. Avšak postupne sa objavovala prepojenosť medzi ich niektorými vlastnosťami s pozemskými objektami a javmi. Zdanlivo nevysvetliteľné objekty sa začali nečakane vysvetľovať. Príkladom môže byť nebeská mechanika, podľa ktorej sa usúdilo, že Zem je len jednou z planét v Slnčnej sústave a nie je teda ničím výnimočnou. V nasledujúcich obdobiach boli vysvetľované ďalšie a ďalšie vlastnosti rôznych vesmírnych objektov, ktoré boli spočiatku záhadou.

Ani v 20. storočí tomu nebolo inak. Na hviezdnej oblohe bolo pomocou nových technológií objavené veľké množstvo neznámych objektov s rôznymi vlastnosťami. Tieto objekty už síce neboli považované za nadprirodzené, ale vyvolávali veľa otázok vo fyzike. Čez ich charakteristické vlastnosti boli porozdeľované do rôznych skupín (tried). Jednou takouto skupinou sú aj blazary, nad ktorými si dodnes láme hlavu nemálo fyzikov. Ich hlavnou vlastnosťou sú náhle a nepravidelné zmeny ich jasnosti v pozorovanej svetelnej krivke. Aj napriek jej chaotickému správaniu sa môžeme dostatočnou analýzou dopracovať k ich lepšiemu pochopeniu. Ukazuje sa, že táto ich premenlivosť a aj iné vlastnosti sa dajú vysvetliť pomocou výtryskov hmoty v aktívnych galaxiách.

Vlastnosti aktívnych galaxií a ich fyzikálny význam sú preto rozpísané v nasledujúcej kapitole. V 2. kapitole je rozpísané pozorovanie blazarov 0716+714 a Mrk 421 a získanie ich svetelných kriviek. V 3. kapitole sú tieto krivky podrobené ďalšiemu spracovaniu a rôznym analýzám, ako je napríklad fourierova analýza alebo analýza chaotického správania.

Kapitola 1

Blazary ako aktívne galaxie

V súčasnosti nepozorujeme žiadny blazar voľným okom, ale niektoré blazary sú viditeľné aj cez relatívne malé ďalekohľady. V nich sa možno zdajú byť rovnaké ako niektoré slabé hviezdy, ale pri podrobnejšej analýze sa ukážu vlastnosti, ktoré rozhodne nepatria žiadnej hviezde. Najviac ich prezradí červený posun určený zo spektra a aj samotné spektrum, ktoré sa líši od typických hviezdnych spektier. Vypočítaná vzdialenosť z červeného posunu tiež ukazuje na neprirodzene vysokú absolútnu jasnosť. Tieto a aj iné vlastnosti zaraďujú blazary medzi aktívne galaxie.

Nápomocnou literatúrou k napísaniu tejto kapitoly bola kniha *An Introduction to Modern Astrophysics* [3].

1.1 Aktívne galaxie

Aktívne galaxie sú rovnako ako ostatné galaxie zložené z veľkého množstva hviezd, ale na rozdiel od nich nevyzerajú byť celkom pokojné. Vyznačujú sa hlavne veľkou svietivosťou a netypickým spektrálnym rozložením. Za aktívne galaxie boli pôvodne označované aj všetky Markarianove galaxie, ktoré sú charakterizované nadmernou emisiou v ultrafialovej oblasti spektra. Medzi ne patria aj takzvané Starburst galaxie, u ktorých je ultrafialové žiarenie spôsobené hlavne výraznou tvorbou mladých hviezd. Podľa tohto by mali Starburst galaxie patriť medzi aktívne galaxie, ale v súčasnej odbornej literatúre sú často vynechávané. Najčastejšie sa teda aktívnymi galaxiami rozumejú len galaxie s aktívnym galaktickým jadrom v ich centrách a bez akýchkoľvek doplňujúcich charakteristík v definícii. Aktívne galaktické jadro (často označované skratkou AGN z angl. Active Galactic Nuclei) by avšak malo výrazne prispievať do celkového žiarenia aktívnej galaxie a preto vlastnosti aktívnych galaxií by mali byť veľmi podobné vlastnostiam ich aktívnych galaktických jadier. Zaujímavosťou je, že tieto charakteristiky silno závisia od jeho natočenia smerom na nás. Táto anizotropia AGN (a nielen tá) sa prejavuje v rozdelení aktívnych galaxií na rôzne triedy a podtriedy. Tie budú postupne rozpísané v ďalších odstavcoch tejto podkapitoly. V ďalšej podkapitole budú zjednotené pod unifikovaný model AGN, podľa ktorého bude mať každá vlastnosť aj svoj fyzikálny význam.

Seyfertove galaxie patria medzi prvé objavené aktívne galaxie a sú pomenované po americkom astronómovi s menom Carl Keenan Seyfert (1911–1960). Ten sa venoval štúdiu týchto galaxií a už v roku 1943 upozornil na ich niektoré vlastnosti, medzi ktorými

boli aj vysoko ionizované emisné čiary. Jasnosť jadra výrazne prevyšuje jasnosť všetkých hviezd v galaxii (často až o 3 rády) a jeho veľkosť sa dá porovnať s veľkosťou našej slnečnej sústavy. Jeho žiarivé kontinuum zasahuje až do röntgenovej oblasti, ale v rádiovkej oblasti sú galaxie relatívne tiché. Podľa emisných čiar sa klasifikujú do dvoch základných podtried. Seyfertove galaxie 1. typu obsahujú veľmi široké povolené čiary (dopplerovským rozšírením odpovedajúce rýchlostiam okolo 1000 až 5000 km/s) a aj užšie zakázané čiary (odpovedajúce okolo 500 km/s). Tento typ taktiež vykazuje v röntgenovej oblasti nepravidelnú premenlivosť s periódami v dňoch až hodinách. Seyfertove galaxie 2. typu vyžarujú len užšie emisné čiary (povolené aj zakázané), ich kontinuum je menej žiarivé a najmä v röntgenovej oblasti vyžarujú veľmi slabo. Okrem týchto typov sú známe aj prechodné typy (ako napríklad typ 1,5), ktoré reprezentujú galaxie so širokými a aj s užšími povolenými čiarami. Zaujímavosťou je, že takmer všetky Seyfertove galaxie rozlíšené teleskopmi patria pod špirálové galaxie.

Rádiové galaxie sa od ostatných galaxií odlišujú extrémnou jasnosťou v rádiovkej oblasti spektra. Rádiové žiarenie pochádza hlavne z jetov, výtryskov hmoty z pólův aktívneho galaktického jadra, ktoré sa dajú vizuálne rozoznať. Tieto výtrysky sú dobre viditeľné u rádiovkej galaxii Centaurus A zobrazenej na obr. 1. Podobne ako Seyfertove galaxie sa aj rádiové galaxie rozdeľujú do dvoch podtried a to BLRG a NLRG (z angl. Broad/Narrow-Line Radio Galaxies). Galaxie BLRG obsahujú široké a aj úzke emisné čiary, zatiaľ čo galaxie NLRG obsahujú len úzke čiary. Galaxie BLRG vykazujú aj slabú polarizáciu a výraznejšiu premenlivosť žiarenia. Za spomenutie ešte stojí aj ich rozdelenie podľa jasnosti a morfológie do podtried FR I a FR II, pričom FR II vyžarujú hlavne z výtryskov a sú aj rádiovco hlučnejšie ($L_{1.4\text{GHz}} \geq 10^{32} \text{ erg s}^{-1}\text{Hz}^{-1}$, [15]). Zobrazený Centaurus A patrí pod podtriedu FR II. Pri rozlíšení rádiových galaxií sa ukazuje, že patria najmä pod eliptické galaxie narozdiel od špirálovitých Seyfertových galaxií.



Obr. 1: Rádiová galaxia Centaurus A (vľavo, [25]) a odpovedajúca galaxia NGC 5128 (vpravo, [26]) z optickej oblasti. Snímky sú približne v rovnakej mierke a aj natočení. Zatiaľ čo v rádiovkej oblasti sú jasne viditeľné výtrysky a samotnú galaxiu nevidieť, v optickej oblasti je to presne naopak.

Okrem rádiových galaxií sa objavilo aj veľa neznámych rádiových zdrojov, ktoré sa spočiatku vôbec nepodobali na galaxie. V optickom obore vyzerali podobne ako slabé hviezdy a preto aj boli označované ako kvázi hviezdne rádiové objekty, v súčasnosti známe ako kvasary (z anglického quasi-stellar radio sources, skrátene QSRs). Postupne sa zistilo, že sa jedná o objekty s veľkým červeným posunom v spektre a teda že sú veľmi vzdialené a žiarivé. Niektoré kvasary sú od normálnych galaxií žiarivejšie aj o 5 rádov. Taktiež vykazujú široké a úzke emisné čiary, zmeny jasnosti a aj polarizáciu žiarenia. Podľa intenzity v rádiovom obore sa rozdeľujú na rádiovo hlučné (QSR) a rádiovo tiché (QSO).

Blazary sú ďalšou významnou triedou aktívnych galaxií. Vyznačujú sa prudkými zmenami jasnosti a aj vysokým stupňom lineárnej polarizácie. Taktiež vyžarujú silno v rádiovkej oblasti a medzi galaxie ich zaraďuje veľký červený posun. Práve tieto objekty sú stredobodom tejto práce a preto budú podrobnejšie rozpísané v podkapitole 1.3.

1.2 Unifikovaný model AGN

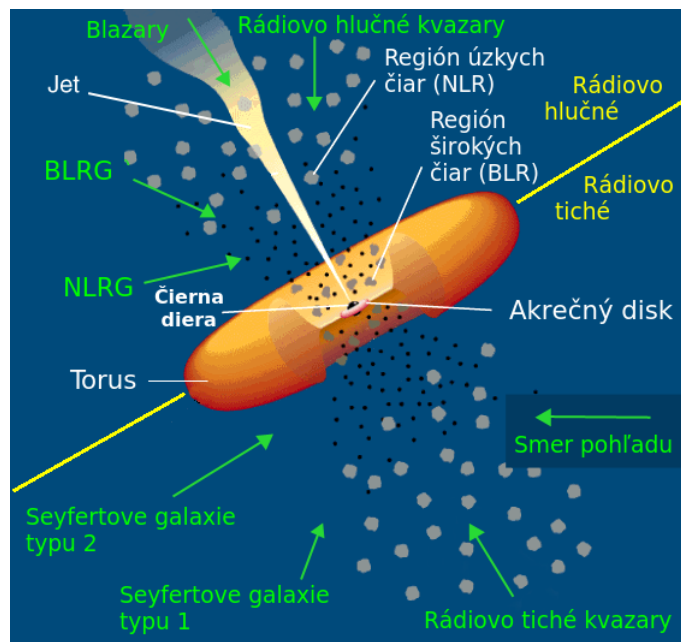
Unifikovaný model AGN by mal byť schopný vysvetliť všetky empirické vlastnosti spomínaných aktívnych galaxií. Štandardný unifikovaný model dobre opísal už Antonucci v roku 1993 [1]. Ten predpokladá v centre supermasívnu čiernu dieru, ktorej hmotnosť je o približne 8 rádov väčšia ako je hmotnosť Slnka. Je známe, že samotná čierna diera nie je schopná vyžarovať, ale paradoxne je hlavnou príčinou obrovskej svietivosti AGN. Je tak vďaka silnému gravitačnému polu a jeho gravitačnému potenciálu, ktorý poskytuje energiu pre žiarenie okolitej padajúcej hmoty. Ak táto čierna diera taktiež rotuje, tak aj jej rotačná energia môže slúžiť k nemálemu vyžarovaniu prostredníctvom buď Blandford-Znajekovho mechanizmu alebo Penroseovho procesu.

V najbližšom okolí čiernej diery je väčšina hmoty sústredená v akrečnom disku. Už podľa názvu je asi zrejmé, že akrečný disk má tvar disku, ale jeho vnútorná časť sa tvarom podobá skôr na koblihu s dierou (toroid). V ňom sa materiál postupne turbulentným spôsobom približuje k nenásytnej čiernej diere. Počas tohto pohybu nastáva veľké množstvo vzájomných zrážok, čo vedie k ionizácii atómov a následnému tepelnému vyžarovaniu. Vzhľadom na pozorovanú svietivosť sa dá odhadnúť aj celková ročná hmotnosť dopadajúceho materiálu, ktorá činí približne 1 až 10 hmotností Slnka. Tepelné žiarenie akrečného disku by malo byť charakterizované typickým kontinuom absolútne čierneho telesa, ktoré avšak nie je celkom typické pre pozorované aktívne galaxie. Táto skutočnosť vedie k tomu, že buď akrečný disk nepozorujeme úplne priamo, ale cez rozsiahlejšie štruktúry AGN, alebo nie je jediným zdrojom žiarenia.

Vďaka typickým lalokom rádiových galaxií typu FR II, ktoré sú viditeľné aj na obr. 1 vľavo, je isté, že ďalším silným zdrojom žiarenia AGN sú výtrysky hmôt z jeho pólov. Avšak tieto výtrysky, často nazývané aj ako jety, nie sú pozorované u všetkých aktívnych galaxiách a to vedie k rozdeleniu AGN na dve hlavné skupiny a to na AGN s výtryskami (rádiovo hlučné) a bez nich (rádiovo tiché). Predpokladá sa, že galaxie s výtryskami majú narozdiel od ostatných galaxií dostatočný moment hybnosti rotujúcej a nabitej čiernej diery. To vedie k vzniku silného magnetického poľa, ktorého siločiarly usmerňujú pohyb nabitých častíc z akrečného disku. Tieto magnetické siločiarly sa špirálovito stáčajú a kuželovito vychádzajú z dvoch opačných smerov. Častice nimi urýchľované vyžarujú

netepelné synchrotrónové žiarenie typické pre rádiovú oblasť spektra. V tejto oblasti sú galaxie s výtryskami intenzívnejšie aj o 3 až 4 rády a preto sú označované ako rádiové hlučné galaxie. Narozdiel od rádiových tichých galaxií, ktoré výtrysky nemajú, sú tiež niekoľko násobne intenzívnejšie v röntgenovej oblasti. Vysokoenergetické žiarenie AGN by teda malo pochádzať z výtryskov, ale jeho spektrálny priebeh už neodpovedá synchrotrónovému žiareniu. Asi najlepšie vysvetlenie dáva takzvaný inverzný Comptonov jav. Podľa neho sa urýchlené častice zrážajú s nízkoenergetickými fotónmi, ktorým následne dodávajú dostatok energie. Tieto fotóny pravdepodobne nepochádzajú z výtryskov, ale z iných oblastí AGN a jedná sa teda o externý inverzný Comptonov jav.

Žiarenie z jednotlivých oblastí spektra má tiež charakteristickú závislosť na frekvencii, ktorá sa dá približne opísať vzťahom $L_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, kde α je takzvaný spektrálny index a L_ν je tok žiarenia v danom intervale frekvencií. Ak by sme sa na aktívne galaktické jadro pozerali smerom do jedného z jeho výtryskov, pozorovali by sme ho ako blazar. Tento smer pohľadu je znázornený aj na obrázku 2, kde je pre rádiové hlučné galaxie vymedzená ľavá horná polovica. Vzhľadom na zavádzajúci obrázok treba upozorniť, že galaxie s výtryskom iba na jednej strane neexistujú. Ak sú niektoré rádiové galaxie pozorované iba s jedným výtryskom, tak musia mať aj druhý, ale intenzita druhého je oslabená relativistickými efektami.



Obr. 2: Rôzne smery pohľadu na unifikovaný model AGN vysvetľujúce rôzne triedy aktívnych galaxií. Pôvodný obrázok pochádzal z práce od Padovaniho a Urryho [21].

Na uvedenom obrázku sa určite nedá prehliadnuť veľká a hustá oblasť prachu toroidného tvaru. Tento torus je dôležitou súčasťou AGN hlavne z dôvodu vysvetlenia Seyfertových galaxií. Tie sú považované za rádiové tiché a preto by ich kontinuum malo byť tepelného charakteru, ale nie je tomu celkom tak. V niektorých oblastiach spektra sú jasnejšie, zatiaľ čo v iných oveľa slabšie. Tieto anomálie vysvetľuje práve torus, ktorý z nášho pohľadu zakrýva svietiaci akrečný disk a prepúšťa iba niektoré časti elektromagnetického spektra. Prejavuje sa to najmä u Seyfertových galaxií typu 2, ktoré majú slabšie kontinuum a

v röntgenovej oblasti majú hustejšie absorpčné čiary. Dôležitou vlastnosťou torusu je aj jeho vyžarovanie v infračervenej oblasti spektra.

Súčasťou unifikovaného modelu je aj oblasť hustého a teplého plynu, ktorá je zdrojom širokých emisných čiar. Táto oblasť, nazývaná aj ako región širokých čiar (BLR), sa nachádza v blízkosti akrečného disku. Tepelné žiarenie tohto disku neustále excituje a fotoionizuje atómy vodíka, železa a iných prvkov. Tie sa následne rekombinujú a vyžarujú emisné čiary. Nemalá šírka týchto čiar je spôsobená veľkými rýchlosťami emitujúcich atómov, ktoré môžu dosiahnuť rýchlosť až 5000 km/s. Tieto široké emisné čiary nie sú pozorované u Seyfertových galaxiách typu 2 a ani u rádiových galaxiách s úzkymi čiarami (NLRG). Príčinou je už spomínaný torus, ktorý tieni aj túto oblasť a široké emisné čiary neprepustí.

Poslednou dôležitou oblasťou AGN je región úzkych emisných čiar (NLR). Ten je oveľa rozsiahlejší, redší, ale približne s rovnakou teplotou ako oblasť širokých čiar. Emisia je tiež spôsobená rekombináciou atómov, ale vďaka malému množstvu zrážok môžu atómy vyžarovať aj zakázané čiary, ktoré vznikajú prechodom elektrónov z metastabilných energetických hladín. Z tejto oblasti pochádza aj polarizované žiarenie, ktoré vzniká odrazom od jednotlivých častíc. Toto žiarenie nezávisí na vlnovej dĺžke a preto sa jedná o Thomsonov rozptyl na voľných elektrónoch. Tie z tohto dôvodu patria medzi najčastejšie častice v tejto oblasti.

1.3 Blazary podrobnejšie

Blazary sú teda triedou aktívnych galaxií s rádiovo hlučným aktívnym galaktickým jadrom v centre. Tie obsahujú supermasívnu čiernu dieru, z ktorej vychádzajú výtrysky hmoty do dvoch opačných smerov. V prípade blazarov sa pozeráme do jedného z týchto výtryskov.

Ako už bolo spomínané, jedná sa o objekty s prudkými zmenami ich jasnosti, ktoré sú častokrát aj v priebehu niekoľkých minút. Ich žiarenie je taktiež lineárne polarizované. V optickom obore sa nám javia ako slabé hviezdy bez výraznejšej morfológie, ale v rádiovkej oblasti je často možné rozoznať aj vychádzajúce výtrysky.

Názov triedy sa v súčasnosti odvádza z anglického *blazing quasi-stellar object*, ale pôvodne názov pochádza zo spojenia pomenovaní dvoch tried a to objektov typu BL Lac a opticky prudko premenných (OVV¹) kvasarov. Tieto triedy sa zlúčili pod blazary v roku 1978 na podnet Edwarda Spiegla [12] a stali sa z nich hlavné podtriedy blazarov. Hlavný rozdiel medzi týmito podtriedami spočíva v ich spektrách, kde OVV kvasary vykazujú silné emisné čiary, zatiaľ čo BL Lac objekty ich vykazujú veľmi slabo a často sú u nich nedekovateľné. Taktiež sú OVV kvasary oveľa žiarivejšie a ich výtrysky majú väčšie hodnoty Lorentzovho faktoru [15].

Objekty typu BL Lac sú pomenované po prvom známom objekte tohto typu, ktorý bol chybné označený ako premenná hviezda. V rádiovkej oblasti by mohla byť táto podtrieda spojená s rádiovými galaxiami typu FR I. Nasvedčuje tomu niekoľko vlastností, ktoré majú spoločné [15]. Výsledkom pozorovania je tiež fakt, že takmer všetky (okolo 90 %) rozlíšené objekty typu BL Lac boli zaradené pod eliptické galaxie.

¹OVV je skratka z angl. „optically violently variable“

Kapitola 2

Získanie a spracovanie dát

2.1 Výber objektu pre pozorovanie

Analýza svetelných kriviek veľmi závisí od ich nechceného šumu. Ten pribúda s klesajúcou jasnosťou objektu a preto je pre dobré výsledky voliť čo najjasnejšie objekty. Jasných blazarov nie je veľa a jasnosť tých najjasnejších sa pohybuje len okolo 13. magnitúdy. Ďalším dôležitým kritériom pre pozorovanie je čo najdlhšia viditeľnosť počas jasnej noci a aj jeho dostatočná výška nad obzorom. Asi najvhodnejším kandidátom spĺňajúcim tieto podmienky sa stal blazar 0716+714, ktorý patrí aj medzi tie populárnejšie a často pozorované. Ďalším objektom pozorovania bol určený relatívne jasný Markarian 421 s jasnosťou až pod 12. magnitúdou.

2.1.1 Blazar 0716+714

Tento blazar typu BL Lac je známy aj pod inými označeniami (ako napríklad PKS 0716+714 alebo S5 0716+71), ktoré nesie podľa rôznych katalógov. Nachádza sa v súhvezdí Žirafy a teda v našich zemepisných šírkach patrí medzi cirkumpolárne objekty. Jeho červený posun určený z jasnosti hostujúcej galaxie má hodnotu $z = 0,31 \pm 0,08$ [16], ktorá odpovedá vzdialenosti približne 3,8 miliárd svetelných rokov. Svoju jasnosť mení v celom elektromagnetickom spektre na rôznych časových škálach. V optickej oblasti mení svoju jasnosť väčšinou okolo 0,02 magnitúdy za hodinu a tie prudšie zmeny sú okolo 0,1 mag/hod [14]. Za spomenutie ešte stojí, že jeho vnútrodennú (intraday) premenlivosť v rádiovkej oblasti spektra sa podarilo prepojiť so zmenami jasnosti v optickom obore [18].

2.1.2 Markarian 421

Markarian 421 (skr. Mrk 421, známy aj ako 1104+384) je blazar typu BL Lac. Nachádza sa v súhvezdí Veľkej medvedice a teda je u nás často pozorovateľný vysoko nad horizontom. Je vzdialený približne 400 miliónov svetelných rokov ($z = 0,031$, [19]), čo ho zaraďuje medzi najbližšie známe blazary. Jeho zdanlivá hviezdna veľkosť sa pohybuje v rozmedzí 16. až 11. magnitúdy. V tejto práci bol pozorovaný počas optickej aktivity, pri ktorej dosahoval hviezdnu veľkosť pod 12. magnitúdou [29]. Okrem dlhodobých zmien jasnosti

môže prejavovať aj krátkodobú mikrovariabilitu, ako napríklad zjasnenie o 1,4 magnitúdy v priebehu 2,5 hodiny, ktoré pozoroval Xie a ostatní v roku 1988 (podľa [10]).

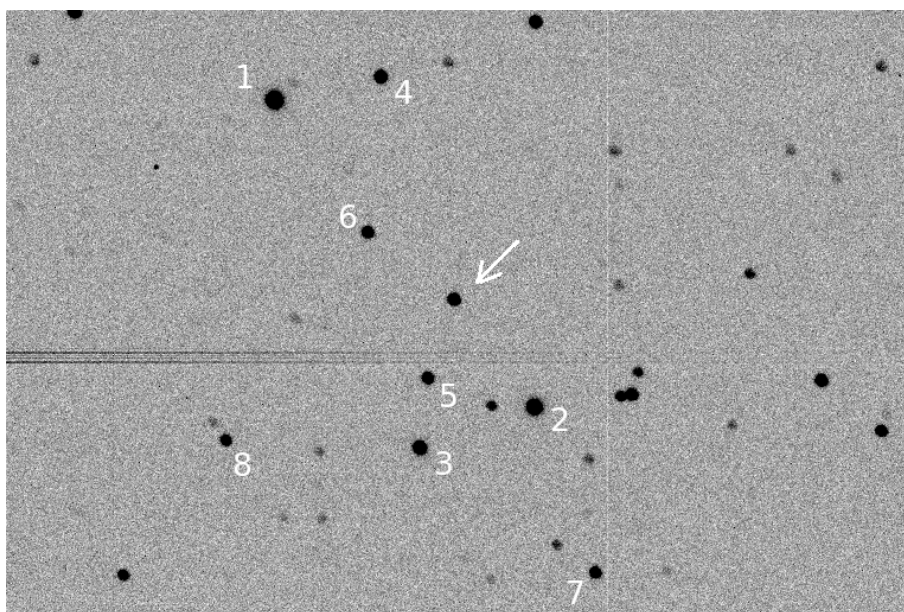
Blazar Mrk 421 je tiež veľmi zaujímavý vo vysokofrekvenčnej oblasti elektromagnetického spektra. Je považovaný za prvý extragalaktický zdroj, z ktorého bolo namerané gama žiarenie s energiou nad 0,5 TeV [17]. Okrem toho bolo v tejto oblasti pozorované aj silné zjasnenie, u ktorého sa v priebehu jednej hodiny zvýšil tok žiarenia gama fotónov až 50-násobne [5].

2.2 Pozorovanie blazara 0716+714

K pozorovaniu som využil bezmesačnú jasnú noc na prelome 23. a 24. novembra 2012. Použitý bol zrkadlový ďalekohľad typu Newton nachádzajúceho sa na hviezdárni vo Vyškove. Jeho priemer je 40 cm, ohnisková vzdialenosť 1650 mm a otáča sa pomocou anglickej montáže. Je vybavený aj štandardnými filtermi (*BVRI*) a funkčnou CCD kamerou G2-0402 z Moravia Instruments (s čipom KAF-0402M).

Blazar bol pozorovaný 3 hodiny a 18 minút so začiatkom pozorovania o 23:53 UT. Boli použité všetky 4 filtre (*BVRI*), ktoré sa stále striedavo menili. Ich expozičná doba bola zvolená na 60 sekúnd. Jeden z týchto snímok je vidieť aj na obrázku 3. Okrem nich bolo zriadených aj 10 dark-snímkov a pre každý filter minimálne 3 flat-snímky.

Napozorované snímky boli spracované pomocou balíka Munipack [24]. Ten sa ovláda jednoducho cez príkazové riadky. Z 10 dark-snímkov bola nakoniec použitá len polovica, pretože ostatné boli s chybami a teda by viac uškodili ako pomohli. Po použití aj flat-snímkov bolo možné pomocou príkazu photometry vykonať apertúrnu fotometriu, ktorej výsledkom boli inštrumentálne magnitúdy cez rôzne veľké apertúry. Vzhľadom na čo najmenšie deviácie boli nakoniec vybrané hodnoty z apertúry s polomerom 6,8488 pixelov.



Obr. 3: Jedna z napozorovaných snímok vo filtri V. Okrem šípkou označanáho blazara a okolitých hviezd je možné rozoznať aj horúce pixely a nežiadúce pásiky.

Na snímku sú očíslované aj možné porovnávacie hviezdy so známymi jasnosťami. Hodnoty cez filtre *BVR* nameral Villata a ostatní v roku 1998 a hodnoty cez filter *I* nameral Ghisellini G. a ostatní v roku 1997 [27]. Rozpísané sú v tabuľke 2.1. Za porovnávaciu hviezdu bola najprv zvolená hviezda s číslom 3 a hviezdy s číslami 2 a 5 boli ako kontrolné.

Tabuľka 2.1: Zoznam možných porovnávacích hviezd s ich zdanlivými magnitúdami a ich neistotami (hviezdy sú rovnako očíslované ako na obr. 3) [27]:

<i>n</i>	B [mag]	V [mag]	R [mag]	I [mag]
1	11,54 ± 0,01	10,99 ± 0,02	10,63 ± 0,01	—
2	12,02 ± 0,01	11,46 ± 0,01	11,12 ± 0,01	10,92 ± 0,04
3	13,04 ± 0,01	12,43 ± 0,02	12,06 ± 0,01	11,79 ± 0,05
4	13,66 ± 0,01	13,19 ± 0,02	12,89 ± 0,01	—
5	14,15 ± 0,01	13,55 ± 0,02	13,18 ± 0,01	12,85 ± 0,05
6	14,24 ± 0,01	13,63 ± 0,02	13,26 ± 0,01	12,97 ± 0,04
7	14,55 ± 0,01	13,74 ± 0,02	13,32 ± 0,01	—
8	14,70 ± 0,01	14,10 ± 0,02	13,79 ± 0,02	—

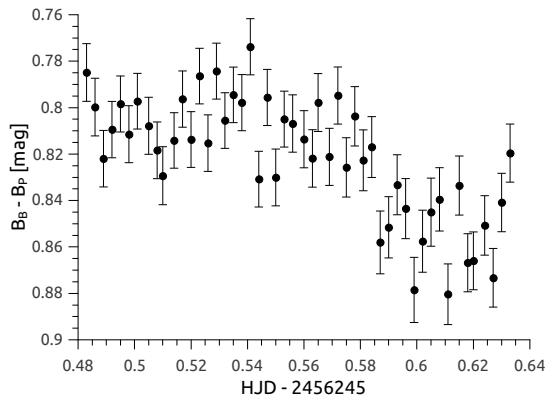
Problémy počas pozorovania a redukcia dát

Tak, ako to býva u pozorovaní, ani tomuto sa nevyhlo pár menších problémov. Už počas merania boli problémy so slabím nedotáčaním hodinového stroja ďalekohľadu. To viedlo k obtiažnejšej kalibrácii (najmä pre absenciu hviezd v súhvezdí Žirafy) a tiež k nedostatočnému sledovaniu pohybu pozorovaných objektov. Aby boli blazar a aj dôležité porovnávacie hviezdy stále v zornom poli, ďalekohľad bol niekoľkokrát jemne nasmerovaný počas 6-sekundových prestávok medzi meranými snímkami. Nanešťastie sa mi ho raz podarilo posunúť opačným smerom a to viedlo k nepoužiteľnosti dvoch snímok (u filtroch *V*, *R*).

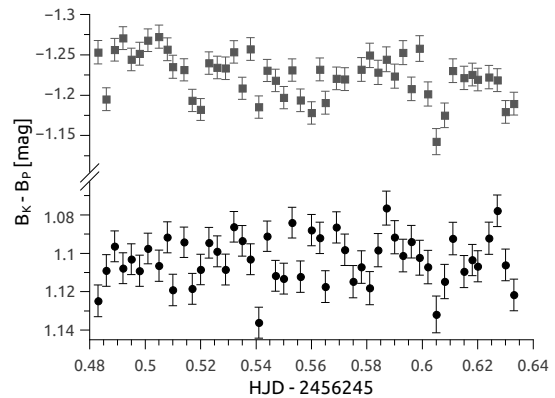
Objekty na snímkach neboli tiež dostatočne zaostrené (aj keď to tak na prvý pohľad nevyzerá). To bol aj jeden z hlavných dôvodov, prečo som použil hodnoty z apertúry o polomere až takmer siedmich pixelov. Príčinou menšieho rozostrenia môže byť aj predchádzajúci problém so sledovaním blazara.

Ďalšie menšie problémy nastali s časom, ktorý počas merania nebežal rovnomerne. Jednotlivé časy zaznamenané v snímkoch boli teda nepoužiteľné. Ich hodnoty sa museli vypočítať na základe počtu snímok a z presného času prvej a poslednej snímky. Tieto časy boli neskôr prepočítané do heliocentrického juliánskeho dátumu.

Najväčším problémom sa ukázali byť jasné pásiky na viacerých snímkoch. Tie vidieť aj na ukázkovej snímke na obrázku 3. Našťastie tieto pásiky, až na pár výnimiek, nezasahovali do dôležitých objektov. Iba dvakrát prechádzali v blízkosti blazara (vo filtroch *I*, *V*) a štyrikrát cez jednu z porovnávacích hviezd. Takto ovplyvnené hodnoty neboli spracovávané. Pásiky sa ukázali aj u 5 dark-snímok, ktoré z tohto dôvodu tiež neboli použité.



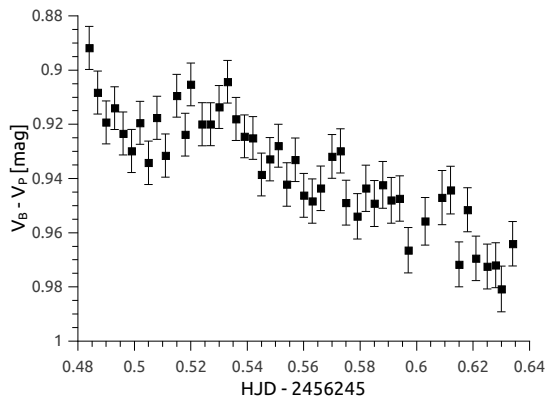
Graf 2.1: Časová závislosť rozdielu jasností blazara a hviezdy č. 3 cez filter B .



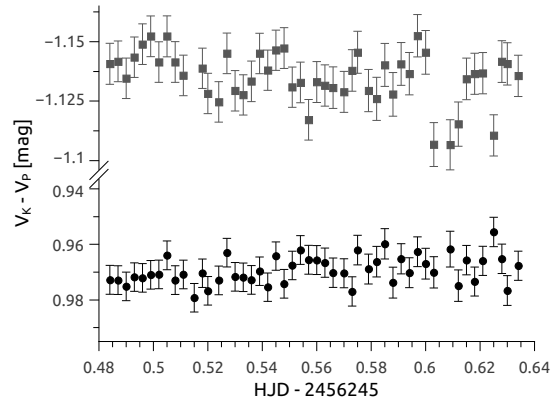
Graf 2.2: Časová závislosť rozdielu jasností hviezdy č. 3 a kontrolných hviezd cez filter B .

Relatívna jasnosť a kontrola porovnávacej hviezdy

Rozdiel jasností medzi blazarom a porovnávacou hviezdou č. 3 cez rôzne filtry je zobrazený na nepárne očíslovaných grafoch 2.1 až 2.7. Čas je uvedený v zlomkoch heliocentrického juliánskeho dátumu. Na susedných grafoch je vyneseno rozdiel jasností medzi touto porovnávacou hviezdou a kontrolnými hviezdami č. 2 a 5 (hviezda č. 2 je na grafoch tá spodná). Z týchto kontrolných grafov je vidieť, že zatiaľ čo jasnosť medzi hviezdami je približne konštantná, jasnosť blazara sa mierne mení. Ľahko sa dá rozoznať najmä postupné klesanie jeho jasnosti vo všetkých štyroch filtroch. Nápadný je aj veľký šum, ktorý majú aj hviezdy a preto môže byť dôsledkom atmosferickej extinkcie.

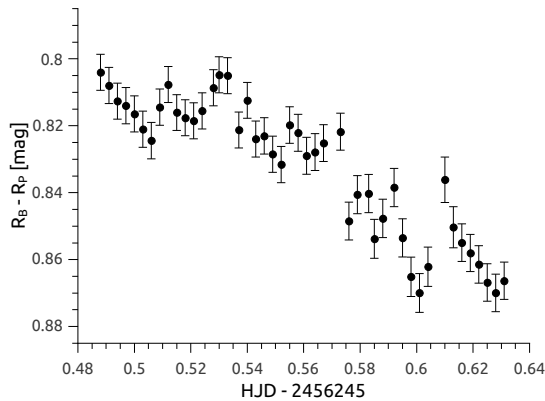


Graf 2.3: Časová závislosť rozdielu jasností blazara a hviezdy č. 3 cez filter V .

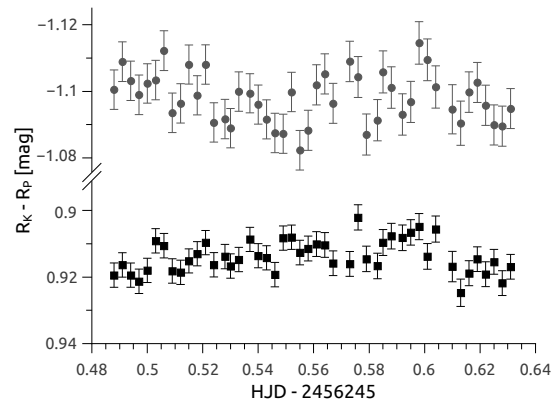


Graf 2.4: Časová závislosť rozdielu jasností hviezdy č. 3 a kontrolných hviezd cez filter V .

Najmenej presné meranie bolo cez filter B , kde priemerná hodnota jednotlivých neistot (štandardných odchyliet) dosahovala až 0,013 magnitúd. Naopak najpresnejšie hodnoty boli z filtra R s priemernou neistotou 0,0056 magnitúd. Najkrajšie grafy zase ukazujú hodnoty z filtra V , kde aj rozdiely jasností porovnávej a kontrolných hviezd sú približne konštantné. Hodnoty z tohto filtra boli zaťažené s priemernou neistotou 0,0082 mag a hodnoty z filtra I neistotou 0,0072 mag. Vo filtri I je vidieť aj jeden bod, ktorý výrazne

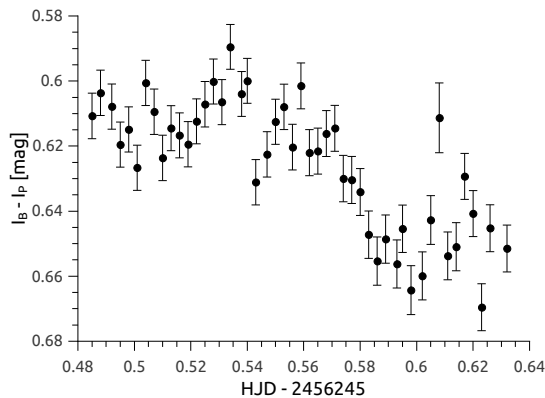


Graf 2.5: Časová závislosť rozdielu jasností blazara a hviezdy č. 3 cez filter *R*.

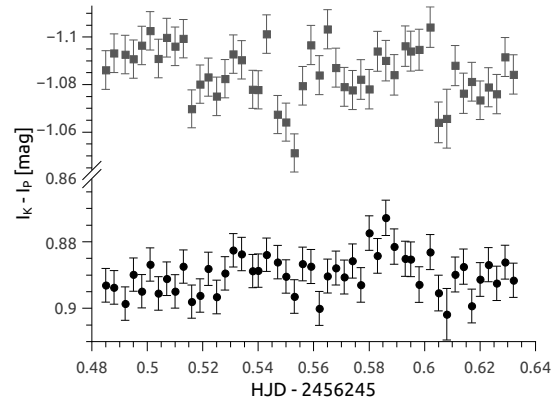


Graf 2.6: Časová závislosť rozdielu jasností hviezdy č. 3 a kontrolných hviezd cez filter *R*.

vyčnieva od ostatných. Príčina je neznáma, lebo ani na danom snímku nie je vidieť nič nezvyčajné. Tento bod však nebude odstránený, pretože podľa kontrolných hviezd nemá nič spoločné s porovnávacou hviezdou a teda sa môže jednať o náhle zjasnenie blazara. Takéto prudké zjasnenie v priebehu len niekoľkých minút je ale dosť nepravdepodobné.



Graf 2.7: Časová závislosť rozdielu jasností blazara a hviezdy č. 3 cez filter *I*.



Graf 2.8: Časová závislosť rozdielu jasností hviezdy č. 3 a kontrolných hviezd cez filter *I*.

Výsledné svetelné krivky blazara 0716+714

Zdanlivá jasnosť objektu by sa už dala vypočítať pomocou známej jasnosti porovnavej hviezdy. Avšak vzhľadom na veľkú neistotu tabuľkovej hodnoty a aj jednotlivých hodnôt by bolo dobré použiť viac ako len jednu porovnávaciu hviezdu. Nakoniec som sa rozhodol použiť štyri hviezdy označené číslami 2, 3, 5 a 6 (hviezda č. 1 bola príliš jasná a ostatné nevyužitú hviezdy boli buď slabé alebo ďaleko). Pre filter *B* boli použité iba hviezdy s číslami 2 a 3. Tento krok by mal viesť k zmenšeniu neistot a aj k spresneniu jednotlivých hodnôt. Samotný výpočet zdanlivej magnitúdy blazara je jednoduchý a dal by sa vyjadriť

nasledovným vzťahom:

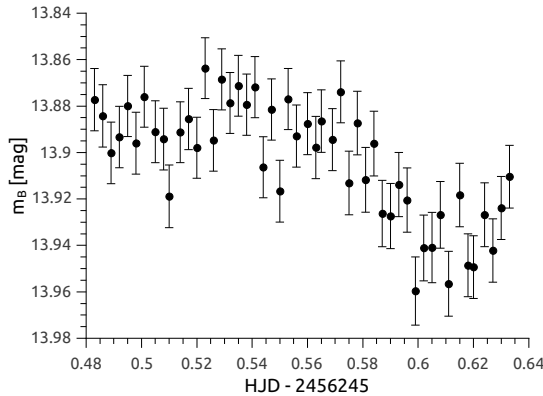
$$m_B = m'_B - \frac{1}{4} \sum_i (m'_i - m_i) \quad i = \{2, 3, 5, 6\},$$

kde m'_B je inštrumentálna magnitúda blazara, m'_i inštrumentálna magnitúda danej hviezdy a m_i je známa hodnota zdanlivej magnitúdy tejto hviezdy. V niektorých prípadoch bola jedna z hviezd nepoužiteľná, vtedy sa spravil priemer len zo zvyšných troch hviezd. Neistoty jednotlivých hodnôt boli vypočítané týmto spôsobom:

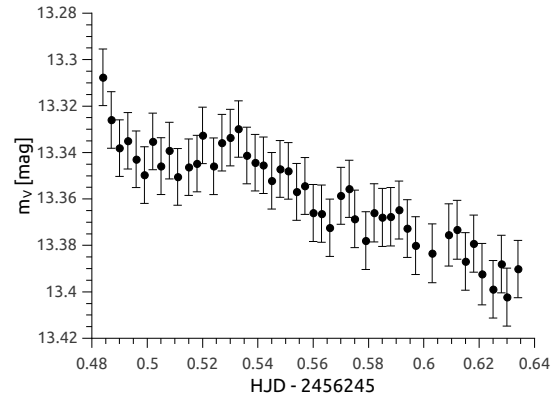
$$\delta m_B = \sqrt{\left(\frac{\partial m_B}{\partial m'_B}\right)^2 \delta m'_B{}^2 + \sum_i \left[\left(\frac{\partial m_B}{\partial m'_i}\right)^2 \delta m'_i{}^2 + \left(\frac{\partial m_B}{\partial m_i}\right)^2 \delta m_i{}^2 \right]}$$

$$\delta m_B = \sqrt{\delta m'_B{}^2 + \frac{1}{25} \sum_i (\delta m'_i{}^2 + \delta m_i{}^2)} \quad i = \{1, 2, 3, 5, 6\}.$$

Vypočítané zdanlivé jasnosti blazara sú vynesené do grafov 2.9 až 2.12.



Graf 2.9: Časová závislosť zdanlivej jasnosti blazara 0716+714 cez filter *B*.

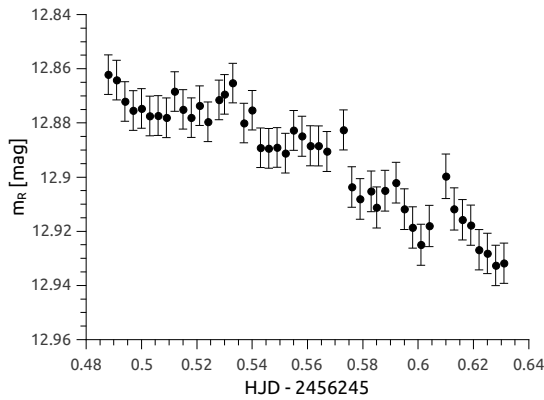


Graf 2.10: Časová závislosť zdanlivej jasnosti blazara 0716+714 cez filter *V*.

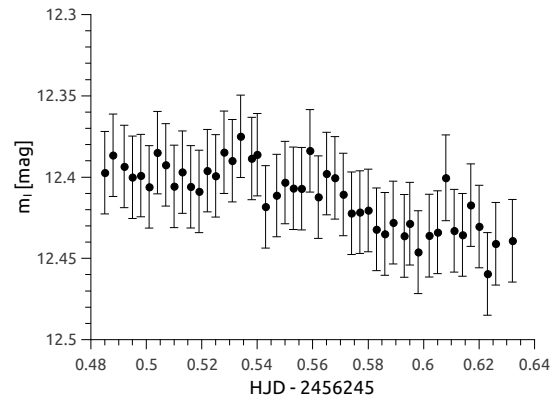
Veľké štandardné odchyľky hodnôt vo filtri *I* sú spôsobené neistotou známych hviezdnych veľkostí v tomto filtri. Vo všetkých štyroch grafoch je zreteľné lineárne klesanie jasnosti. Najväčší rozdiel jasností (0,096 mag) bol zaznamenaný cez filter *B*, kde bol blazar najjasnejší pri 13,864 mag a najslabší pri 13,960 mag. Najväčšia smernica priamky, ktorá bola určená z lineárnej regresie všetkých hodnôt, pochádza z filtra *R*. Ďalšie hodnoty sú zobrazené v tabuľke 2.2. Podrobnejšia analýza bude rozpísaná 3. kapitole.

2.3 Pozorovanie blazara Markarian 421

Tento blazar bol pozorovaný počas dvoch aprílových nocí. Prvé pozorovanie sa uskutočnilo 10. apríla za bezmesačnej noci a prvá snímka bola nameraná presne o 22:58 UT. Toto pozorovanie nakoniec trvalo len 2,5 hodiny, pretože bolo prerušené príchodom väčšej



Graf 2.11: Časová závislosť zdanlivej jasnosti blazara 0716+714 cez filter *R*.

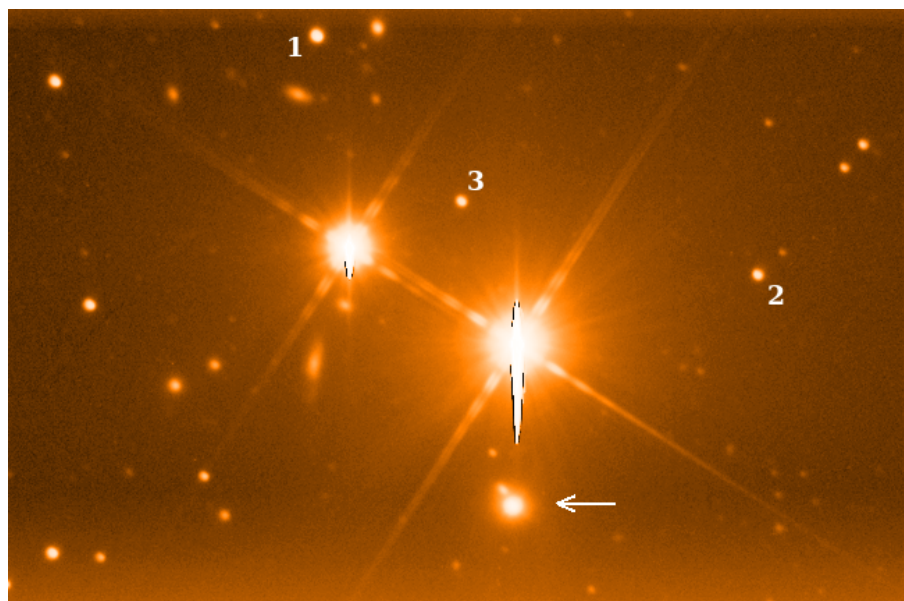


Graf 2.12: Časová závislosť zdanlivej jasnosti blazara 0716+714 cez filter *I*.

Tabuľka 2.2: Porovnanie priemernej hodnoty, maximálnej hodnoty, minimálnej hodnoty, ich rozdielu a smernice lineárnej regresie svetelnej krivky pre rôzne filtre:

filter	\bar{m} [mag]	max [mag]	min [mag]	max - min [mag]	smernica [mag/deň]
<i>B</i>	13,903	13,960	13,864	0,096	$0,391 \pm 0,043$
<i>V</i>	13,358	13,402	13,326	0,076	$0,435 \pm 0,041$
<i>R</i>	12,893	12,933	12,862	0,070	$0,441 \pm 0,026$
<i>I</i>	12,411	12,460	12,375	0,085	$0,362 \pm 0,086$

oblačnosti. Druhé pozorovanie sa uskutočnilo o 4 dni neskôr (14. apríla) so začiatkom merania o 19:55 UT a s dobou trvania 6,3 hodín. K pozorovaniu boli použité rovnaké prístroje ako pri pozorovaní blazara 0716+714 rozpísaného v podkapitole 2.2. Markarian 421 bol v oboch prípadoch pozorovaný cez filter *R* so 60-sekundovou expozičnou dobou jednotlivých snímok. Okrem snímok s blazarom boli urobené aj dark-snímky a flat-snímky a všetky snímky boli následne spracované pomocou balíka Munipack [24]. Výsledkom boli inštrumentálne magnitúdy určené z apertúrnej fotometrie, kde za najvhodnejší polomer apertúry bola v oboch prípadoch zvolená hodnota 5,3543 px.



Obr. 4: Zložená snímka zo všetkých napozorovaných snímok šípkou označeného blazaru Mrk 421 z noci 14./15. apríla.

Snímky z druhého pozorovania tohto blazaru sú zložené do jednej ukázkovej snímky zobrazenej ako obrázok 4. Na nej je hneď vidieť dve výrazne jasné hviezdy, z ktorých tá jasnejšia má hviezdnu veľkosť o 6. magnitúdy. Vychádzajú z nich dlhé difrakčné lúče, atmosférou rozptýlené svetlo a aj chybné pixely na CCD čípe. Takéto osvetlenie by mohlo ovplyvniť namerané jasnosti okolitých objektov, ale podľa zložených snímok z oboch pozorovaní nebolo okolie blazaru a porovnávacích hviezd výrazne osvetlené. Tesne vedľa blazaru je vidieť aj menšiu galaxiu Mrk 421-5 [7], ktorá by nemala zasahovať do použitej apertúry a ovplyvniť tak výsledky.

Na zloženej snímke sú očíslované možné porovnávacie hviezdy so známymi jasnosťami, ktoré sú podrobne rozpísané v tabuľke 2.3. Hodnoty cez filtre *BVR* nameran Villata a ostatní v roku 1998 [30]. Za porovnávaciu hviezdu bola zvolená najjasnejšia hviezda označená číslom 1 a zvyšné dve hviezdy poslúžili ako kontrolné.

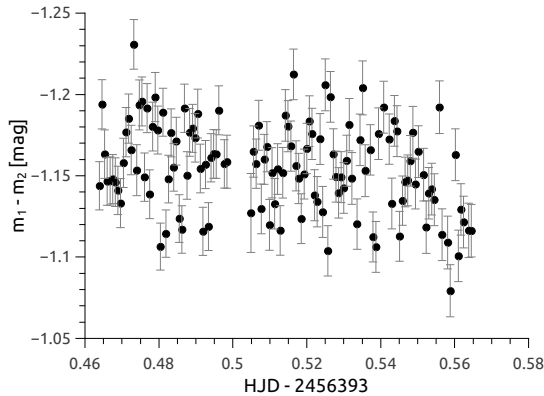
Tabuľka 2.3: Zoznam možných porovnávacích hviezd s ich zdanlivými magnitúdami a ich neistotami (hviezdy sú rovnako očíslované ako na obr. 4) [30]:

<i>n</i>	B [mag]	V [mag]	R [mag]
1	15,02 ± 0,03	14,36 ± 0,02	14,04 ± 0,02
2	16,20 ± 0,04	15,57 ± 0,05	15,20 ± 0,03
3	16,69 ± 0,03	15,77 ± 0,03	15,24 ± 0,03

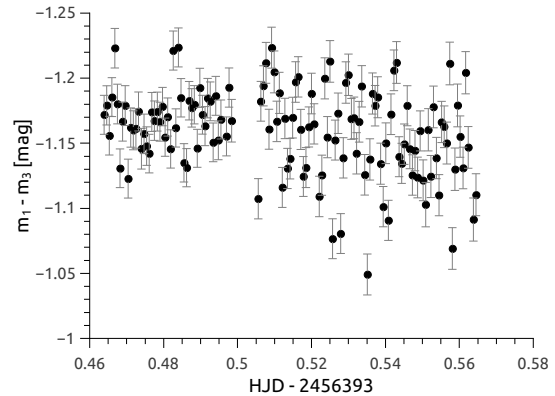
Kontrola porovnávacej hviezdy a výsledné svetelné krivky

Rozdiel jasností medzi porovnávacou hviezdou (č. 1) a kontrolnými hviezdami počas prvého pozorovania je zobrazený na grafoch 2.13 a 2.14. Na nich je síce vidieť približne konštantnú závislosť, ale s veľkým rozptylom hodnôt so štandardnými deviáciami až 0,027 a

0,035 magnitúd, ktorý je spôsobený hlavne malým pomerom signálu k šumu u kontrolných hviezd.



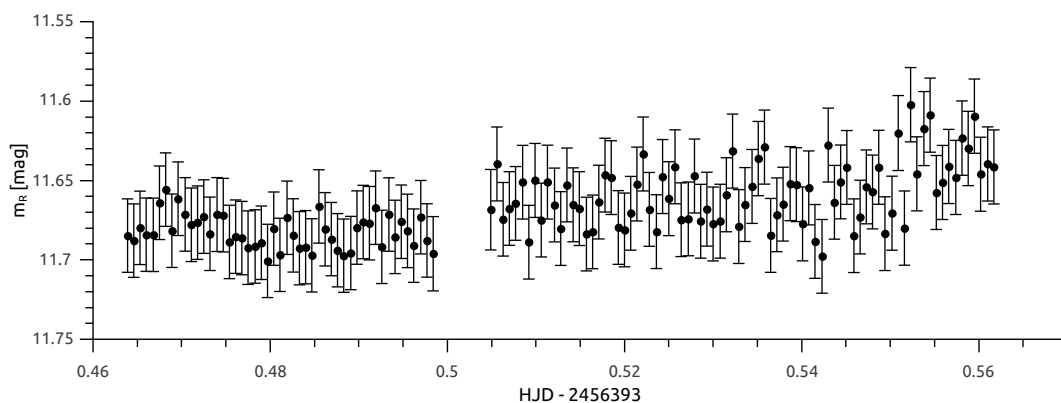
Graf 2.13: Časová závislosť rozdielu jasností medzi hviezdami 1 a 2 cez filter R (z 10.4.).



Graf 2.14: Časová závislosť rozdielu jasností medzi hviezdami 1 a 3 cez filter R (z 10.4.).

Z rozdielu jasností medzi blazárom a porovnávacou hviezdou počas prvého pozorovania a pomocou známej jasnosti porovnávacej hviezdy bola zostrojená svetelná krivka zobrazená na grafe 2.15, ktorá vyjadruje závislosť zdanlivej hviezdnej veľkosti blazara na čase uvedenom v zlomkoch heliocentrického juliánskeho dátumu. Na tomto grafe a aj na grafoch s kontrolnými hviezdami je vidieť 8-minútovú medzeru uprostred pozorovania, kde je vynechaných 8 snímok. Táto medzera bola spôsobená prechodom nízkej oblačnosti, ktorá výrazne oslabil jasnosť pozorovaných objektov.

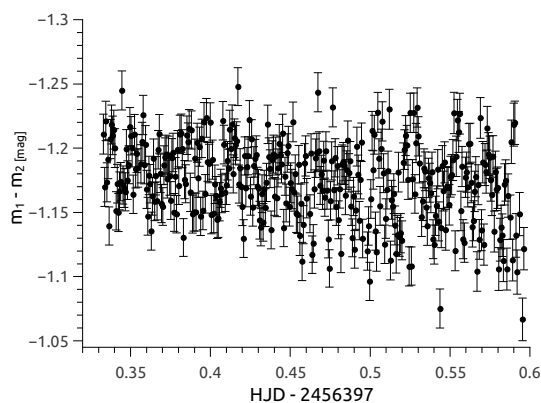
Priemerná jasnosť blazara Mrk 421 z tohto pozorovania bola 11,66 mag, minimálna nameraná hodnota bola 11,51 mag a maximálna 11,70 mag. Priemerná štandardná deviácia jednotlivých hodnôt je len 0,023 mag, ale rozptyl spôsobený nechceným šumom je viditeľne väčší.



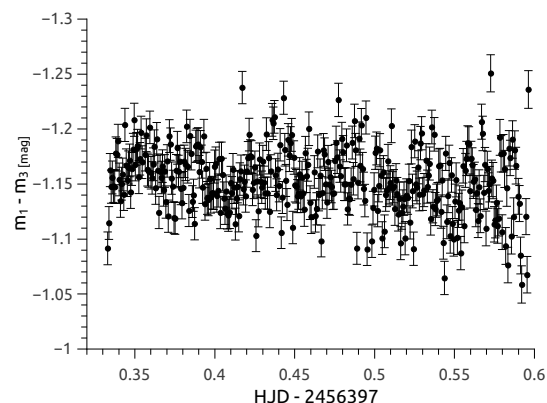
Graf 2.15: Priebeh jasnosti blazara Mrk 421 cez filter R (určeného pomocou hviezdy č. 1) z prvého pozorovania (10. apríla).

Približne rovnako dopadlo aj druhé pozorovania zo 14. apríla. Rozdiel jasností medzi porovnávacou hviezdou (č. 1) a kontrolnými hviezdami počas druhého pozorovania je

zobrazený na grafoch 2.16 a 2.17. Aj na týchto grafoch je vidieť veľký rozptyl hodnôt (0,031 a 0,030 mag) spôsobený menej jasnými kontrolnými hviezdami.

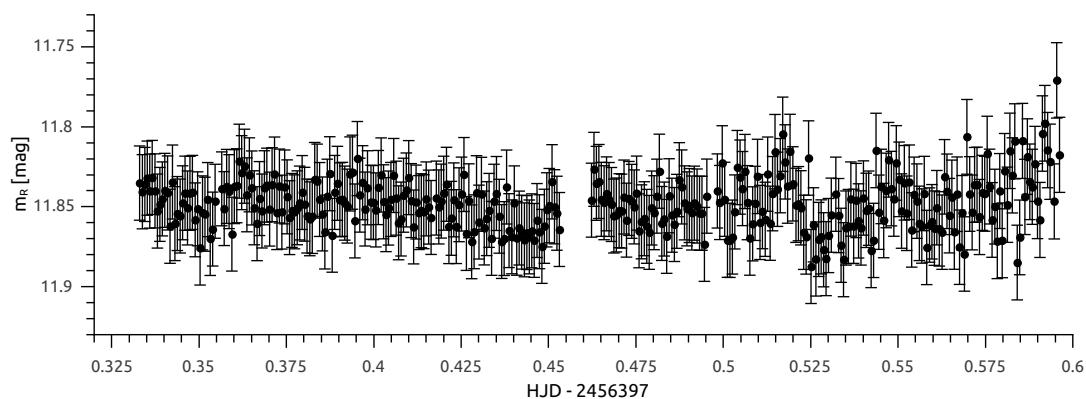


Graf 2.16: Časová závislosť rozdielu jasností medzi hviezdami 1 a 2 cez filter R (zo 14.4.).



Graf 2.17: Časová závislosť rozdielu jasností medzi hviezdami 1 a 3 cez filter R (zo 14.4.).

Svetelná krivka z druhého pozorovania bola zostrojená rovnakým spôsobom pomocou porovnávacej hviezdy a je zobrazená na grafe 2.18. Aj na grafoch tohto pozorovania je vidieť uprostred 10-minútovú absenciu hodnôt, ktoré tentokrát neboli spôsobené oblačnosťou, ale nedostatočným sledovaním zorného poľa hodinovým strojom ďalekohľadu a následnej absencii pozorovaného blazara na ôsmich nameraných snímkach. Taktiež je tam menej patrná 3-minútová medzera, počas ktorej muselo byť nastavované zorné pole ďalekohľadu.



Graf 2.18: Priebeh jasnosti blazara Mrk 421 cez filter R (určeného pomocou hviezdy č. 1) z druhého pozorovania (14. apríla).

Priemerná jasnosť blazara Mrk 421 z druhého pozorovania bola 11,85 mag, minimálna nameraná hodnota bola 11,77 mag a maximálna 11,92 mag. Priemerná štandardná deviácia jednotlivých hodnôt bola v tomto prípade takmer rovnaká (0,023 mag).

Kapitola 3

Analýza svetelných kriviek

3.1 Redukcia šumu a interpolácia

Z grafov predchádzajúcej kapitoly je vidieť, že sa nameraná jasnosť blazara výrazne mení aj v priebehu niekoľkých minút. Tieto vysokofrekvenčné zmeny jasnosti sú avšak pozorovateľné aj medzi porovnávacou hviezdou a kontrolnými hviezdami a preto sú pravdepodobne spôsobené nechceným šumom. Ten môže mať na analýzu svetelnej krivky výrazný vplyv, ktorého sa potrebujeme zbaviť.

V súčasnosti existuje k redukcii šumu niekoľko možných metód. Niektoré sú dobre opísané napríklad aj v práci od E. J. Kostelicha a T. Schreibera [11]. Podľa nej je možné k redukcii šumu dynamického systému použiť jednoduché vyhľadanie krivky, ktorého upravený vzťah pre ekvidistantné hodnoty má tento tvar:

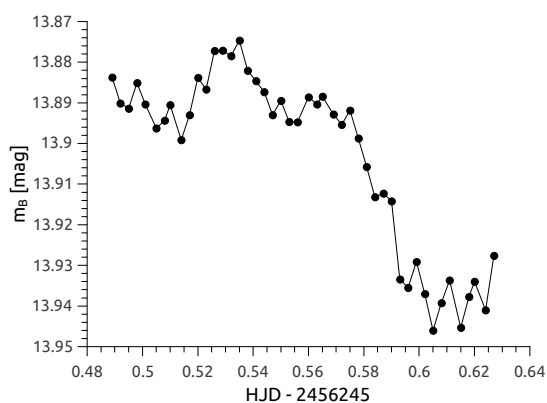
$$x'_i = \frac{1}{m} \sum_{\substack{k=-m/2 \\ k \neq 0}}^{m/2} x_{i+k},$$

kde množina $\{x_i\}$ predstavuje pôvodnú svetelnú krivku, $\{x'_i\}$ vyhľadenú krivku a párne celé číslo m udáva počet susedných bodov použitých k vyhľadaniu. Tento počet by mal byť vhodne zvolený, pretože pre jej veľké hodnoty sa začne v krivke výrazne prejavovať linearizácia, ktorá by mala negatívny vplyv na analýzu.

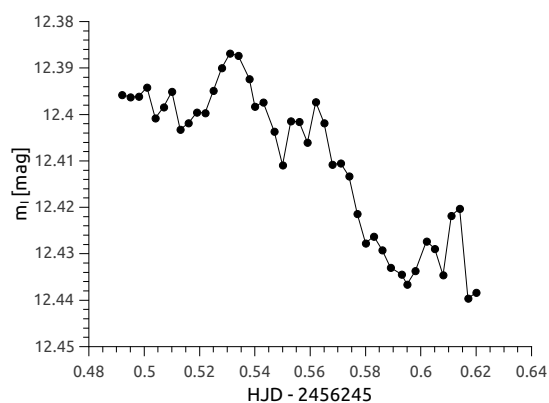
Vzhľadom na relatívne presné meranie s malým počtom hodnôt u blazara 0716+714 cez filtre V a R nebolo nutné použiť toto vyhľadovanie. To bolo potrebné použiť na hodnoty namerané cez filtre B a I , kde sa k spriemerovaniu použili 4 susedné hodnoty ($m = 4$). Takto upravené závislosti sú zobrazené na grafoch 3.1 a 3.2.

Vyhľadanie bolo potrebné vykonať aj na svetelné krivky blazara Mrk 421, kde sa v oboch prípadoch použilo k vyhľadaniu 6 susedných hodnôt ($m = 6$). Vyhľadené krivky Mrk 421 sú vidieť na grafoch 3.3 a 3.4.

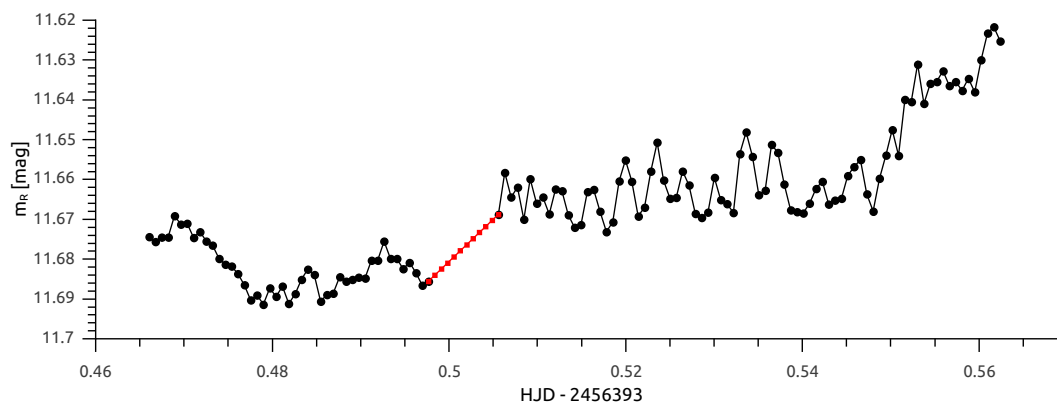
Taktiež je dôležité, aby svetelné krivky mali hodnoty v rovnomerne rozložených časových okamihoch, čo je dôležité pri rekonštrukcii trajektórií vo fázovom priestore. Preto museli byť v časových okamihoch, kde chýbali hodnoty, vygenerované nové hodnoty. K tomu bola použitá najjednoduchšia metóda a to lineárna interpolácia medzi najbližšími pôvodnými hodnotami. Vygenerované hodnoty sú na grafoch vyznačené červenou farbou.



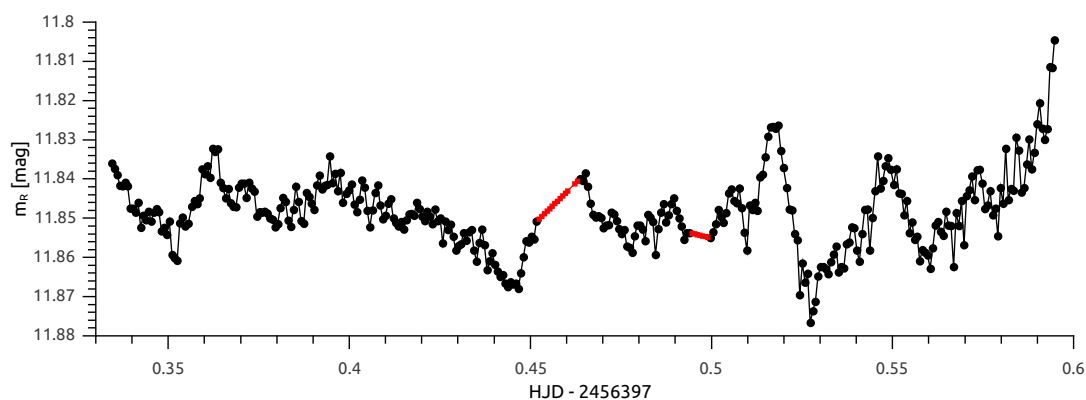
Graf 3.1: Vyhľadaná svetelná krivka blazara 0716+714 vo filtri B.



Graf 3.2: Vyhľadaná svetelná krivka blazara 0716+714 vo filtri I.



Graf 3.3: Vyhľadaná svetelná krivka blazara Mrk 421 pozorovaného 10. apríla.



Graf 3.4: Vyhľadaná svetelná krivka blazara Mrk 421 pozorovaného 14. apríla.

3.2 Fourierova analýza

Fourierova analýza patrí medzi najpoužívanejšie metódy spracovania signálu. Ide o transformáciu, ktorá prevádza časovo závislý priebeh funkcie na súčet harmonických funkcií. Je definovaná podľa nasledovného vzťahu:

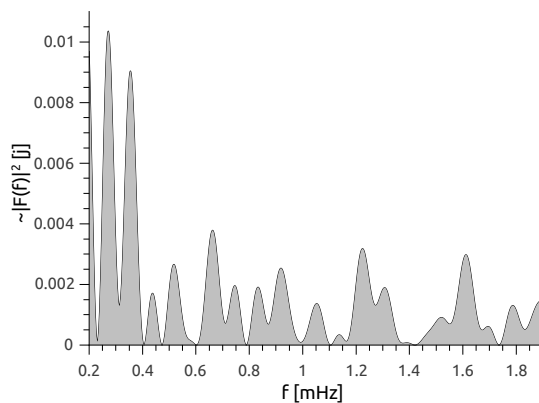
$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i2\pi\nu t} dt,$$

kde $f(t)$ je pôvodná funkcia a $F(\nu)$ je získaná transformovaná funkcia, ktorá vyjadruje frekvenčné spektrum. Ak je pôvodná funkcia pravidelná, vo frekvenčnom spektre sa zviditeľnia diskrétné hodnoty (píky), ktoré potom vyjadrujú najčastejšie frekvencie a periódy v pôvodnom signále. Z chaotických a stochastických systémov by malo frekvenčné spektrum vyzerat' spojite a bez akýchkoľvek výrazných píkov.

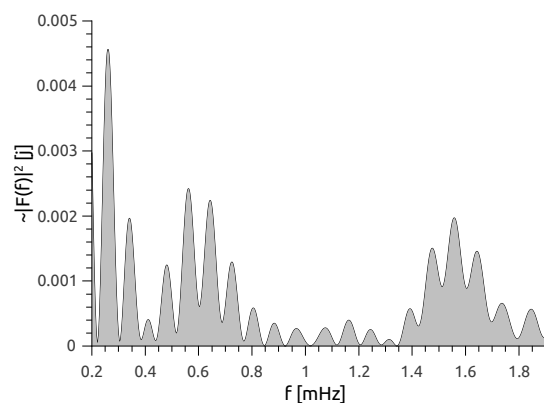
Z definičného vzťahu je vidieť, že Fourierova transformácia vyžaduje nekonečne veľký a spojitý časový priebeh signálu, a to reálne nie je možné získať. Namerané hodnoty väčšinou pozostávajú zo súboru N diskrétnych hodnôt a z určitého časového intervalu T . Preto je potrebné použiť upravenú transformáciu, ktorá by vyhovovala týmto obmedzeniam, a k tomu slúži diskretná Fourierova transformácia s nasledovným tvarom:

$$F_N(\nu) = \sum_{k=1}^N f(t_k)e^{i2\pi\nu t_k},$$

kde t_k je čas namerania k -tej hodnoty z pôvodného súboru dát. Výsledné frekvenčné spektrum $F_N(\nu)$ sa potom vzhľadom na komplexné členy často vyjadruje v absolútnej hodnote $|F_N(\nu)|$ alebo v druhej mocnine $|F_N(\nu)|^2 = F_N^*(\nu)F_N(\nu)$ [4].



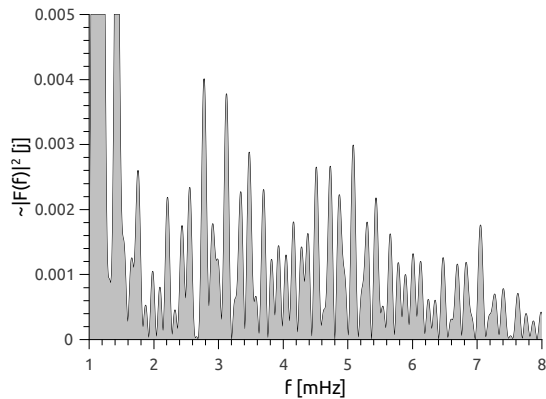
Graf 3.5: Frekvenčné spektrum z napozorovaných dát blazara 0716+714 cez filter R .



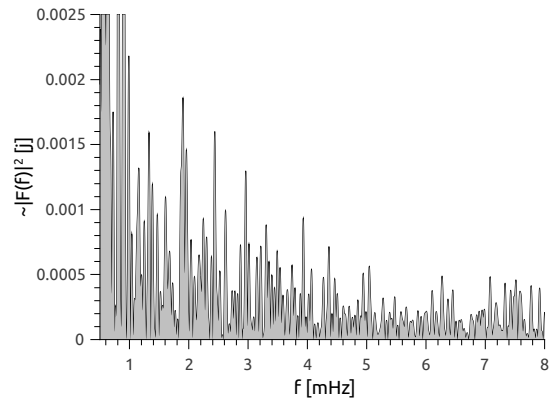
Graf 3.6: Frekvenčné spektrum z napozorovaných dát blazara 0716+714 cez filter V .

Táto analýza bola použitá aj na napozorované svetelné krivky blazarov. Na tie tentokrát nebola použitá žiadna vyhľadovacia funkcia a ani interpolácia. Avšak krivky blazara 0716+714 boli ešte upravené o lineárny trend, ktorý bol vyhodnotený v podkapitole 2.2. Výsledné frekvenčné spektrá cez filtre R a V je vidieť na grafoch 3.5 a 3.6. Zobrazené veľké hodnoty v nízkych frekvenciách sú pravdepodobne spôsobené konečnosťou časového

intervalu pozorovania, ktorý v prípade 0716+714 bol veľký len 3,3 hodín. Frekvenčné spektrá z pozorovania Mrk 421 sú vidieť na grafoch 3.7 a 3.8. Vzhľadom na väčší počet napozorovaných hodnôt je vidieť aj väčší počet maxím vo frekvenčnom spektre.

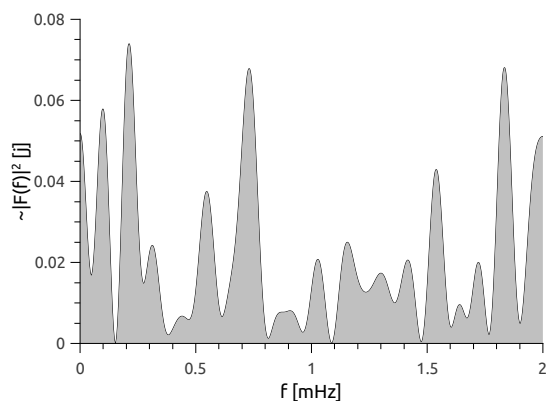


Graf 3.7: Frekvenčné spektrum Mrk 421 cez filter R z prvého pozorovania (10.4).

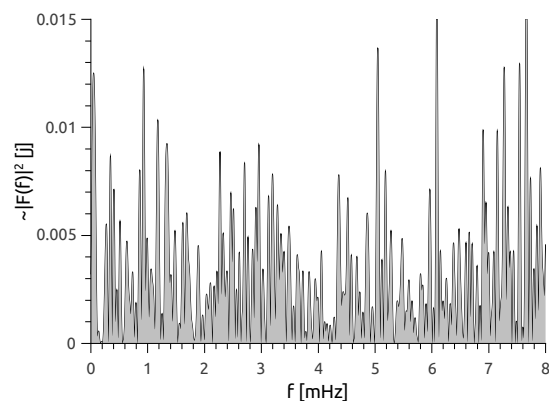


Graf 3.8: Frekvenčné spektrum Mrk 421 cez filter R z druhého pozorovania (14.4).

Tieto spektrá nevykazujú žiadne výraznejšie frekvencie a teda môžu byť skôr dôsledkom nepravidelného a náhodného správania. Pre lepšie porovnanie s čisto náhodným frekvenčným spektrom bola vygenerovaná krivka s náhodnými gaussovsky rozloženými hodnotami. Tento tzv. Gaussovský šum [28] bol najprv vygenerovaný tak, aby sa mohol porovnať s grafmi 3.5 a 3.6 a teda mal 50 hodnôt, medzi ktorými bola 250-sekundová medzera. Frekvenčné spektrum z týchto hodnôt je zobrazené na grafe 3.9. Pre porovnanie s blazarom Mrk 421 z pozorovania 14. apríla bola vygenerovaná krivka s 350 hodnotami a so 62,15-sekundovými medzerami. Jej frekvenčné spektrum je vidieť na grafe 3.10. Ako sa dalo očakávať, ani na týchto grafoch nie je vidieť žiadne výraznejšie frekvencie. To by mohlo znamenať, že svetelné krivky blazarov sa správajú rovnako náhodne ako aj vygenerovaná krivka, ale v skutočnosti je tu stále možnosť, že sa správajú len chaoticky a teda vykazujú určité skryté správanie, ale o tom bude pojednávať podkapitola 3.4.



Graf 3.9: Frekvenčné spektrum z 50 hodnôt Gaussovského šumu ($\Delta t = 250$ s).



Graf 3.10: Frekvenčné spektrum z 350 hodnôt Gaussovského šumu ($\Delta t = 62,15$ s).

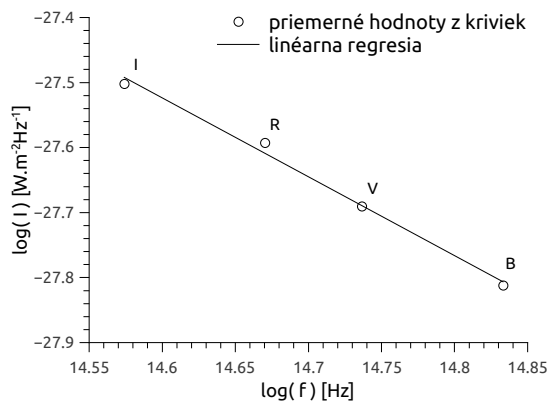
3.3 Určenie spektrálneho indexu

Ďalšou možnosťou využitia napozorovaných dát je určenie spektrálneho indexu. Ten vyjadruje závislosť medzi hustotou toku žiarenia a frekvenciou podľa už spomínaného vzťahu $I \sim \nu^{-\alpha}$. Predpokladá sa, že takáto závislosť je spôsobená hlavne netepelným synchrotrónovým žiarením [3]. U aktívnych galaxií je jej hodnota väčšinou kladná a nachádzajúca sa v rozmedzí medzi 1 až 2.

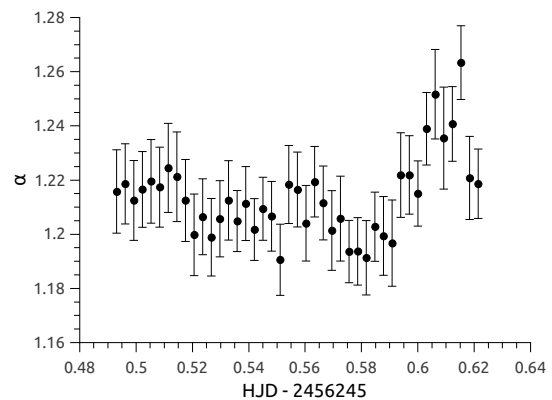
Spektrálny index sa dobre určuje z nameraného spektra, ale v tomto prípade nie je takéto spektrum celkom k dispozícii. Napriek tomu sa dá spektrálny index odhadnúť aj z napozorovaných hodnôt v štandardných filtroch *BVRI* a z určených zdanlivých magnítud. K tomuto odhadu je potrebné vedieť efektívnu vlnovú dĺžku λ_{ef} a aj absolútnu hustotu toku I_0 (pre 0. magnítudu) jednotlivých filtrov. Tieto hodnoty pre štandardné (Johnson-Cousin) filtre zistil napríklad M. S. Bessell v roku 1979 [2]. Ďalej je potrebné započítať hodnoty intergalaktickej extinkcie pre jednotlivé filtre. V tejto práci boli použité rovnaké korekcie ako boli v práci od G. Ghiselliniho [6], kde bola navrhnutá korekcia hviezdnej veľkosti pre pozorovania blazara 0716+714 vo filtri *V* o hodnotu $A_V = 0,23^m$. Všetky potrebné hodnoty sú rozpísané v tabuľke 3.1.

Tabuľka 3.1: Nameraná priemerná magnitúda, korekcia o extinkciu, efektívna vlnová dĺžka a absolútna hustota toku pre rôzne filtre:

filter	\bar{m} [mag]	A_i/A_V	λ_{ef} [μm]	I_0 [$10^{-23} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$]
<i>B</i>	13,903	0,30	0,44	4,26
<i>V</i>	13,358	0,23	0,55	3,64
<i>R</i>	12,893	0,19	0,64	3,08
<i>I</i>	12,411	0,14	0,79	2,55



Graf 3.11: Závislosť logaritmu hustoty svetelného toku od logaritmu efektívnej frekvencie.



Graf 3.12: Závislosť spektrálneho indexu blazara 0716+714 na čase (v heliocentrickom juliánskom dátume).

Spektrálny index bol najprv určený z priemerných hodnôt zdanlivej jasnosti počas celého pozorovania blazara 0716+714. Závislosť logaritmu svetelného toku od logaritmu frekvencie je zobrazená na grafe 3.11. Táto závislosť by mala byť lineárna a jej smernica by

mala odpovedať zápornej hodnote spektrálneho indexu, ktorý v tomto prípade mal hodnotu $1,213 \pm 0,074$.

Z jednotlivých hodnôt zo svetelných kriviek¹ bola určená závislosť spektrálneho indexu na čase. Tá je zobrazená na grafe 3.12. Jej hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 1,19 až 1,26 a priemerná hodnota vychádzala na 1,2137.

3.4 Deskriptory chaosu

Z nameraných svetelných kriviek sa možno zdá, že sa krivka chová náhodne (stochasticky) a jednotlivé hodnoty sú spôsobené nepresnosťou merania alebo veľkým počtom stupňov voľnosti pozorovaného systému, ale nemusí to byť celkom pravda. Podobné (aperiodické) chovanie môžu vykazovať i systémy s malým počtom stupňov voľnosti bez prítomnosti akejkoľvek náhody. Takéto systémy označujeme ako deterministicky chaotické. Jednou z charakteristík týchto systémov je ich veľká citlivosť na počiatočných podmienkach a teda nepredvídateľnosť v dlhodobějších časových škálach. Dajú sa opísať len cez sústavu nelineárnych diferenciálnych rovníc a preto sa v klasických lineárnych postupoch nedajú rozlíšiť od náhodných procesov. Príkladom môže byť fourierova analýza, v ktorej výsledkom nie je žiadna výrazná frekvencia, ale z toho sa nedá určiť, či sa jedná o deterministicky chaotický alebo čisto náhodný (stochastický) proces. K tomuto rozlíšeniu je vhodné sledovať trajektórie vo fázovom priestore a následne popísať ich geometrickú štruktúru (prípadne aj jej závislosť na čase) pomocou veličín, ktoré sa všeobecne označujú ako deskriptory chaosu.

Referenčnou literatúrou k tejto podkapitole (ak nie je uvedený iný zdroj) je kniha od J. Horáka a ostatných: *Deterministický chaos a jeho fyzikální aplikace* [9].

3.4.1 Rekonštrukcia trajektórie vo fázovom priestore

Bod vo fázovom priestore zvyčajne vyjadruje závislosť medzi hybnosťami a súradnicami častice alebo sústavy častíc v nejakom určitom okamihu. Potom trajektórie zložené z týchto bodov môžu znázorňovať dynamiku pozorovaného systému.

K rekonštrukcii trajektórií fázového priestoru by nám teda mali stačiť potrebné súradnice a hybnosti, ktoré avšak nie je možné určiť pri pozorovaní blazara, kde disponujeme len časovou postupnosťou rôznych tokov žiarenia. Podľa Takensovho teorému [20] by to ale nemal byť problém. Podľa neho je možné zrekonštruovať trajektórie pomocou pozorovania len jednej z premenných systému. Takéto trajektórie síce nebudú rovnaké ako tie, ktoré sú určené zo všetkých premenných, ale mali by byť dosť podobné a aj viesť k potrebným výsledkom.

Takensov teorém o vnorení hovorí, že ak máme súbor hodnôt $x(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ v rovnomerne rozložených časových okamihoch $t_1, t_2 = t_1 + \Delta t, \dots, t_i + (i-1)\Delta t, \dots, t_N$, potom môžeme skonštruovať m -rozmerný signál nasledovne:

$$X(t_i) = [x(t_i), x(t_i + \tau), \dots, x(t_i + (m-1)\tau)], \quad i = 1, 2, \dots, N - (m-1)\tau,$$

¹Svetelné krivky vo filtroch B a I boli vyhládené podľa podkapitoly 3.1, svetelné krivky vo filtroch V a R neboli upravované.

kde m je dostatočne veľká dimenzia vnorenia a τ je vhodne zvolené časové oneskorenie. Voľba týchto parametrov je veľmi dôležitá, pretože môže výrazne ovplyvniť výsledok rekonštrukcie. Teorém tiež predpokladá, že máme nekonečne dlhú časovú radu meraní absolútne presne bez akéhokoľvek šumu. To prakticky nie je možné namerať, ale aj napriek tomu sa zdá byť teorém užitočný.

Dimenzia vnorenia by mala byť podľa teorému aspoň dvojnásobne väčšia ako korelačná dimenzia ($m > 2d_c$), ktorá patrí medzi deksripty chaosu a teda charakterizuje daný deterministicky chaotický systém. Existuje niekoľko metód pre odhad dostatočne veľkej dimenzie vnorenia. Najčastejšou metódou je pomocou konvergovania charakteristického invariantu vo fázovom priestore k určitej hodnote. Jedným z takýchto invariantov môže byť aj hodnota spomínanej korelačnej dimenzie. Metóda spočíva v určovaní tohto invariantu postupne pre každú dimenziu vnorenia. Potom sa sleduje priebeh závislosti hodnoty invariantu od dimenzie vnorenia. Tá by mala byť spočiatku rastúca, ale zároveň by mala konvergovať k určitej hodnote, ktorú by potom nemala výrazne presiahnuť. Dimenzia vnorenia, pri ktorej dojde k tomuto ustáleniu (saturácii) invariantu, môže byť potom považovaná za vhodne zvolenú. Treba poznamenať, že k saturácii dôjde len u deterministicky chaotických systémoch. U náhodných (stochastických) systémoch k ustáleniu invariantu nedôjde a jeho závislosť by mala byť rastúca pre všetky dimenzie vnorenia.

Ešte pred určením vhodnej dimenzie vnorenia je potrebné určiť časové oneskorenie. To by nemalo byť veľmi malé, pretože by inak nebol veľký rozdiel medzi súradnicami fázového priestoru a trajektórie by sa sústredili okolo diagonály. Ak by bolo zvolené veľmi veľké, rozdiel medzi súradnicami by bol natoľko veľký, že by sa javili ako nezávislé a nevedlo by to k žiadnym výsledkom. K jeho dobrému odhadu preto existuje niekoľko možných metód. Jednou z nich je sledovanie autokorelačnej funkcie.

Autokorelačná funkcia daného kroku k môže byť určená nasledovne:

$$A(k) = \frac{c_k}{c_0}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1,$$

kde c_k je odhad autokovariančnej funkcie:

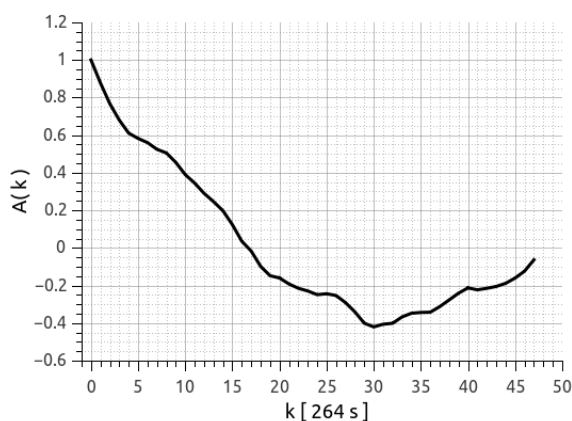
$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} [x(t_i) - \bar{x}][x(t_{i+k}) - \bar{x}], \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i).$$

Za odhad časového oneskorenia sa potom môže zvoliť taká hodnota τ , ktorá odpovedá kroku $k = \tau/\Delta t$, kde autokorelačná funkcia (prvýkrát) poklesne pod hodnotu $1/e$.

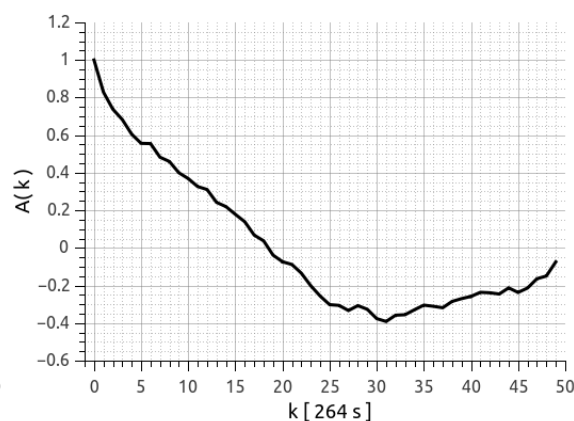
Nevýhodou autokorelačnej funkcie je fakt, že sa jedná o lineárnu metódu a teda neberie do úvahy nelineárnu dynamiku charakteristickú pre chaos. Preto by bolo možno vhodnejšie použiť iné (nelineárne) metódy. Jednou z nich je napríklad sledovanie miery vzájomnej informácie. Tá však vyžaduje väčšie množstvo nameraných hodnôt a preto som sa ju rozhodol nepoužiť.

Priebeh autokorelačnej funkcie u svetelných kriviek blazara 0716+714 vo filtroch R a V je zobrazený na grafoch 3.13 a 3.14. Jeden krok k mal v tomto prípade hodnotu² 264 sekúnd. Z grafov je vidieť, že autokorelačná funkcia v oboch prípadoch klesla prvýkrát pod hodnotu $1/e$ pri kroku 11, ktorý odpovedá časovému oneskoreniu 48 minút a 24 sekúnd.

²jedná sa o čas medzi dvoma nameranými snímkami

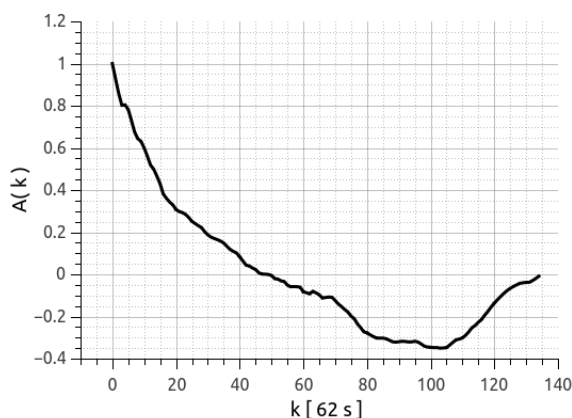


Graf 3.13: Závislosť autokorelačnej funkcie na časovom oneskorení u 0716-714 (filter R).

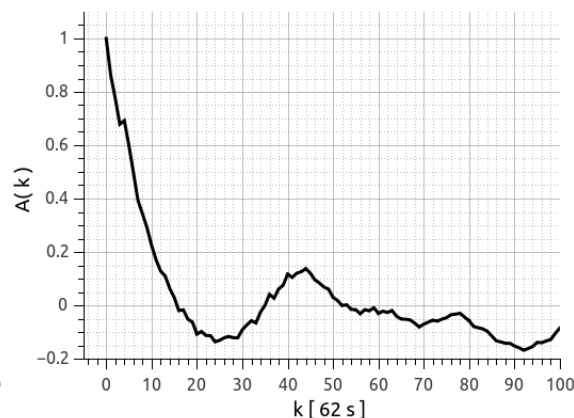


Graf 3.14: Závislosť autokorelačnej funkcie na časovom oneskorení u 0716-714 (filter V).

Priebeh autokorelačnej funkcie u svetelných kriviek blazara Mrk vo filtroch R z pozorovaní 10.4. a 14.4. je zobrazený na grafoch 3.15 a 3.16. Krok k mal v tomto prípade hodnotu približne 62 sekúnd. Autokorelačná funkcia z prvého pozorovania klesla pod hodnotu $1/e$ pri kroku 17, ktorý odpovedá časovému oneskorení 17 minút a 37 sekúnd. Z druhého pozorovania klesla pod hodnotu $1/e$ pri kroku 8, čo odpovedá 8 minútam a 17 sekundám. Takto určené hodnoty časových oneskorení boli neskôr použité pri výpočte dimenzie vnorenia a korelačnej dimenzie.



Graf 3.15: Závislosť autokorelačnej funkcie na časovom oneskorení pre Mrk 421 z 10.4.



Graf 3.16: Závislosť autokorelačnej funkcie na časovom oneskorení pre Mrk 421 zo 14.4.

3.4.2 Korelačná dimenzia

Korelačná dimenzia sa všeobecne zaraďuje pod tzv. fraktálne dimenzie. Fraktálnu dimenziu môžeme chápať ako rozmer podmnožiny fázového priestoru, ktorý je zaplnený trajektóriami daného deterministického systému³. Napríklad ak pozorovaný systém má

³takáto podmnožina (podpriestor) sa odborné nazýva ako atraktor

trajektórie vo fázovom priestore rozložené iba v rovine, mohla by mať jeho fraktálna dimenzia celočíselnú hodnotu rovnú dvom. Avšak fraktálne dimenzie chaotických systémov sú typické v tom, že nemajú celočíselné hodnoty. Príkladom môže byť fraktálna dimenzia Lorenzovho systému, ktorá má hodnotu približne 2,05. Takéto fraktálne dimenzie je síce náročné predstaviť, ale ich geometrický význam je zrejмый. Podľa [9] sa jedná o exponent, ktorý vyjadruje, ako sa s veľkosťou mení množstvo

$$\text{množstvo} = \text{vekos}^{\text{dimenzia}},$$

kde *množstvo* môže predstavovať objem a *vekosť* nejakú lineárnu mierku. Dimenziu je potom možné vypočítať upraveným tohto vzťahu ako

$$\text{dimenzia} = \lim_{\text{vekos} \rightarrow 0} \frac{\ln(\text{množstvo})}{\ln(\text{vekos})}.$$

Podobným spôsobom sa môže vypočítať aj korelačná dimenzia d_C , kde *množstvom* bude v tomto prípade počet stavov vo fázovom priestore vyjadreného pomocou korelačného integrálu $C^{(m)}(r) \sim r^{d_C}$. Korelačný integrál sa môže vypočítať ako

$$C^{(m)}(r) = \frac{2}{M(M-1)} \sum_{\substack{i=1 \\ j=i+1}}^M \Theta(r - \|\mathbf{X}(t_i) - \mathbf{X}(t_j)\|),$$

kde $\Theta(x)$ je Heavisideova funkcia, $M = N - (m-1)\tau$, N je počet nameraných hodnôt a $\mathbf{X}(t_i)$ je poloha i -tej hodnoty v m -rozmernom fázovom priestore. Pre korelačnú dimenziu potom platí

$$d_C = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\ln C^{(m)}(r)}{\ln r}.$$

Vzhľadom na uvedené limity, ktoré sa reálne nedajú dodržať, sa predpokladá, že škálovanie $C^{(m)}(r) \sim r^{d_C}$ sa zachováva aj pre konečné hodnoty r . Zároveň sa tiež predpokladá, že tieto hodnoty sa nachádzajú v určitom intervale $r \in \langle r_{\min}, r_{\max} \rangle$, ktorý je charakteristický lineárnou závislosťou medzi logaritmom korelačného integrálu a logaritmom hodnoty r . Táto lineárna oblasť sa všeobecne označuje ako škálovacia oblasť korelačného integrálu a dobre je viditeľná napríklad na grafe 3.17, kde bol korelačný integrál zostrojený pre dimenziu vnorenia $m = 3$.

K určení korelačnej dimenzie existuje množstvo rôznych metód, ale takmer všetky sú založené na subjektívnom zvolení buď škálovacej oblasti alebo parametrov, pomocou ktorých sa táto oblasť hľadá. Jednou takouto metódou pre odhad korelačnej dimenzie je tzv. „tetiva“. Tá je založená na voľbe vhodných hodnôt r_{\min} a r_{\max} a následne k určení smernice zo spojnice medzi týmito dvoma bodmi korelačného integrálu

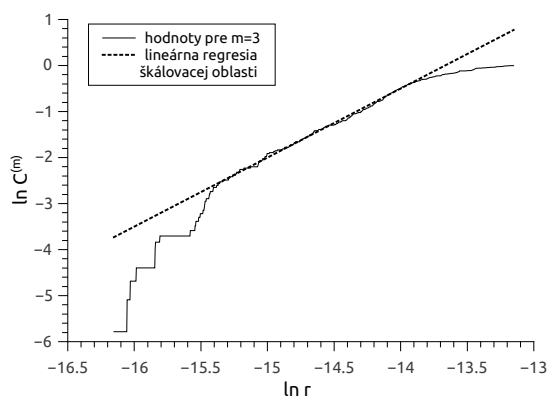
$$d_C(r) = \frac{\ln C^{(m)}(r_{\max}) - \ln C^{(m)}(r_{\min})}{\ln r_{\max} - \ln r_{\min}}$$

Smerodajná odchylka takéhoto odhadu je daná nasledovným vzťahom

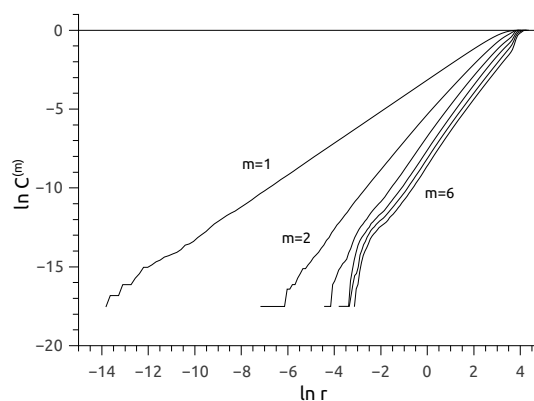
$$\sigma = \frac{d_C(r)}{\sqrt{M_C(r_{\max})}} \frac{\sqrt{\theta - 1}}{\ln \theta}, \quad \theta = \frac{C^{(m)}(r_{\max})}{C^{(m)}(r_{\min})},$$

kde $M_C(r_{\max})$ určuje počet vzdialeností stavov vo fázovom priestore menších ako r_{\max} .

Ďalšou metódou môže byť použitie lineárnej regresie na škálovaciu oblasť korelačného integrálu. Avšak aj v tomto prípade ide len o odhad korelačnej dimenzie. Táto metóda je demonštrovaná na grafe 3.17, kde výsledná smernica lineárnej regresie a teda korelačná dimenzia má hodnotu $(1,4789 \pm 0,0031)$. Podľa predchádzajúcej metódy by bola korelačná dimenzia rovná $(1,45 \pm 0,12)$, čo je približne rovnaký odhad, ale smerodajná odchylka je v tomto prípade oveľa presnejšia.



Graf 3.17: Závislosť logaritmu korelačného integrálu u 0716+714 (filter R) pre $m=3$



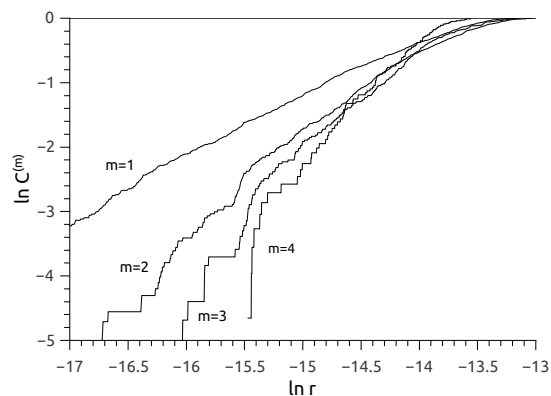
Graf 3.18: Závislosti korelačných integrálov vygenerovaného Lorenzovho systému pre rôzne dimenziami vnorenia.

Škálovacie oblasti je dobre vidieť aj na grafe 3.18. Ten vyjadruje závislosti korelačného integrálu pre vygenerovaný⁴ Lorenzov systém, ktorý patrí medzi deterministicky chaotické. Závislosti sú určené pre dimenzie sadad 1–6 a z grafu je dobre vidieť, že smernice škálovacích oblastí sa pri vyšších dimenziách vnorenia veľmi nemenia a teda dochádza k nasýteniu korelačnej dimenzie k jej správnej hodnote.

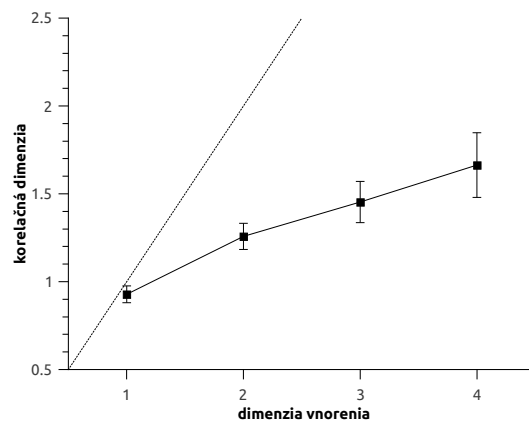
Podobné závislosti boli určené aj pre namerané svetelné krivky. Korelačné integrály určené z pozorovania blazara 0716+714 cez filtre R a V sú zobrazené na grafoch 3.19 a 3.21. Vzhľadom na malý počet nameraných hodnôt boli určené len po 4. dimenziu vnorenia. Vypočítané korelačné dimenzie (1. metódou) sú zobrazené na grafoch 3.20 a 3.22. Na nich je vidieť, že korelačná dimenzia blazara 0716+714 sa síce môže nachádzať medzi hodnotami 1–2, ale nebolo pozorované výraznejšie nasýtenie tejto hodnoty. To môže byť spôsobené malým pomerom signálu k šumu u nameraných svetelných kriviek, ale taktiež to môže indikovať náhodný stochastický systém, u ktorého k nasýteniu vôbec nedochádza. Pre porovnanie je závislosť korelačnej dimenzie ideálneho stochastického systému $d_C \sim m$ na grafoch znázornená priamkou.

Korelačné integrály určené z pozorovania Markariana 421 z 10.4. sú zobrazené na grafe 3.23. V tomto prípade ich bolo možné zostrojiť až po 7. dimenziu vnorenia. Závislosť korelačnej dimenzie na dimenzii vnorenia je zobrazený na grafe 3.26. Na ňom je vidieť mierne nasýtenie korelačnej dimenzie okolo hodnoty 4 u posledných troch dimenziách vnorenia. Všetkých sedem hodnôt korelačnej dimenzie je rozpísaných v tabuľke 3.2.

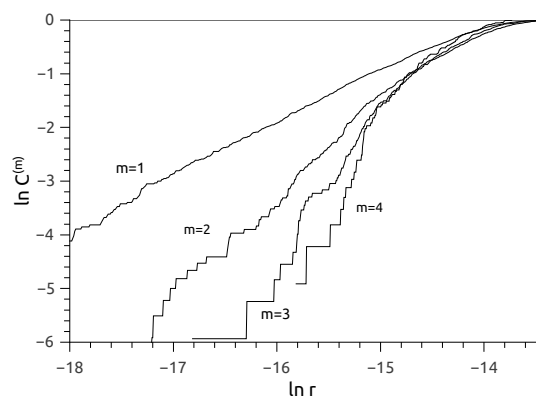
⁴Lorenzov systém bol vygenerovaný podľa knihy od J. Horáka a kol.[9].



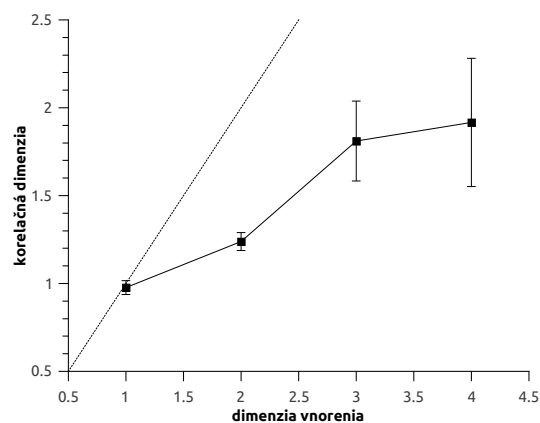
Graf 3.19: Závislosť logaritmu korelačného integrálu pre 0716+714 (filter R) s rôznymi dimenziami vnorenia.



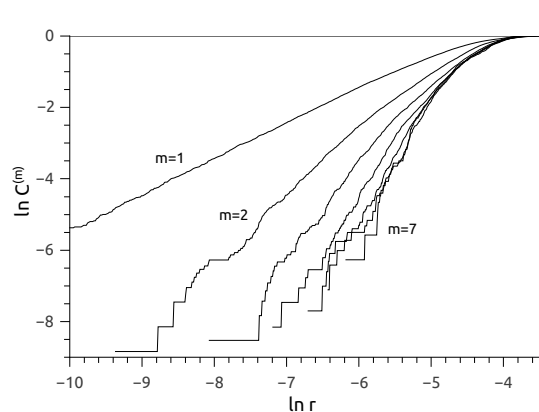
Graf 3.20: Závislosť korelačnej dimenzie na dimenzii vnorenia pre 0716+714 (filter R)



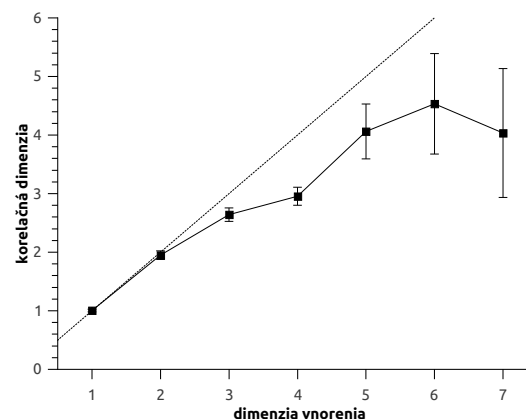
Graf 3.21: Závislosť logaritmu korelačného integrálu pre 0716+714 (filter V) s rôznymi dimenziami vnorenia.



Graf 3.22: Závislosť korelačnej dimenzie na dimenzii vnorenia pre 0716+714 (filter V)



Graf 3.23: Závislosť logaritmu korelačného integrálu pre Mrk 421 (z 10.4.) s rôznymi dimenziami vnorenia.

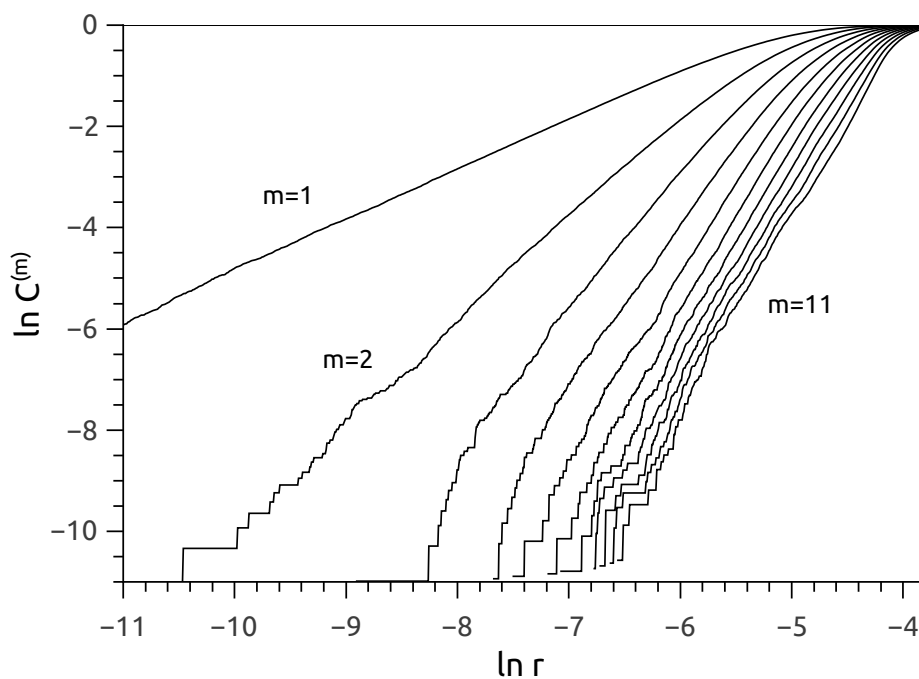


Graf 3.24: Závislosť korelačnej dimenzie na dimenzii vnorenia pre Mrk 421 (z 10.4.)

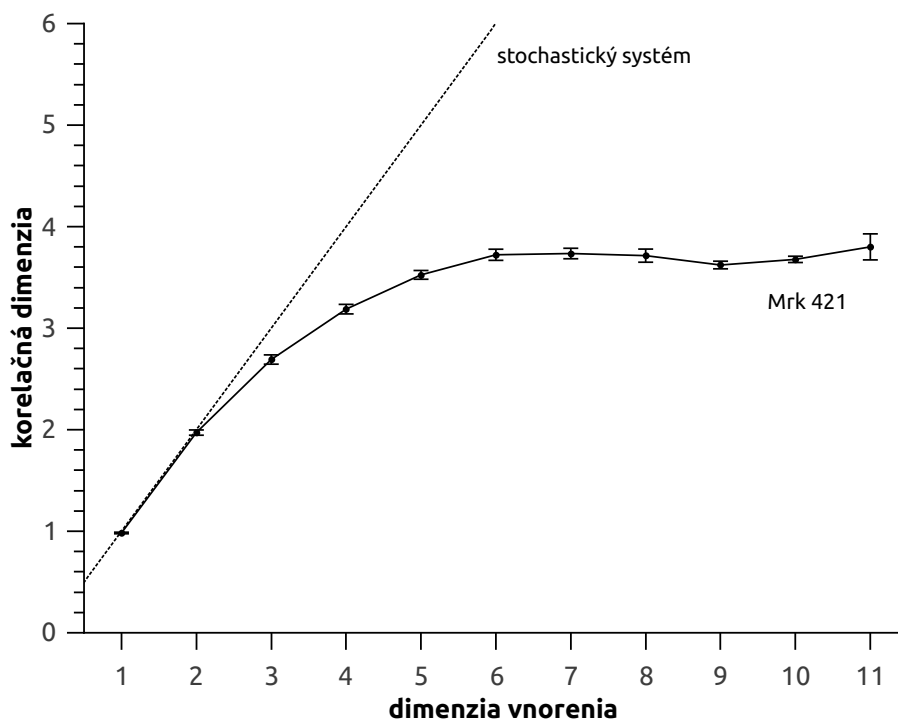
Dobré výsledky je vidieť z hodnôt merania Markarian 421 zo 14. apríla. Na obidvoch grafoch 3.25 a 3.26 je vidieť zreteľné nasýtenie korelačnej dimenzie už po 6. dimenzii vnorenia. Korelačné dimenzie pre jednotlivé dimenzie vnorenia sú rozpísané v tabuľke 3.2. V tomto prípade má korelačná dimenzia hodnotu okolo 3,8, čo je skoro rovnaký odhad ako z pozorovania z 10. apríla.

Tabuľka 3.2: Hodnoty korelačné dimenzie d_C s ich smerodajnými odchýlkami σ pre rôzne dimenzie vnorenia m určených zo svetelných kriviek Markarian 421.

m	Mrk 421, 10.4.		Mrk 421, 14.4.	
	d_C	σ	d_C	σ
1	1,004	0,022	0,9829	0,0077
2	1,950	0,073	1,97	0,026
3	2,64	0,11	2,691	0,046
4	2,96	0,15	3,187	0,047
5	4,06	0,47	3,525	0,043
6	4,53	0,86	3,723	0,055
7	4,0	1,1	3,735	0,052
8	—	—	3,714	0,065
9	—	—	3,622	0,038
10	—	—	3,678	0,031
11	—	—	3,80	0,13



Graf 3.25: Závislosť logaritmu korelačného integrálu pre Mrk 421 (zo 14.4.) s rôznymi dimenziami vnorenia.



Graf 3.26: Závislosť korelačnej dimenzie na dimenzii vnorenia pre Mrk 421 (zo 14.4.)

Záver

Cieľom tejto práce bola fotometrická analýza svetelných kriviek blazarov. K tomu boli použité dáta z pozorovania blazarov 0716+714 a Markariana 421. Blazar 0716+714 bol pozorovaný jednu noc a bol nameraný cez 4 rôzne filtre (*BVRI*). Markarian 421 bol pozorovaný dve noci a pre presnejšie meranie bol použitý iba jeden filter a to *R*. Surové snímky boli potom dôkladne spracované tak, aby výsledné svetelné krivky boli čo najpresnejšie. V prípade potreby bola použitá aj redukcia šumu a lineárna interpolácia.

Svetelné krivky boli následne podrobené fourierovej analýze, ktorá by mala odhaliť prípadné periodické chovanie. Vo výsledných grafoch avšak nebola pozorovaná žiadna výraznejšia perióda. To síce môže znamenať, že sa blazary správajú nepravidelne, ale podobné výsledky môžu byť aj dôsledkom malého počtu nameraných hodnôt alebo malého pomeru signálu k šumu.

Ďalšou možnosťou, ako využiť namerané svetelné krivky, bolo určenie spektrálneho indexu. To mohlo byť vypočítané iba pre 0716+714, pretože k tomu boli potrebné aspoň 2 filtre a Markarian 421 bol meraný iba cez filter *R*. Spektrálny index 0716+714 bol určený na hodnotu $(1,213 \pm 0,074)$, ale zároveň bola nameraná jeho závislosť na čase, keď sa v priebehu 3 hodín pohybovala hodnota spektrálneho indexu medzi 1,19 a 1,26. Trochu menšia hodnota spektrálneho indexu (1,12) bola nameraná aj z pozorovania v rokoch 2001 až 2004 [8]. Avšak v iných významných prácach sa jej hodnota značne líšila a nameraná bola v širokom rozmedzí od 0,81 po 1,57 [22]. Z toho možno usúdiť, že spektrálny index môže výrazne závisieť od času pozorovania.

Súčasťou práce bolo aj určenie korelačnej (fraktálnej) dimenzie. Tá konvergovala u blazara Markariana 421, u ktorého sa jej možná hodnota odhadla na približne 3,7. U blazara 0716+714 korelačná dimenzia nekonvergovala k žiadnej hodnote, ale u 4. dimenzii vnorenia dosahovala hodnotu medzi 1 a 2. To by sa mohlo dať porovnať s hodnotami z práce od Leunga a kol. [13], kde fraktálna dimezia blazara 0716+714 dosahovala hodnotu okolo 1,5. V práci sa tiež uvádza možná lineárna závislosť fraktálnej dimenzie od spektrálneho indexu.

Vzhľadom na konkrétne výsledky korelačnej dimenzie treba upozorniť, že sa jedná len o odhady a skutočné hodnoty sa môžu výrazne líšiť od týchto odhadov. Príčinou je hlavne malý počet meraní a malý pomer signálu k šumu u svetelnej krivky, kde je pre spoľahlivú hodnotu korelačnej dimenzie potrebné mať čo najmenší šum. V opačnom prípade môže byť korelačná dimenzia výrazne nadhodnotená [9]. V prípade blazara Mrk 421 síce bola snaha o redukciu tohto šumu, ale aj použité vyhládanie môže výrazne ovplyvniť výslednú korelačnú dimenziu. Taktiež pri určovaní tejto dimenzie je potrebné vhodne zvoliť lineárnu (škálovaciu) oblasť korelačného integrálu a na to v súčasnosti neexistujú žiadne objektívne metódy.

Na záver len dodávam, že aj napriek nie celkom úspešnému meraniu boli v práci rozpísané metódy, ktoré by sa mohli využiť k analýze presnejších a dlhších svetelných kriviek. Tieto výsledky by potom charakterizovali pozorované objekty a mohli by ich výskum výrazne posunúť dopredu.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] ANTONUCCI, R. Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 1993, vol. 31, issue 1, s. 473-521. DOI: 10.1146/annurev.aa.31.090193.002353. Dostupné z: <http://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev.aa.31.090193.002353>
- [2] BESSELL, M. S. UBVRI photometry. II - The Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 1979, vol. 91, s. 589-. DOI: 10.1086/130542. Dostupné z: <http://ucp.uchicago.edu/cgi-bin/resolve?id=doi:10.1086/130542>
- [3] CARROLL, Bradley W a Dale A OSTLIE. *An introduction to modern astrophysics*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, c1996, xvi, 1327, A-65, I-26 s. ISBN 02-015-4730-9.
- [4] DEEMING, T. J. Fourier analysis with unequally-spaced data. *Astrophysics and Space Science*. 1975, vol. 36, issue 1, s. 137-158. DOI: 10.1007/BF00681947. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00681947>
- [5] GAIDOS, J. A. et al. Extremely rapid bursts of TeV photons from the active galaxy Markarian 421. *Nature*. 1996-9-26, vol. 383, issue 6598, s. 319-320. DOI: 10.1038/383319a0. Dostupné z: <http://www.nature.com/doi/10.1038/383319a0>
- [6] GHISELLINI, G. et al.: *Optical-IUE observations of the gamma-ray loud BL Lacertae object S5 0716+714: data and interpretation..* 1997. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1997A%26A...327...61G>
- [7] GORHAM, Peter W., Liese VAN ZEE, Stephen C. UNWIN a Christopher JACOBS. Markarian 421's Unusual Satellite Galaxy. *The Astronomical Journal*. vol. 119, issue 4, s. 1677-1686. DOI: 10.1086/301289. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1538-3881/119/i=4/a=1677>
- [8] HAGEN-THORN, V. A. et al. S5 0716+714: Analysis of Color Variability for 2001–2004. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2006, vol. 360. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2006ASPC...360..185H>
- [9] HORÁK, Jiří. *Deterministický chaos a jeho fyzikální aplikace*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2003, 437 s., viii s. barev. obr. příl. ISBN 80-200-0910-8.

- [10] HOWARD, Emily S., James R. WEBB, Joseph T. POLLOCK a Robert E. STEN-CEL. Microvariability and Long-Term Variability of Four Blazars. *The Astronomical Journal*. 2004, vol. 127, issue 1, s. 17-23. DOI: 10.1086/380216. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1538-3881/127/i=1/a=17>
- [11] KOSTELICH, Eric a Thomas SCHREIBER. Noise reduction in chaotic time-series data: A survey of common methods. *Physical Review E*. 1993, vol. 48, issue 3, s. 1752-1763. DOI: 10.1103/PhysRevE.48.1752. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.48.1752>
- [12] KRÁTKÁ, Tereza. *Barevné změny blazarů*. 2005. 55 l. Dostupné z: <http://astro.physics.muni.cz/download/documents/bc/bpkratka.pdf>
- [13] LEUNG, Chun-Sing, Jian-Yan WEI, A. K. H KONG, Zoltan KOVÁCS a Tiberiu HARKO. Fractal dimension and thermodynamic fluctuation properties of IDV light curves. *Research in Astronomy and Astrophysics*. 2011-09-01, vol. 11, issue 9, s. 1031-1045. DOI: 10.1088/1674-4527/11/9/003. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1674-4527/11/i=9/a=003?key=crossref.62e86eb3c15c23a7f8d85ae7188d0af4>
- [14] MONTAGNI, F., A. MASELLI, E. MASSARO, R. NESCI, S. SCLAVI a M. MAESANO. The intra-night optical variability of the bright BL Lacertae object S5 0716 714. *Astronomy and Astrophysics*. 2006, vol. 451, issue 2, s. 435-442. DOI: 10.1051/0004-6361:20053874. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:20053874>
- [15] MURDIN, Paul. *Encyclopedia of astronomy and astrophysics*. New York: Nature Pub. Group, 2001, 4 v. (xx, 3670 p., [32] p. of plates). ISBN 15-615-9268-4.
- [16] NILSSON, K., T. PURSIMO, A. SILLANPÄÄ, L. O. TAKALO a E. LINDFORS. Detection of the host galaxy of S5 0716 714. *Astronomy and Astrophysics*. 2008, vol. 487, issue 2, L29-L32. DOI: 10.1051/0004-6361:200810310. Dostupné z: <http://www.aanda.org/10.1051/0004-6361:200810310>
- [17] PUNCH, M. et al. Detection of TeV photons from the active galaxy Markarian 421. *Nature*. 1992-8-6, vol. 358, issue 6386, s. 477-478. DOI: 10.1038/358477a0. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/358477a0>
- [18] QUIRRENBACH, A. et al. Correlated radio and optical variability in the BL Lacertae object 0716 714. *The Astrophysical Journal*. 1991, vol. 372, L71-. DOI: 10.1086/186026. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/doi/10.1086/186026>
- [19] SBARUFATTI, B., A. TREVES a R. FALOMO. Imaging Redshifts of BL Lacertae Objects. *The Astrophysical Journal*. 2005-12-10, vol. 635, issue 1, s. 173-179. DOI: 10.1086/497022. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0004-637X/635/i=1/a=173>

- [20] TAKENS, Floris. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980*. Springer Berlin Heidelberg, 1981, s. 366. DOI: 10.1007/BFb0091924. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/BFb0091924>
- [21] URRY, C. M.; PADOVANI, P.: *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei*, *Astronomical Society of the Pacific*, 107: 803-845, 1995. Dostupné z <http://adsabs.harvard.edu/abs/1995PASP..107..803U>
- [22] VILLATA M. et al. *The 0716+714 WEBT campaign of February 1999*. 2000. Dostupné z <http://adsabs.harvard.edu/abs/2000A%26A...363..108V>
- [23] *Multi-wavelength continuum emission of AGN: proceedings of the 159th symposium of the International Astronomical Union, held in Geneva, Switzerland, August 30 - September 3, 1993*. Editor T Courvoisier, A Blecha. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994, 534 s. International Astronomical Union symposia, no. 159. ISBN 07-923-2744-6.
- [24] <http://munipack.physics.muni.cz/>
- [25] <http://www.spacetelescope.org/images/opo9814g/>
- [26] http://www.eso.org/public/products/postcards/1301_centaurus_a/
- [27] <http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/gasp/fc/0716fc.html>
- [28] <http://www.taygeta.com/random/gaussian.html>
- [29] <http://www.astronomerstelegam.org/?read=4982>
- [30] <http://www.oato.inaf.it/blazars/webt/gasp/fc/1101fc.html>

