

MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ
Přírodovědecká fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Barevné změny blazarů

Brno 2005

Tereza Krátká

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, za použití uvedené literatury a podle metodických pokynů konzultanta a vedoucího bakalářské práce.

Tereza Krátká

Chtěla bych poděkovat svému konzultantovi Filipu Hrochovi za velikou pomoc a podporu a nezištnou ochotu být kdykoli k dispozici.

Martinovi, za korektury, podporu, starost a trpělivost, trpělivost a trpělivost.

Moničce, za připomínky a ochotu pořád poslouchat moje problémy.

Zdeněčkovi, za titulní stránku, T_EXovské rady, velikou celkovou poslední typografickou korekturu, neúnavnost a neodbytnost.

Pauliemu, za icq-společnost při nekonečných pozorovacích nocích, připomínky a podporu.

Tomovi, za velkou pomoc s Originem.

Luce, za praktickou pomoc při prvních pozorováních a trvalou psychickou podporu.

Kocimu, také za pomoc a společnost při pozorování.

Mamince, za jazykové korektury, a že mi spolu s tatínkem umožnili dělat to, co dělám.

Děkuji!

Obsah

1 Fyzikální procesy v aktivních galaxiích	5
1.1 Aktivní galaxie	5
1.1.1 Kvasary	7
1.1.2 OVV kvasary	8
1.1.3 BL Lac objekty	9
1.1.4 Blazary	9
1.2 Mechanismy emise	11
1.2.1 Termální emise	11
1.2.2 Cyklotronové a synchrotronové záření	12
1.2.3 Comptonův jev a inverzní Comptonův jev	14
1.3 Barva blazaru	15
1.4 Jet a jeho pohyb	17
1.4.1 Nadsvětelný pohyb (Superluminal motion)	17
1.4.2 Relativistické zesílení světla (Relativistic boosting)	21
2 Pozorování a redukce dat	22
2.1 Volba objektu	22
2.2 Přístroj	26
2.3 Pozorování	27
2.3.1 Problém s filtry	28
2.3.2 Pořízení a předzpracování snímků	29
3 Zpracování dat	30
3.1 Světelné křivky	31
3.2 Křivky barevných změn	35
3.3 Kumulativní křivky pro všechna data	39
4 Analýza rozptylů zpracovaných dat	42
4.1 Histogram	42
4.2 Gaussovo rozdělení	42
4.3 Výběr dat	43
4.4 Analýza	43
4.5 F-test	51
5 Závěr	53

Úvod

Blazary jsou aktivní galaxie s určitými zvláštními projevy, mezi které patří i změny jejich barvy. Přesné fyzikální příčiny a časový průběh těchto změn, jsou stále otázkou. Existují však mnohé úspěšné modely a teorie, které pozorované skutečnosti vysvětlují a předpovídají.

Ve své práci se budu věnovat popisu a pochopení základních fyzikálních mechanismů vedoucích k pozorovaným jevům; experimentálnímu pořízení světelných křivek vybraného blazaru; a konečně samotnému zpracování a vyhodnocení mnou naměřených dat pozorovaného objektu v různých barevných filtrech.

Kapitola 1

Fyzikální procesy v aktivních galaxiích

Všechny galaxie svítí světlem miliard hvězd, ze kterých se skládají. Z velkých vzdáleností, ze kterých je můžeme pozorovat, se jeví většinou jako bodové zdroje o určité jasnosti. Změna zářivého výkonu jedné nebo i několika hvězd má na celkovou jasnost mizivý vliv a současná změna nezanedbatelné části galaxie není příliš pravděpodobná. Výjimku představuje pouze výbuch supernovy, při kterém se uvolňuje energie řádově 10^{46} J během několika sekund (pro srovnání zářivý výkon Slunce je $4 \cdot 10^{26}$ J/s). Galaxie mají také celkem přirozeně spojitě spektrum, blízké spektru absolutně černého tělesa, protože sestává vesměs ze spekter hvězd v galaxii. Při bližším prozkoumání lze objevit absorpční čáry, pocházející stejně jako spojitě spektrum od hvězd, ze kterých se galaxie skládá.

1.1 Aktivní galaxie

V roce 1943 Carl Seyfert zkoumal několik vybraných galaxií, které měly neobvykle velkou jasnost a téměř bodové jádro. Zjistil, že spektra těchto galaxií kromě absorpčních čar obsahují překvapivě i velice široké a silné čáry emisní, které dosud u galaxií pozorovány nebyly. Tyto takzvané Seyfertovy galaxie položily základ třídě aktivních galaxií, v mnohém se lišících od ostatních „normálních“ galaxií.

V aktivních galaxiích se uvolňuje mimořádně velké množství energie ve formě elektromagnetického záření a kinetické energie hmoty (prudké turbulence, výtrysky neboli jety či rozsáhlé laloky relativistických částic u rádiových galaxií). Zářivý výkon aktivní galaxie přesahuje o jeden až tři řády zářivý výkon všech hvězd této galaxie. Obrovská energie je přitom uvolňována v tak malém objemu, že zdrojem nemohou být jaderné reakce. Ty umí

uvolnit méně než jedno procento klidové energie hmoty, a to na pozorovaný výkon nestačí. Jediná známá síla, která umí ve velkém měřítku uvolnit až 60% klidové energie hmoty, je gravitace. Proto se předpokládá, že aktivní galaxie mají ve svých jádrech obří černou díru, do níž padá z okolí materiál (hvězdy, mezihvězdná hmota), přičemž se uvolňuje nesmírné množství potenciální gravitační energie.

Zvláštnosti aktivních galaxií a jejich interpretace

Silné emisní čáry Pozorované emisní čáry jsou mnohem více rozšířené než čáry absorpční, zřejmě tedy vznikaly na jiných místech, za jiných podmínek (poznámka: absorpční čáry vznikají ve hvězdných atmosférách a mezihvězdném prostředí). Rozšíření bývá obecně způsobeno Dopplerovým efektem, konkrétně vlivem gravitace, vysoké teploty nebo rychlosti.

Polohy emisních čar odpovídají vysoce excitovaným nebo ionizovaným atomům. Tyto čáry nejsou navíc zakázané, což ukazuje na vysoké hustoty plynu (srážková deexcitace zabraňuje emisi zakázaných čar).

Z pozorovaného rudého posuvu čar a Hubbleova zákona pak lze určit vzdálenost galaxie a její zářivý výkon.

Z přítomnosti emisních čar můžeme tedy zjistit mnohé o stavu emitujícího plynu a ještě navíc vzdálenost aktivní galaxie.

Proměnná jasnost Proměnnost je u tak velikých struktur jako jsou galaxie něco velmi nečekaného (vyjma již zmíněných výbuchů supernov). Přesto se typicky v několika dnech jasnost takového objektu zvýší až tisíckrát! Z uvedené rychlosti změny lze odhadnout velikost – přesněji získat omezení na rozměry – oblasti, ve které ke změně došlo (změna se nemohla šířit rychleji než rychlostí světla). A právě odtud plyne, že aktivní oblast tedy není větší než jeden parsek.

Odlišné spektrum U aktivních galaxií je pozorované elektromagnetické spektrum většinou velice odlišné od spektra absolutně černého tělesa. Příčinou je velký podíl netermální emise na záření galaxie, způsobený přítomností aktivního jádra. Významně je zde zastoupena emise synchrotronová, Comptonův jev a také inverzní Comptonův jev. Touto problematikou se zabývá kapitola 1.2.

Typy aktivních galaxií: Seyfertovy galaxie, Markariané, rentgenové galaxie, IRAS galaxie, rádiové galaxie, kvasary, BL Lac objekty, blazary.

Posledních zhruba dvacet let se vědci přiklání k názoru, že různé typy aktivních galaxií jsou výsledkem různého úhlu pohledu na stejnou věc: podíváme-li se na černou díru interagující s okolím z různých úhlů, její vzhled ale také projevy se budou lišit. Pozorované rozdíly různých typů aktivních galaxií jsou tedy dány různými hmotnostmi černých děr v jejich centrech, různými hodnotami akrece a natočením celého systému vzhledem k pozorovateli.

Poznámka: Někdy bývají mezi aktivní galaxie řazeny i galaxie s překotným zrodem hvězd. Zdrojem zářivé i pohybové energie v těchto galaxiích není aktivní jádro, ale početné oblasti zrodu hvězd, nově vzniklé hvězdokupy zářivých obrů spektrálního typu O a B a částečně také supernovy. O této skupině galaxií hovořit nebudu.

1.1.1 Kvasary

Anglické slovo quasar je odvozeno ze slovního spojení quasi-stellar, což znamená „něco jako hvězda“ nebo „hvězdě podobný objekt“.

Kvasary jsou aktivní galaxie a byly objeveny koncem padesátých let dvacátého století na prvních rádiových mapách oblohy. Při dobrém rozlišení jsou to téměř bodové zdroje a zpočátku byly považovány za radiové hvězdy v naší Galaxii, byli ale i astronomové, kteří věřili v jejich extragalaktický původ.

Jejich optické protějšky jsou velice slabé a zidentifikovat je nebylo úplně jednoduché. První zdroj, u kterého se to podařilo, byl 3C48 (to znamená 48. zdroj třetího Cambridgeského katalogu rádiových zdrojů). Pořízení spektra objektu ale odhalilo další otázky. Spojité spektrum obsahovalo široké emisní čáry, které vědci nebyli schopni ztotožnit s čarami známých prvků. Nakonec byl tento případ uzavřen jako „zvláštní hvězda emitující radiové záření“.

V roce 1962 astronom Maarten Schmidt odhalil u kvasaru 3C273 Balmerovu sérii vodíku, ale v místech, kde by ji do té doby nikdo nehledal. Příčinou byl kosmologický červený posuv.

Podívejme se na kvasar 3C273 trochu blíže:

Jeho kosmologický rudý posuv má hodnotu $z = 0,16$. z udává poměr rychlosti vzdalování objektu od nás vlivem rozpínání vesmíru a rychlosti světla ve vakuu. Rychlost vzdalování kvasaru je tedy $v = zc$. Hubbleův zákon říká, že rychlost vzdalování a vzdálenost objektu jsou přímo úměrné: $v = Hd$, kde konstantou úměrnosti je Hubbleova konstanta: $H = 70 \text{ km/s/Mpc}$. Z kosmologického rudého posuvu objektu lze tedy jednoduše získat informaci o jeho vzdálenosti: $d = zc/H$. Známe-li navíc jeho pozorovanou hvězdnou

velikost m , lze ze vzorce $m - M = 5 \log d - 5$ určit jeho absolutní hvězdnou velikost M , pokud ovšem dosadíme vzdálenost v parsecích. A z absolutní hvězdné velikosti M lze pomocí vztahu $M = 71,2125 - 2,5 \log L$ získat přímo skutečný zářivý výkon L kvasaru. A ten je u 3C273 desítky bilionů Sluncí, až padesátkrát převyšuje výkon nejjasnějších galaxií.

Vzdálenosti kvasarů od Země jsou řádově několik miliard světelných let. Jsou to tedy objekty z raného období vývoje galaxií a vesmíru. V blízkém vesmíru už se kvasary nevyskytují. Černé díry ve středech galaxií, jako je například i naše Galaxie nebo galaxie v Andromedě, již velké množství materiálu ze svého okolí pravděpodobně spotřebovaly.

Postupem času se ukázalo, že ne všechny kvasary mají silnou rádiovou emisi, naopak – naprostá většina (90 %) kvasarů vyzařuje v rádiové oblasti slabě ve srovnání s optickým oborem. Lze tedy rozlišovat tzv. radio-loud (hlasité, silně vyzařující v rádiové oblasti spektra) a radio-quiet (tiché) kvasary. Mohutnou rádiovou emisi, odlišující od sebe radio-loud a radio-quiet kvasary, pak mají na svědomí relativistické elektrony v jetech radio-loud kvasarů. (Více v kapitolách 1.2 a 1.4.)

Lze říci, že kvasar se obecně skládá ze tří částí: velmi hmotné černé díry, akrečního disku a jetů, tedy výtrysků hmoty, které bývají až několik megaparseků dlouhé.

Šířka spektrálních čar těchto objektů odpovídá rychlostem emitujícího plynu nad 10000 km/s. Kvasary mají stejné spektrum jako Seyfertovy galaxie, rozdíl mezi nimi je pouze kvantitativní, určen dohodou – jasnější objekty s $M_v < -23$ mag jsou kvasary a ty slabší s $M_v > -23$ mag jsou pak Seyfertovy galaxie.

Spektra kvasarů mají z optické do rádiové oblasti mocninný charakter (power-law), příčinnou je mohutná netermální emise (viz kapitola 1.2).

1.1.2 OVV kvasary

Optically Violently Variable Quasars neboli kvasary prudce se měnící v optickém oboru.

Jsou to radio-loud kvasary se spojitým spektrem, které má mocninný charakter směrem k rádiové oblasti (způsobený netermální emisí), a se silnými emisními čarami. Od kvasarů se odlišují prudkými, velmi nepravidelnými změnami jasnosti v optickém i rádiovém oboru. Často jsou roky bez výrazných změn a pak náhle zjasní o několik magnitud na škále týdnů i dnů (tzv. outburst). Záření je navíc lineárně polarizované, což znamená, že se v okolí zdroje nachází materiál (většinou prach), na kterém k polarizaci dochází.

Počet katalogizovaných OVV kvasarů je kolem deseti.

1.1.3 BL Lac objekty

Je to skupina radio-loud objektů, pojmenovaná podle svého prvního zástupce, který byl objeven a označen jako proměnná hvězda.

BL Lac objekty jsou vysoce proměnné v optickém i rádiovém oboru, mají spojité spektrum s mocným charakterem směrem k infračervené a rádiové oblasti (opět je tedy dominantní netermální emise). Jejich záření je silně lineárně polarizováno.

Tyto vlastnosti by BL Lac objekty řadily ke kvasarům, přesněji k OVV kvasarům. To, co je od kvasarů odlišuje, je absence silných emisních i absorpčních čar v optickém spektru. Zpočátku nebyly čáry pozorovány vůbec, se zlepšující se technikou, se podařilo objevit slabé emisní čáry ve viditelné oblasti opět posunuté rudým posuvem. Extragalaktický původ a tedy i jakási příbuznost s kvasary byla potvrzena.

Objektů typu BL Lac je známo asi sto.

1.1.4 Blazary

Na konferenci v Pittsburghu v roce 1978 navrhl astronom Ed Spiegel, že OVV kvasary a BL Lac objekty mají tolik společného, že by mohly tvořit jednu třídu s názvem blazary (složeno z „bl“ od BL Lac a „azar“ od slova kvasar). Je to příznačné označení pro objekty, které prudce mění svou jasnost, anglické „blaze“ totiž znamená planout, šlehat, zářit.

Poslední dobou se vědci shodují, že blazar je spíše jev, než označení pro kategorii objektů. BL Lac objekty a OVV kvasary jsou totiž velice rozdílné. Ale to, co mají společné, je relativistický jet, produkováný jádrem galaxie, namířený do směru blízkého ke směru k pozorovateli. Záření tohoto jetu je silně netermálního původu, relativisticky zesilované a konečně také polarizované (Kollgaard 1994, Urry a Padovani 1995, Ghisellini 1996). (Podrobněji o jetu v kapitole 1.4.)

Blazary jsou objekty, které rychle a výrazně mění svou jasnost. Konkrétně u BL Lac objektů jsou nejrychlejší změny v UV oblasti spektra registrovány v řádu hodin, což znamená, že musí vznikat v malých oblastech prostoru. Vypovídají proto o dějích odehrávajících se velice blízko středu jádra galaxie a tedy o samotné podstatě aktivity.

U blazarů jsou navíc, kromě změn jasnosti objektu, pozorovány i zřetelné změny v křivkách barevných indexů. Zatímco jasnost kolísá na dlouhých časových škálách s periodami, které se nám daří nacházet (Smith a Nair 1995, Raiteri a další 2001), barevné indexy jsou na takovýchto intervalech téměř konstantní. Naopak nejvýraznější je posun barvy v krátkých intervalech, často ve spojení s náhlým zjasněním blazaru – outburstem (Ghisellini a další 1997, Villata a další 2000, 2002). Periodicita barevných změn ovšem zjištěna nebyla.

Dlouhoperiodické změny jasnosti jsou vysvětlovány geometrickou podstatou problému: způsobuje je různé natočení jetu vzhledem k Zemi při jeho spirálovitém pohybu (Urry a Padovani 1995). Posun barvy souvisí se změnou fyzikálních vlastností objektu – bývají vysvětlovány nesouvislým nebo náhlým prouděním materiálu z centrálního zdroje do jetu, což způsobuje změnu hustoty i teploty emitujícího materiálu (opět Gisellini a další 1997 a Villata a další 2000, 2002).

Pro blazary je typické, že čím vyšší frekvence, tím je amplituda změny větší a během zjasnění má spektrum tendenci posouvat se k vyšším frekvencím (například Giommi a další 1990, Pian a další 1998). V různých oblastech elektromagnetického spektra se stejné změny jasnosti často projevují se zpožděním (Tornikoski a další 1994, Clements a další 1995, Raiteri a další 2001).

Poznámka: Podkladem pro některé části kapitoly 1.1 Aktivní galaxie byla kniha Iana Robsona *Active Galactic Nuclei* [1].

1.2 Mechanismy emise

Informace o objektech ve vesmíru získáváme v absolutní většině případů z příjmu a analýzy elektromagnetického vlnění, které k nám od nich přichází.

1.2.1 Termální emise

Termální emise je nejběžnější emisí, se kterou se setkáváme ať už v každodenním životě nebo astrofyzice.

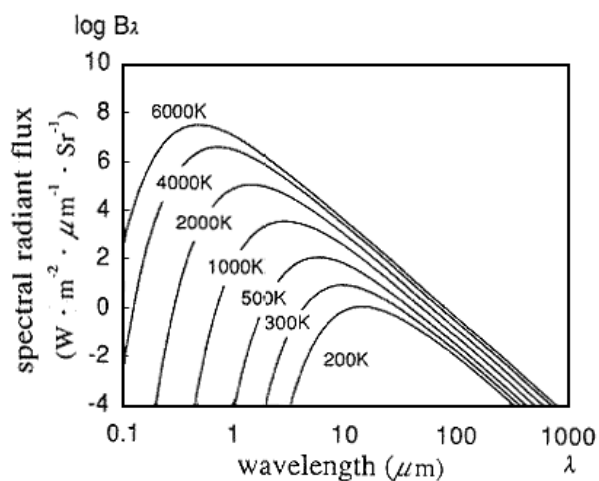
Každé těleso totiž vysílá do okolního prostoru spojitě záření, které vzniká v důsledku tepelného pohybu částic, ze kterých se těleso skládá. Toto záření jednoznačně odpovídá teplotě tělesa.

Ideálním modelovým případem je absolutně černé těleso (AČT), které je schopno pohlcovat i vyzařovat záření všech vlnových délek beze zbytku. Rozdělení energií v jeho spektru je dáno Planckovým zákonem:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

h ... Planckova konstanta

k ... Boltzmanova konstanta



Obrázek 1.1: Spektrum AČT pro různé teploty v logaritmicke škále. [18]

1.2.2 Cyklotronové a synchrotronové záření

Na elektrony pohybující se v magnetickém poli působí Lorentzova síla, ta je nutí vykonávat spirálovitý pohyb kolem magnetické siločáry. Takový pohyb je ale pohyb se zrychlením a částice s nábojem při něm musí vyzařovat energii. Elektrony energii odevzdávají ve formě fotonů o vlnové délce přímo úměrné indukci magnetického pole. Jedná-li se o klasické elektrony, nazývá se toto záření cyklotronové a je monochromatické. Pokud se elektrony pohybují rychlostmi blízkými rychlosti světla jde o záření synchrotronové. Jeho spektrum je spojitě, spektrální čára odpovídající cyklotronovému záření při stejné indukci magnetického pole se vlivem relativistických efektů rozšíří.

Frekvenci cyklotronového záření lze lehce odvodit uvažíme-li, že Lorentzova síla je zde silou dostředivou. Tyto síly mají tedy stejný směr a musí se rovnat jejich velikosti:

$$eBv = \frac{(mv^2)}{r}$$

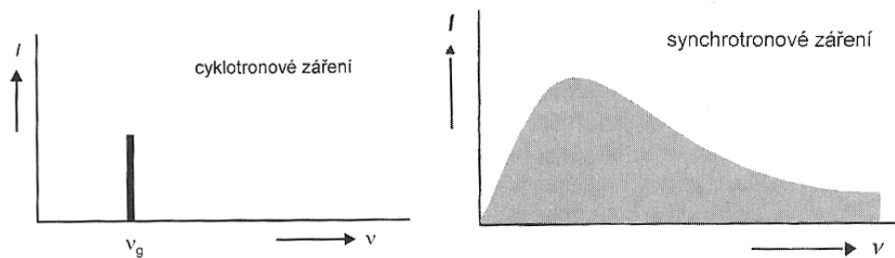
Jednoduchými úpravami získáme výraz pro frekvenci cyklotronového záření:

$$\nu_c = \frac{Be}{2\pi m}$$

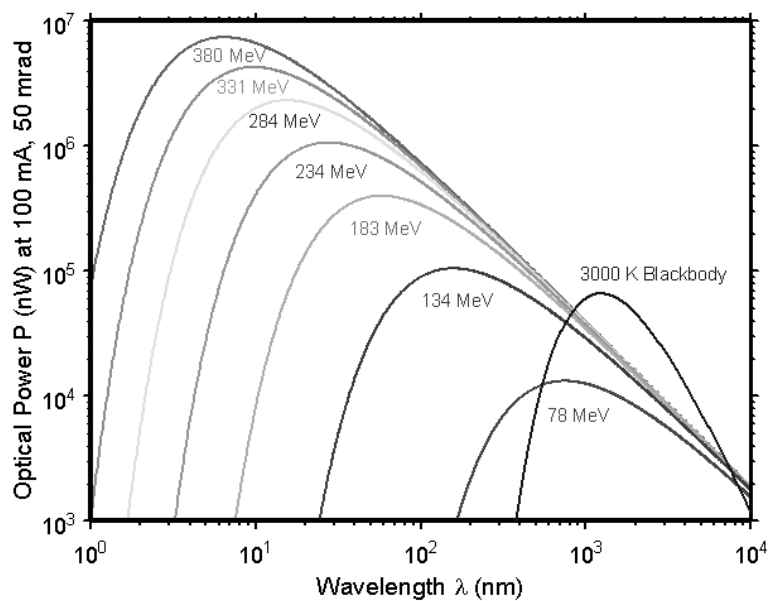
Pro záření synchrotronové je tato frekvence „posunuta“ Lorentzovým faktorem:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v^2/c^2)}}$$
$$\nu_s = \gamma^2 \nu_c$$

Charakter spektra synchrotronového záření závisí na rychlosti elektronů. Rozdělení energie pro elektrony má mocninný charakter a proto i synchrotronové spektrum je mocninné.



Obrázek 1.2: Cyklotronová frekvence a spojitě synchrotronové spektrum. [6]



Obrázek 1.3: Synchrotronové spektrum v logaritmické škále pro různé energie elektronů s možností porovnání se spektrem AČT, generované v synchrotronu o poloměru 0,84 m v rámci výzkumu NIST. [19]

1.2.3 Comptonův jev a inverzní Comptonův jev

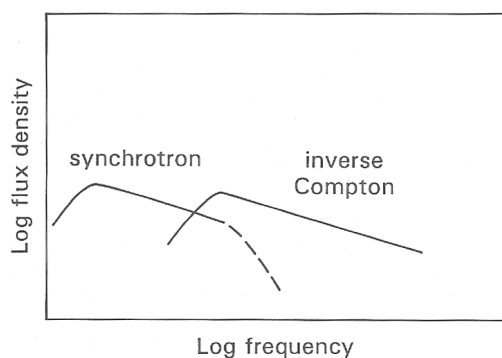
Comptonův jev byl experimentálně objeven ve dvacátých letech dvacátého století. Compton pozoroval, a také správně vysvětlil, rozptyl fotonů rentgenového záření při interakci s makroskopickým vzorkem. Vysokoenergetické fotony reagují s elektrony: předají jim část své energie, elektrony se tedy urychlí a v procházejícím záření budou pozorovány kromě původní vlnové délky i vlnové délky větší. Změna vlnové délky závisí navíc na úhlu, pod jakým rozptýlené záření pozorujeme.

V našem případě to znamená, že máme-li oblast klasických elektronů, na které dopadá intenzivní záření, budou elektrony urychlovány a fotony „ochlazovány“.

Inverzní Comptonův jev je, jak už název napovídá, jev opačný, v astrofyzikálních podmínkách velice běžný. Relativistické elektrony interagují s fotony, energie fotonů roste na úkor pohybové energie elektronů. Tento proces je tedy naopak chladícím mechanismem pro elektrony a zdrojem vysokoenergetických fotonů. Odhaduje se, že elektrony v takových místech proto nemohou mít vyšší teplotu než 10^{12} K.

Synchrotronové fotony se rozptylují na elektronech a dodávají jim tak energii. Tyto elektrony potom v magnetickém poli produkují více synchrotronových fotonů, které o to víc urychlují fotony, a tak dále. Takto to samozřejmě nepůjde do nekonečna. Rostoucí tendence bude zastavena nástupem inverzního Comptonova jevu, který zajistí vnitřní chladící mechanismus pro elektrony.

Všechny zmíněné mechanismy emise mají podstatný vliv na charakter spektra blazarů, i obecně aktivních galaxií.



Obrázek 1.4: Vztah synchrotronového spektra a spektra inverzního Comptonova jevu v logaritmické škále. [1]

1.3 Barva blazaru

Barva je vjem lidského oka daný citlivostí sítnice k různým vlnovým délkám a je dána poměrem energií vyzářených tělesem na těchto vlnových délkách. Mějme tedy dvě různé vlnové délky $\lambda > \bar{\lambda}$. Vjem barvy pak závisí na výrazu $B_{\bar{\lambda}}/B_{\lambda}$.

V astronomii se barva vyjadřuje barevným indexem: Obecně platí, že barevný index je rozdíl magnitud m měřených u jednoho objektu ve dvou různých spektrálních oborech:

$$\text{barevný index} = m_{\text{krátkovlnná oblast}} - m_{\text{dlouhovlnná oblast}}$$

což lze také vyjádřit jako:

$$\text{barevný index} = (m_{\bar{\lambda}} - m_{\lambda}).$$

Pro magnitudu objektu platí Pogsonova rovnice:

$$m = -2,5 \log \frac{I}{I_0}$$

Magnituda je tedy dána relativně, vzhledem k intenzitě I_0 jistého referenčního zdroje.

Známe-li tedy $m_{\bar{\lambda}} = -2,5 \log (I_{\bar{\lambda}}/I_0)$ a $m_{\lambda} = -2,5 \log (I_{\lambda}/I_0)$ pak barevný index je:

$$m_{\bar{\lambda}} - m_{\lambda} = -2,5 \log \frac{I_{\bar{\lambda}}}{I_{\lambda}}$$

Je tedy zřejmé, že hodnota barevného indexu ($m_{\bar{\lambda}} - m_{\lambda}$) závisí na rozdělení intenzity (resp. energie) ve spektru měřeného objektu.

Pro absolutně černé těleso závisí rozdělení energie ve spektru na vlnové délce a teplotě, jak je patrné z Planckova zákona. Pro $hc/\lambda kT \gg 1$ (což platí u viditelného světla pro $T < 7000$ K) a za předpokladu, že měřená intenzita $I_{\bar{\lambda}}$, I_{λ} je úměrná hodnotám $B_{\bar{\lambda}}$, B_{λ} platí:

$$B_{\lambda}(T) \approx \frac{2h^3c^2}{k^2\lambda^5} e^{-hc/k\lambda T}$$

a tedy

$$m_{\bar{\lambda}} - m_{\lambda} = -2,5 \log \frac{I_{\bar{\lambda}}}{I_{\lambda}} = -2,5 \log \frac{B_{\bar{\lambda}}(T)}{B_{\lambda}(T)}$$

$$m_{\bar{\lambda}} - m_{\lambda} = 12,5 (\log \bar{\lambda} - \log \lambda) + 1,086 \frac{hc}{kT_F} \left(\frac{1}{\bar{\lambda}} - \frac{1}{\lambda} \right)$$

T_F je takzvaná barevná teplota.

Za jistých předpokladů pro AČT lze tedy odvodit přímou závislost barevného indexu na teplotě.

My bohužel pro blazary nemůžeme model absolutně černého tělesa použít, jelikož jejich spektra se dalece liší od spekter AČT v důsledku velkého příspěvku netermální emise. To ale neznamená, že se o jejich teplotě nemůžeme nic dozvědět. Pozorované spektrum lze s velkou přesností aproximovat mocninnou funkcí $I_\lambda \sim \lambda^\alpha$ (proto se tato spektra označují jako power-law), jejíž koeficient α závisí na mnohých fyzikálních parametrech emitujícího materiálu, včetně teploty.

Z Pogsonovy rovnice potom opět plyne, že pro barevný index platí:

$$m_{\bar{\lambda}} - m_\lambda = -2,5 \log \left(\frac{\bar{\lambda}}{\lambda} \right)^\alpha$$
$$m_{\bar{\lambda}} - m_\lambda = -2,5 \alpha \log \frac{\bar{\lambda}}{\lambda}$$

Barevný index blazaru je tedy lineárně závislý na koeficientu α a je proto přímo funkcí fyzikálních vlastností blazaru. Změna barevného indexu blazaru je tedy jistě způsobena změnou těchto vlastností.

Měření barevného indexu se v praxi provádí pomocí spektrálních filtrů. Ty mají vlastnost, že z celého elektromagnetického spektra propouští jen přesně vymezený interval vlnových délek. Propustnost filtrů má přibližně charakter Gaussovy křivky (viz. kapitola 2.2). Pro náš odhad bylo však zcela postačující přiblížení, že daný filtr propouští právě jen záření příslušné vlnové délky.

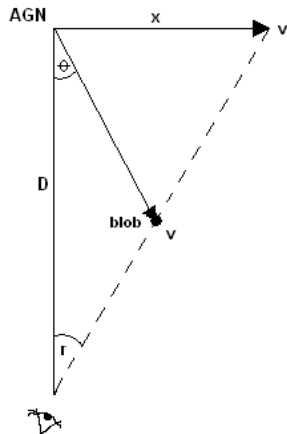
1.4 Jet a jeho pohyb

Jetly jsou od několika světelných let do několika megaparseků dlouhé výtrysky hmoty z centra aktivní galaxie. Hmoty se v nich pohybuje často rychlostmi blízkými rychlosti světla. Přírůstek hmoty z centra galaxie do jetu ale není konstantní a struktura jetu tedy nemusí být spojitá. Oblasti s vyšší hustotou hmoty v jetu se nazývají bloby (lze přeložit jako „zhustky“) a jsou dobře rozeznatelné na rádiových snímcích.

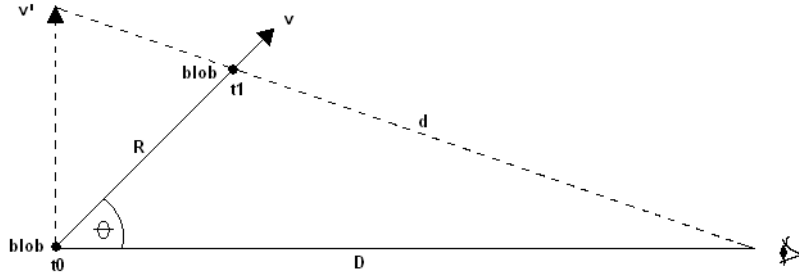
1.4.1 Nadsvětelný pohyb (Superluminal motion)

Projekt VLBI (Very Long Baseline Interferometry) se zabýval také měřením vzdálenosti blobů od jádra v rádiovém oboru v různých časech u různých aktivních galaxií. Za několik let se jejich poloha změnila řádově o tisíce úhlových vteřin. Označíme-li tento úhel, o který se konkrétní blob posunul za čas T , například písmenem r , vzdálenost, která tomu odpovídá ve skutečnosti, x a vzdálenost aktivní galaxie od nás D , můžeme vypočítat tečnou rychlost materiálu v' v km/s tímto způsobem:

$$\begin{aligned} x &= D \tan r \\ x &= T v' \\ v' &= \frac{D}{T} \tan r \end{aligned}$$



Velkým překvapením bylo, že rychlosti v' jsou ve většině případů několikrát větší než rychlost světla. Tento rozpor se speciální teorií relativity lze naštěstí lehce vysvětlit geometrií celé situace:



Obrázek 1.5: Blob se pohybuje rychlostí v ve směru, který svírá se směrem k pozorovateli úhel Θ . V čase t_0 se nachází ve vzdálenosti D a v čase $t_1 > t_0$ ve vzdálenosti d . Vzdálenost, kterou blob urazil za čas $t = t_1 - t_0$ označme R .

$$d^2 = D^2 + R^2 - RD \cos \Theta$$

$$d = D \sqrt{1 + R^2/D^2 - 2(R/D) \cos \Theta}$$

Protože ale R je mnohem menší než D (obrázek samozřejmě není v měřítku), můžeme výraz R^2/D^2 pod odmocninou zanedbat a provést rozvoj:

$$d = D \sqrt{1 - 2(R/D) \cos \Theta}$$

$$d = D \left(1 - \frac{R}{D} \cos \Theta + \frac{3}{2} \frac{R^2}{D^2} \cos^2 \Theta - \dots \right)$$

Třetí a následující členy lze zanedbat, ze stejného důvodu jako výše. A tedy:

$$d = D - R \cos \Theta$$

$$d - D = -R \cos \Theta$$

$$d - D = -vt \cos \Theta$$

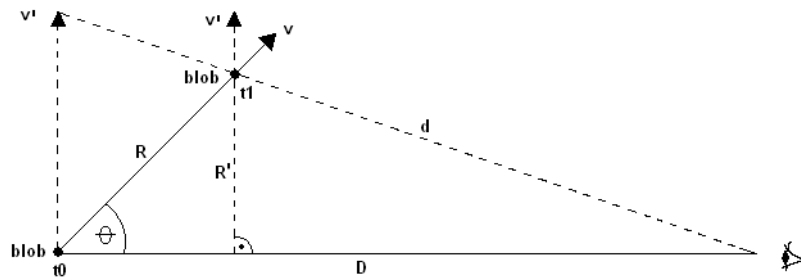
Časový interval, který my naměříme, pro dvě polohy blobu, označme Δt :

$$\Delta t = t_1 + \frac{d}{c} - t_0 - \frac{D}{c}$$

$$\Delta t = t + \frac{d}{c} - \frac{D}{c}$$

t je skutečný časový interval mezi těmito dvěma polohami blobu v soustavě spojené s jetem a černou dírou.

$$\begin{aligned}\Delta t - t &= -\frac{vt}{c} \cos \Theta \\ \Delta t &= t\left(1 - \frac{v}{c} \cos \Theta\right)\end{aligned}$$



Obrázek 1.6: My ovšem pozorujeme, že blob urazil za čas Δt vzdálenost R' , a tedy jeho zdánlivá rychlost je v' .

$$\sin \Theta = \frac{R'}{R}$$

a také

$$\begin{aligned}t &= \frac{R}{v} \\ \Delta t &= \frac{R'}{v'}\end{aligned}$$

potom

$$\Delta t = \frac{R \sin \Theta}{v'}$$

$$t\left(1 - \frac{v}{c} \cos \Theta\right) = \frac{R \sin \Theta}{v'}$$

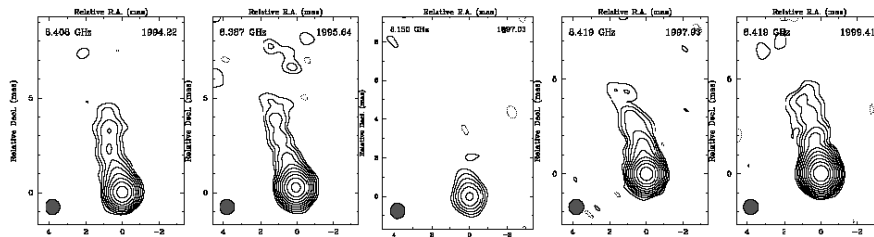
$$v't = \frac{vt \sin \Theta}{1 - (v/c) \cos \Theta}$$

$$v' = \frac{v \sin \Theta}{1 - (v/c) \cos \Theta}$$

v' je pozorovaná rychlost blobu a v je jeho skutečná rychlost v jetu.

Například:

v	Θ	v'
$0,9c$	10°	$1,37c$
$0,99c$	5°	$6,27c$



Obrázek 1.7: Tyto radarové snímky blazaru PKS 0716+714 pořídila kampaň VLBI. Je na nich zobrazena část jetu v několika časových okamžicích, jednotlivé uzavřené křivky na nich odpovídají různým relativním intenzitám v rádiovém oboru. [3]

1.4.2 Relativistické zesílení světla (Relativistic boosting)

Dalším jevem, který se zde uplatňuje, je zesílení nebo zeslabení intenzity záření, které k nám přichází z materiálu pohybujícího se relativistickými rychlostmi. Pro námi pozorovanou intenzitu záření platí:

$$I_\nu = \delta^3 I_{\nu'}$$

Kde $I_{\nu'}$ je emitovaná intenzita a δ je Dopplerův faktor:

$$\delta = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - (v/c) \cos \Theta}$$

Vztah lze jednoduše odvodit z Dopplerova efektu a znalosti faktu, že výraz I_ν/ν^3 je relativistický invariant:

Vztah pro Dopplerův efekt:

$$\nu = \delta^3 \nu'$$

a

$$\frac{I_\nu}{\nu^3} = \frac{I_{\nu'}}{\nu'^3}$$

a tedy

$$\frac{I_\nu}{I_{\nu'}} = \delta^3$$

Poznámka: Některé prameny pro lepší představu uvádějí, že jedna mocnina Dopplerova faktoru do vztahu přechází z transformace časového intervalu a další dvě z transformace prostorového úhlu.

Dopplerovské zesílení světla je zpracováno například v práci autorů Dermera a Schlicheisera z roku 1994.

Pro vysvětlení světelných křivek blazarů existuje několik modelů, které se vesměs opírají o přítomnost černé díry (případně dvou) v centru aktivity a zabývají se popisem pohybu jetu. Jejich výsledky jsou v dobré shodě s pozorovanou skutečností. Například model relativistického jetu: Marscher a Gear (1985), model „Helical jet“: Villata a Raiteri (1999) anebo [5].

Kapitola 2

Pozorování a redukce dat

Cílem experimentální části mé práce bylo naměřit světelnou křivku, tedy závislost magnitudy (logaritmu zářivého toku) na čase, zvoleného blazaru alespoň ve dvou částech spektra daných barevnými filtry, aby tak bylo možné zkoumat průběh barevného indexu tohoto objektu v čase.

2.1 Volba objektu

Blazar s označení PKS 0716+714 byl vybrán hlavně proto, že se jedná o objekt cirkumpolární a je tedy možné ho pozorovat během celého roku. Neklesá nikdy níže než 30° nad obzor a proto vliv světelného i prachového znečištění oblohy nedosahuje těch nejextrémějších hodnot. Nízká poloha nad obzorem a s tím spojená extinkce světla v atmosféře by navíc mohla mít vliv na barvu blazaru i srovnávacích hvězd, což je v této práci jistě nežádoucí. Tento blazar je také bezpečně nad hranicí detekčních možností použitého měřicího přístroje o němž budu hovořit později v kapitole 2.2.

PKS 0716+714

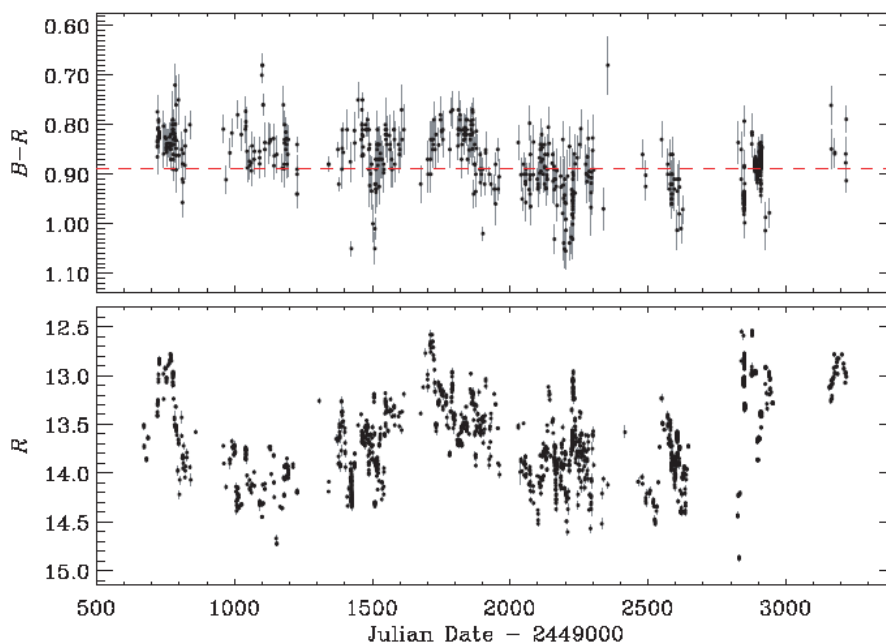
Nachází se v souhvězdí Žirafy. Označení PKS ho řadí mezi objekty Parkerova katalogu radiových zdrojů, lze ho ovšem najít i v mnohých jiných katalozích a databázích přehlídek oblohy. K jeho úplné identifikaci lze užít jen číslo za písmennou zkratkou.

Je to jeden z nejpozorovanějších blazarů vůbec. Je silně proměnný na mnoha časových škálách, napříč celým elektromagnetickým spektrem od rádiových vlnových délek až po oblast gamma záření. Maximum energie v jeho spektru připadá na interval frekvencí 10^{14} – 10^{15} Hz.

Rudý posuv z zatím není přesně znám. Podle práce autorů Wagnera a dalších (1996) je jeho hodnota větší než 0,3; ze studie rentgenového záření Kadlera a dalších (2004) plyne menší hodnota: 0,1.

V rádiovém oboru je PKS 0716+714 proměnný na škále dnů (intraday variability = IDV) (Witzel a další 1986, Heesehen a další 1987). Spektrum v této oblasti je ploché. Rádiové mapy odhalují kompaktní jádro (Gabuzda a další 1998), a mateřská galaxie dosud nebyla pozorována. Měření VLBI navíc odhalila jet o velikosti několika setin úhlové vteřiny (Witzel a další 1988). Dlouhoperiodické změny v rádiovém oboru mají charakteristickou časovou škálu 3,3 let (Raiteri a další 2003). Quirrenbach a další (1991) našli silnou korelaci IDV mezi radiovým a optickým oborem.

V optickém oboru byla Heidtem a Wagnerem (1996) zjištěna perioda zhruba 4 dny. Další perioda je přibližně 5,5–6 let, jak plyne z práce Raiteriho a dalších (2003). Analýzou světelných křivek ve spektrálních oborech daných filtry BVRI (Ghisellini a další 1997, Villata a další 2000) nebyla zjištěna žádná souvislost mezi spektrálním indexem a svítivostí zdroje na dlouhých intervalech. Hlavní optické outbursty byly pozorovány na začátku roku 1995, ke konci roku 1997 a 2000 a poslední na přelomu let 2001 a 2002. Při outburstu v roce 2000 dosáhl blazar svého dosavadního maxima při měření ve filtru R, a to 12,4 mag.



Obrázek 2.1: V horním panelu je závislost barevného indexu blazaru PKS 0716+714 na čase v průběhu posledních deseti let. Spodní panel pro srovnání ukazuje průběh světelné křivky ve filtru R ve stejném období. [9]

Průměrná hvězdná velikost vybraného blazaru se běžně uvádí ve filtrech B a V a je:

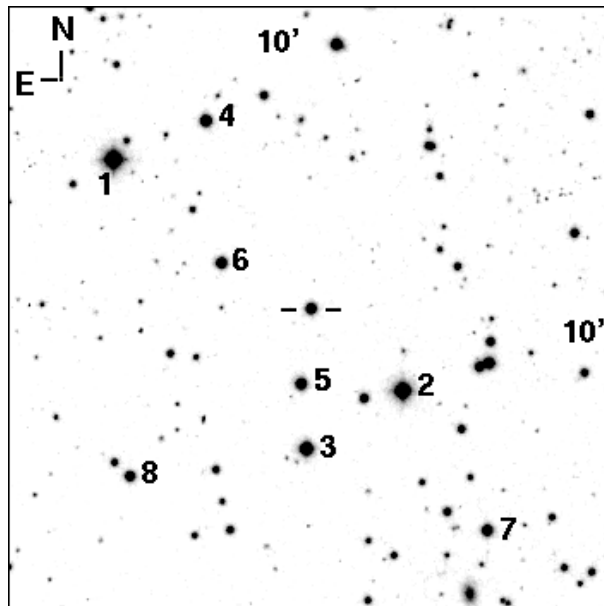
Filtr	m
B	15,5 mag
V	14,2 mag

Dále uvádím jeho souřadnice pro ekvinokcium J2000.0:

$$\alpha = 07 : 21 : 53,447$$

$$\delta = +71 : 20 : 36,35$$

Vyhledávací mapka blazaru je na obrázku 2.2 a informace o srovnávacích hvězdách uvádím v tabulce 2.1.



Obrázek 2.2: Hvězdné okolí PKS 0716+714. Pole má velikost $10' \times 10'$. [17]

Hvězda	B	V	R	I	V-R
1	11,54 (0,01)	10,99 (0,02)	10,63 (0,01)		0,36
2	12,02 (0,01)	11,46 (0,01)	11,12 (0,01)	10,92 (0,04)	0,34
3	13,04 (0,01)	12,43 (0,02)	12,06 (0,01)	11,79 (0,05)	0,37
4	13,66 (0,01)	13,19 (0,02)	12,89 (0,01)		0,30
5	14,15 (0,01)	13,55 (0,02)	13,18 (0,01)	12,85 (0,05)	0,37
6	14,24 (0,01)	13,63 (0,02)	13,26 (0,01)	12,97 (0,04)	0,37
7	14,55 (0,01)	13,74 (0,02)	13,32 (0,01)		0,42
8	14,70 (0,01)	14,10 (0,02)	13,79 (0,02)		0,31

Tabulka 2.1: Hvězdné velikosti srovnávacích hvězd byly určeny v práci Villaty a dalších (1998); I-data jsou převzata z práce Ghiselliniho a dalších z roku 1997. [17]

Poznámka: První srovnávací hvězda nebude použita, je pro naše účely příliš jasná.

2.2 Příklad

Měření jsem prováděla na přístroji Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity umístěném v blízkosti Hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka v Brně na Kraví Hoře.

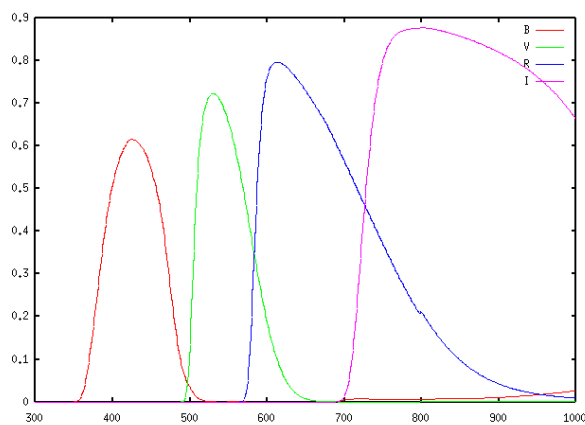
Jedná se o zrcadlový Newtonův dalekohled o průměru 62 cm s ohniskovou vzdáleností 2,78 m na paralaktické montáži.

K detekci zářivého toku byla použita v sekundárním ohnisku umístěná CCD kamera ST-8 Dual od Santa Barbara Group (SBIG) s čipem KAF-1600. Její zorné pole je $17,0' \times 11,3'$ a rozlišovací schopnost při použití binningu (3×3) je 510×340 pixelů.

Pro zpracování byla použita data pořízená ve filtrech V a R Kron-Cousinova fotometrického systému UBVR.

Filtr	λ pro I_{max}
V	550 nm
R	670 nm

Tabulka 2.2: Typické hodnoty pro R a V filtry [12].



Obrázek 2.3: Profily spektrální propustnosti jednotlivých barevných filtrů použitého přístroje. [8]

2.3 Pozorování

Pozorování jsem prováděla pět nocí na přelomu roku 2004 a 2005:

datum	doba pozorování (UT)	počet snímků (pro každý filtr)	teplota CCD čipu
24./25.11.2004	19:00–03:10	55	–32 °C
6./7.2.2005	21:10–04:40	87	–35 °C
8./9.2.2005	19:40–03:30	100	–36 °C
24./25.3.2005	18:40–22:00	31	–15 °C
31.3./1.4.2005	20:20–02:10	76	–23 °C

Tabulka 2.3: Údaje o jednotilivých pozorovacích nocích.

Doba expozice každého snímku je 120 s.

Během první pozorovací noci 24./25.11.2004 nebyly pozorovací podmínky úplně ideální. Měsíc byl dva dny před úplňkem, vycházel tedy brzy z večera a rušil svým světlem během celého snímání. Což se na snímcích také projevilo a fotometrickými procedurami programu Munipack (viz. kapitola 2.3.2) prošlo jen 21 snímků v oboru R a 43 ve V.

Druhá pozorovací noc 6.2.2005 byla bezměsíčná, přesto jsou na snímcích patrné rozsáhlé světlé skvrny, jako by se blízko kamery nebo jejího zorného pole nacházel silný zdroj světla. Fotometricky nemohly být zpracovány ale jen dva snímky v oboru R. Následným zpracováním byl ovšem zjištěn problém při výměně filtrů, který podrobně rozeberu v následující kapitole 2.3.1.

Z 8. na 9. února 2005 byl nov. Na snímcích jsou však nad ránem opět velká osvětlená místa a přestože Munipack (kapitola 2.3.2) všechny snímky zpracoval, musely být některé před další analýzou vyřazeny, jelikož chyba při výměně filtrů se opakovala i tuto noc (viz. kapitola 2.3.1).

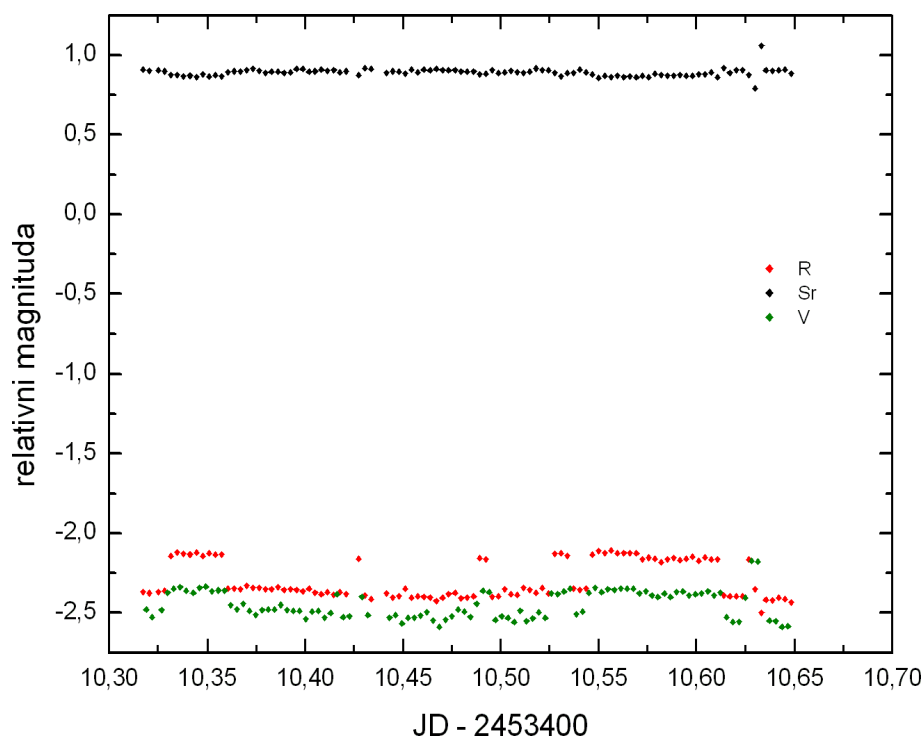
Další pozorovací noci se naštěstí obešly již bez komplikací daných filtry. Pozorování z 24. na 25. března ovšem opět rušil Měsíc, kterému chybělo několik hodin do úplňku. Přesto kvalita tohoto pozorování je výrazně větší než předešlé dvě noci. Data bylo možné získat ze všech jednatřiceti snímků.

Poslední noc (31.3./1.4.2005) měla zřejmě nejlepší pozorovací podmínky vůbec. Měsíc vycházel nad ránem (na opačné straně oblohy, než se nachází snímávané pole), řada snímků je proto delší než u předešlé noci, výměna filtrů probíhala bez problému. Fotometricky zpracován nebyl jeden snímek z oboru R a dva v oboru V.

2.3.1 Problém s filtry

Mechanismus, který v CCD kameře provádí během pozorování výměnu filtrů, zřejmě vlivem velkých mrazů nefungoval správně. Z naměřených dat lze lehce rozpoznat, že například k výměně filtru nedošlo, přestože ovládací systém kamery tuto změnu hlásil; zřejmě docházelo i k opačné chybě, a to posunutí až na filtr následující po filtru námi žádaném.

Světelná křivka takové noci vypadá například takto:



Obrázek 2.4: Graf závislosti relativní magnitudy na upraveném Juliánském datu pro noc 8./7.2.2005. Hodnoty „R“ vyjadřují rozdíl intenzity blazaru a druhé srovnávací hvězdy v domnělém filtru R, data „V“ totéž ve filtru V a „Sr“ je rozdíl intenzity druhé a třetí srovnávací hvězdy ve filtru R, bez dalších úprav. Podobné grafy pro další noci a relevantní data jsou uvedeny později.

Data tímto způsobem poškozená, naměřená z poloviny v jiných filtrech než V a R, jsem pro zpracování nevyužila.

2.3.2 Pořízení a předzpracování snímků

Samotné snímky, darkframy a flatfieldy jsem pořídila pomocí programů pro ovládání dalekohledu *night_control*, *night_darks* a *night_flats* a kamery vytvořených Filipem Hrochem.

Program *night_control* umožňuje pozorovateli jednoduchým způsobem zadat počet snímků, dobu expozice, filtry, které budou použity pro každý snímek, jméno objektu a označení snímků a po spuštění sám provádí snímání podle těchto zadaných parametrů. Pozorovatel může v reálném čase sledovat každý snímek na monitoru počítače, což slouží ke kontrole polohy snímaného pole a její případné manuální korekci změnou nasměrování dalekohledu.

Programy *night_darks* a *night_flats* pak umožňují podobným způsobem získávat darkframy a flatfieldy.

Nejnovější verze programu *night_control* umožňuje dokonce autopointaci dalekohledu na vybranou hvězdu, zadáme-li její souřadnice na snímku. Což pozorovateli ulehčí práci a zvýší kvalitu dat, protože kontrola polohy sledovaného pole přístrojem je jistě přesnější, než vizuální sledování člověkem.

Surové snímky byly pak zpracovány, jak je u CCD dat běžné: bylo provedeno odečtení darkframu, dělení flatfieldem, identifikace hvězd na snímcích, porovnání snímků a relativní fotometrie zadaných hvězd pomocí balíku *Munipack* (<http://munipack.astronomy.cz>), jehož autorem je také Filip Hroch. *Munipack* je stejně jako software pro pořizování CCD snímků velice praktickým a komplexním nástrojem pozorovatele.

Získaná data jsou pak k dispozici ve dvou datových souborech pro každou noc: v prvním jsou relativní magnitudy blazaru vzhledem ke všem srovnávacím hvězdám (obrázek 2.2) ve filtru R se středními kvadratickými odchylkami s_R pro každý snímek a ve filtru V stejně tak s hodnotami odchylek s_V ; a ve druhém jsou pak relativní magnitudy druhé srovnávací hvězdy v závislosti na čase vzhledem k ostatním srovnávacím hvězdám pro filtr R a V opět se středními kvadratickými odchylkami s_R a s_V .

Kapitola 3

Zpracování dat

V následující kapitole naměřené závislosti relativní magnitudy vynesu do grafů. Výpočtu závislost barevného indexu na čase a taktéž je vyjádřím graficky. Výsledky budu diskutovat.

Při zkoumání světelné křivky objektu je někdy vhodné vynášet do stejného grafu pro srovnání světelnou křivku srovnávací hvězdy, jejíž intenzita se obecně nemění. Stejně tak, jedná-li se o závislost barevného indexu na čase. Pro statistické vyhodnocení křivky barevných změn blazaru, které jsem použila, je znalost této závislosti dokonce nutná.

Blazar PKS 0716+714 má průměrnou hvězdnou velikost 14,2 mag ve filtru V. Jak bude ale patrné z grafů, pohybovala se tato hodnota při měření spíše kolem 13,5 mag, proto jsem pro srovnání a statistické zpracování vybrala srovnávací hvězdu s označením 5 (viz. obrázek 2.2).

Proč je vlastně vhodné použít přibližně stejně jasnou hvězdu?

Vlivem absorpce světla v použité optické soustavě, neklidu a znečištění zemské atmosféry, ale také přítomnosti mezihvězdné a mezigalaktické hmoty (tedy extinkce obecně), temného proudu kamery atd., nedopadá do detektoru nikdy konstantní signál. Vždy jsou přítomny fluktuace světelného toku, zvané často „šum“, které u zdrojů s konstantní jasností mají náhodné (Gaussovo) rozdělení, kolem jisté střední hodnoty. Hlavním zdrojem fluktuací je zde tzv. fotonový šum, který je úměrný odmocnině z počtu dopadnutých fotonů a tedy, čím je objekt jasnější, tím je šum větší. Pro pozdější zpracování je žádoucí, aby tento šum hrál u vybraných hvězd stejnou roli.

3.1 Světelné křivky

Z napozorovaných dat jsem do grafů vynesla světelné křivky blazaru a 5. srovnávací hvězdy pro filtr R a V a každou pozorovací noc. Tyto závislosti relativní magnitudy na čase vzhledem ke 2. srovnávací hvězdě jsou na obrázcích 3.1 až 3.5 a postupně je každý okomentován.

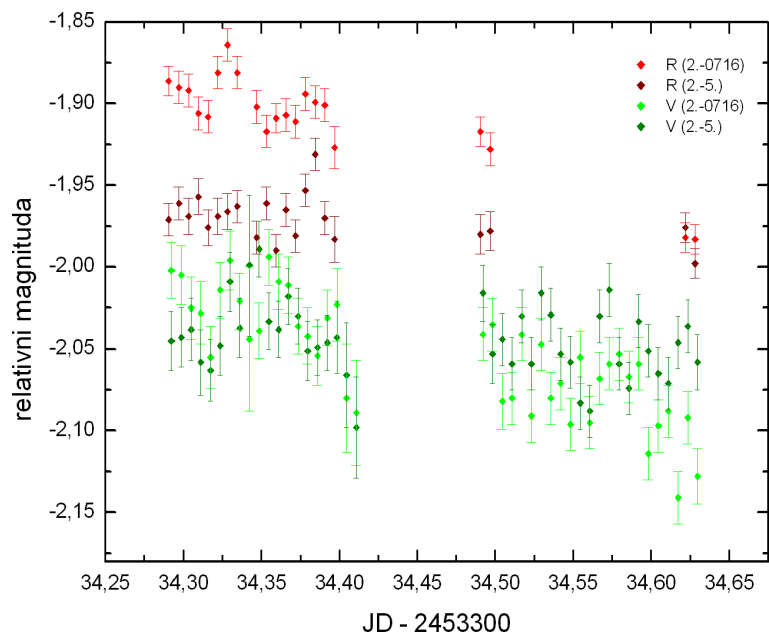
Je možné si povšimnout, že relativní magnituda blazaru byla v noci z 24. na 25.11.2004 (obrázek 3.1) blízká hodnotě srovnávací hvězdy. Pohybovala se kolem -2 mag. Zatímco u srovnávací hvězdy se hodnoty nachází v rozsahu 0,05 mag ve filtru R a 0,1 mag ve V, u blazaru lze zaznamenat mírný pokles o zhruba 0,15 mag v obou filtrech.

Během pozorovací noci 6./7.2.2005 (obrázek 3.2) se již relativní magnituda blazaru a srovnávací hvězdy výrazněji liší – blazar je slabší asi o 0,5 mag. Hodnoty srovnávací hvězdy mají rozsah ve filtru R opět asi 0,5 mag a asi 0,1 mag ve filtru V. Ve světelných křivkách blazaru je zřetelně vidět výrazná změna. Hodnoty se pohybují v rozsahu 0,2 mag ve filtru R i V. Tato data byla vybrána z pozorování, kdy docházelo ke špatné výměně filtrů.

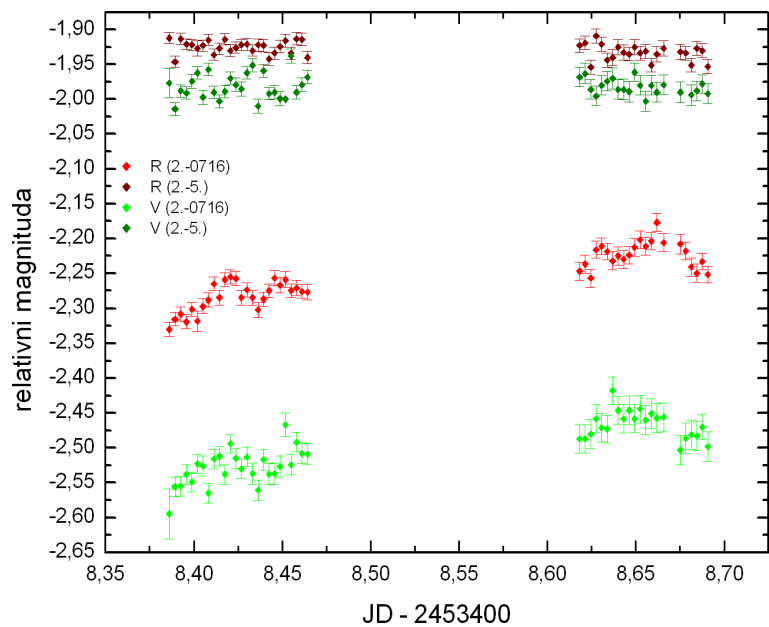
Data v grafu pro noc 8./9.2.2005 (obrázek 3.3) jsou také vybrána z problematické série. Srovnávací hvězda má hodnoty v intervalech o velikosti asi 0,05 mag ve filtru R a 0,08 mag pro filtr V. Změna blazaru je patrná ve filtru R v rozsahu asi 0,1 mag a ve filtru V zhruba 0,15 mag.

V noci z 24. na 25.3.2005 už výměna filtrů probíhala správně (obrázek 3.4). Srovnávací hvězda má rozptyl hodnot opět ve filtru R kolem 0,05 mag a do 0,1 mag ve V. Pro blazar je ve filtru R rozptyl až 0,15 mag a ve filtru V asi 0,2 mag. V průběhu noci však k žádné výraznější změně intenzity nedošlo.

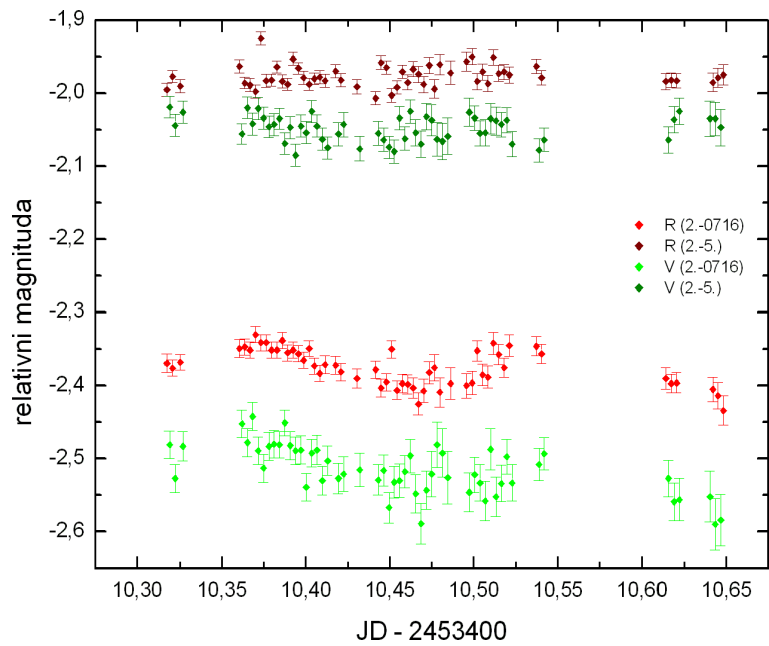
Během noci na přelomu března a dubna 2005 (obrázek 3.5) došlo k výraznému poklesu jasnosti sledovaného objektu. Hodnoty relativní magnitudy srovnávací hvězdy ve filtru R spadají až na jednu extrémní hodnotu do intervalu o velikosti 0,05 mag. Ve V filtru je již šum větší a to asi 0,1 mag. Hodnoty blazaru mají rozptyl asi 0,2 mag v R filtru a 0,25 mag ve V. Z grafu je také možno vyčíst, že relativní magnituda blazaru poklesla zhruba o 0,15 mag v obou filtrech.



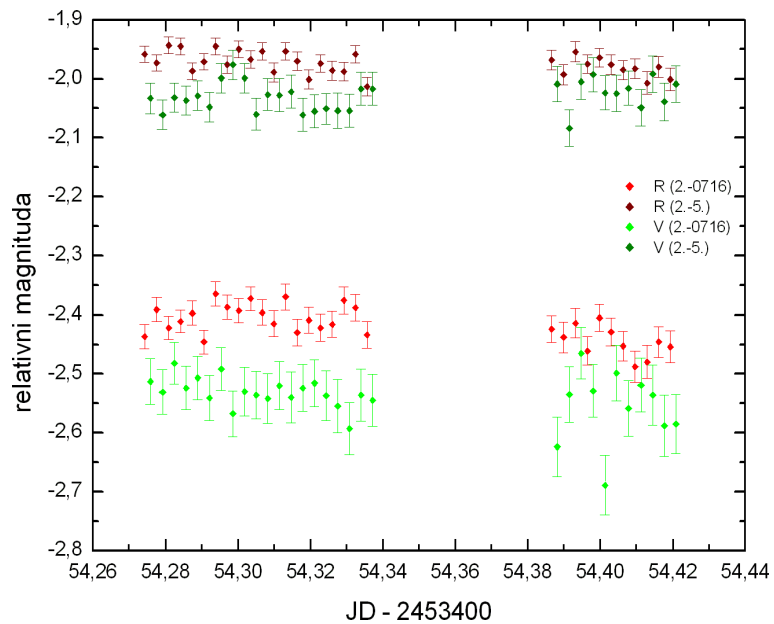
Obrázek 3.1: Světelná křivka blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) ve filtrech R a V pro noc 24./25.11.2004.



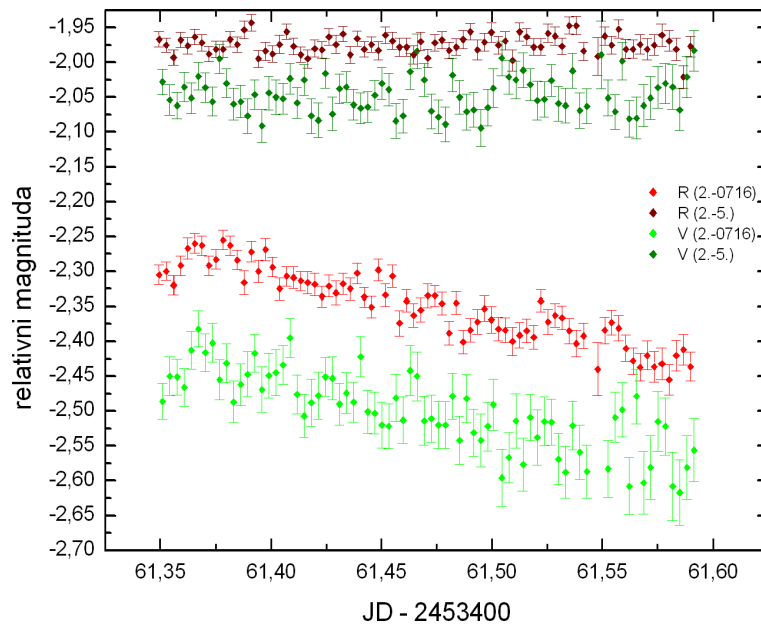
Obrázek 3.2: Světelná křivka blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) ve filtrech R a V pro noc 6./7.2.2005.



Obrázek 3.3: Světelná křivka blazaru (2.–0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.–5.) ve filtrech R a V pro noc 8./9.2.2005.



Obrázek 3.4: Světelná křivka blazaru (2.–0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.–5.) ve filtrech R a V pro noc 24./24.3.2005.



Obrázek 3.5: Světelná křivka blazaru (2.–0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.–5.) ve filtrech R a V pro noc 31.3./1.4.2005.

Shrnutí

Charakter všech pozorovaných světelných křivek je podobný. Obecně mají data ve filtru V větší rozptyl hodnot i střední kvadratické odchylky, než data měřená ve filtru R, a to jak pro blazar tak pro srovnávací hvězdu. Je to důsledek menší citlivosti CCD kamery na světlo ve V filtru.

Porovnáme-li teď rozptyl blazaru a 5. srovnávací hvězdy je zřejmé, že jeho hodnota je u blazaru vždy větší (v obou filtrech). Vzhledem k tomu, že jsou oba objekty zhruba stejně jasné, je možné tento rozdíl interpretovat velkou mezgalaktickou extinkcí (blazar je dál) nebo také navíc odlišným způsobem vzniku záření a přítomností změny intenzity záření, která se za našich detekčních podmínek jeví pouze jako výraznější šum.

3.2 Křivky barevných změn

Snímky v jednom a druhém filtru nemohou být nikdy jedním přístrojem pořízeny ve stejný okamžik. Časový interval, který dělí každé dva snímky v jednom filtru je 4,6 minuty a čas pořízení nejbližšího R a V snímku se liší zhruba o 2,3 minuty.

Barevný index byl vypočten pro každé dva po sobě následující snímky ve filtru R a V a této hodnotě byl přiřazen čas pořízení snímku ve filtru R. Střední kvadratickou odchylku barevného indexu jsem určila výpočtem pomocí zákona šíření chyb ze středních kvadratických odchylek příslušných R a V hodnot takto:

$$s_{(V-R)} = \sqrt{s_V^2 + s_R^2}.$$

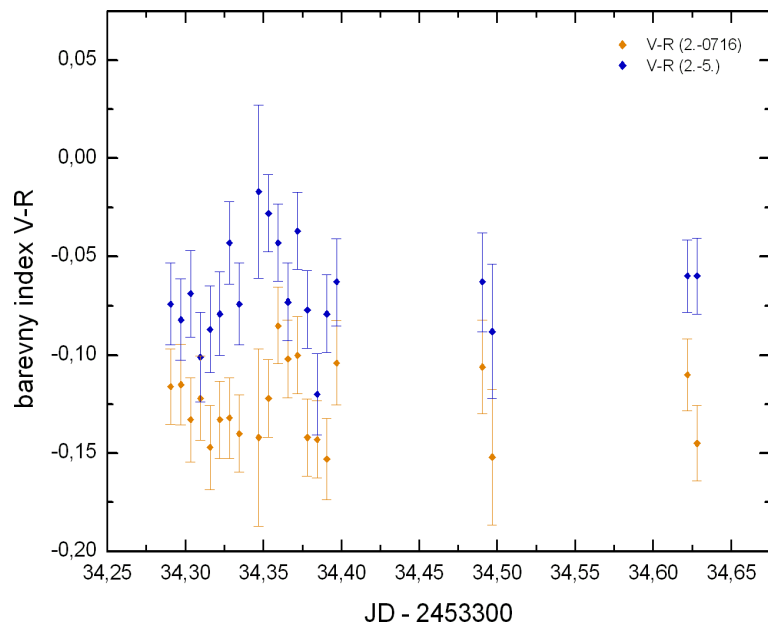
Závislosti barevných indexů na čase jsou vyneseny do grafů na obrázcích 3.6 až 3.10 opět pro blazar i 5. srovnávací hvězdu (podle obrázku 2.2) a jsou postupně komentovány.

V grafu pro první noc (obrázek 3.6) srovnávací hvězda ale ani blazar nejeví žádný významný trend. Jejich průměrné hodnoty se liší asi o 0,05 mag a rozptyl hodnot pro srovnávací hvězdu je téměř 0,1 mag a pro blazar je asi 0,08 mag.

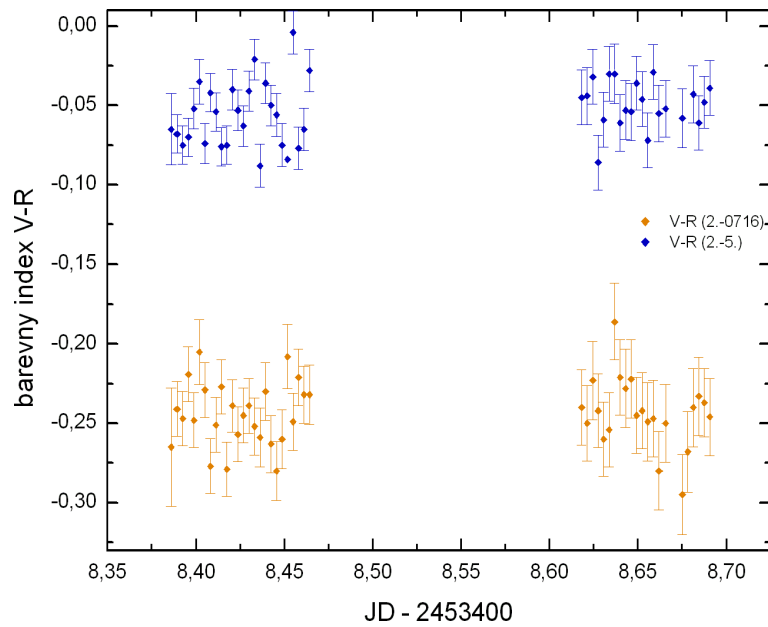
V noci z 6. na 7. února 2005 (obrázek 3.7) je rozptyl hodnot srovnávací hvězdy zhruba 0,09 mag a u blazaru se tato hodnota pohybuje kolem 0,1 mag. Žádná ze dvou závislostí uvedených v grafu nejeví zřejmý trend. Je ovšem zvláštní, že se zde jejich průměrné hodnoty liší o 0,2 mag, tento fakt bude diskutován v kapitole 3.3.

Ani ve třetí noci 8./9.2.2005 (obrázek 3.8) křivky barevných změn nevykazují žádnou změnu, jen jejich šum je větší než při předchozím pozorování. Data srovnávací hvězdy spadají do intervalu o velikosti 0,12 mag, velikost tohoto intervalu u blazaru je asi 0,13 mag. A průměrné hodnoty těchto dvou křivek se liší zhruba o 0,06 mag.

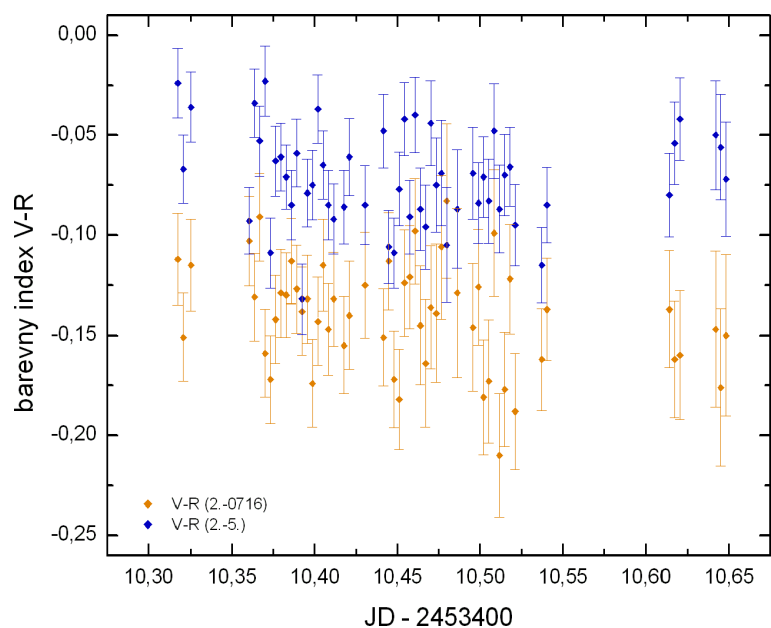
V noci 24./25.3.2005 (obrázek 3.9) se průměrné hodnoty barevných indexů blazaru a srovnávací hvězdy lišily o 0,05 mag. Rozptyl hodnot činí asi 0,12 mag u srovnávací hvězdy a dokonce 0,25 u blazaru. Žádná změna barvy není patrná, ale lze si všimnout, že rozptyl hodnot u obou objektů je ke konci pozorování větší. Na tento jev mohl mít vliv měsíční úplněk anebo nízká výška snímaného pole nad obzorem.



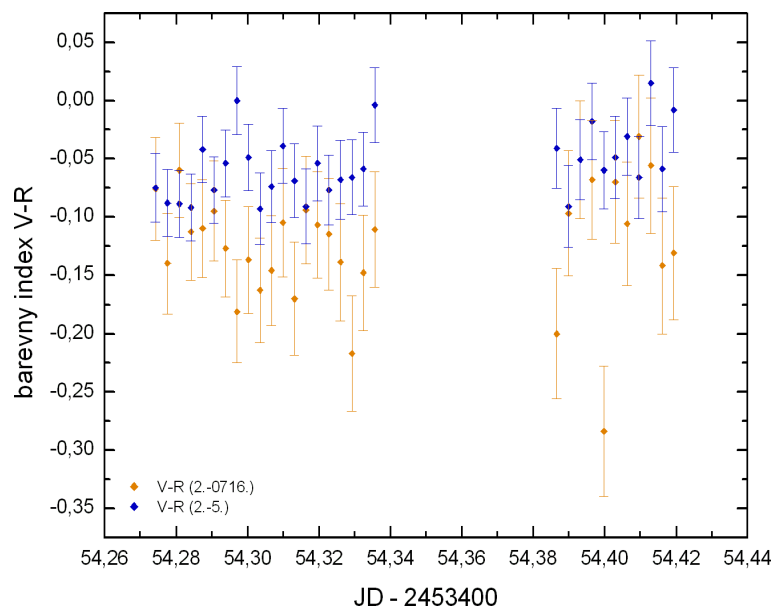
Obrázek 3.6: Křivka barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) pro noc 24./25.11.2004.



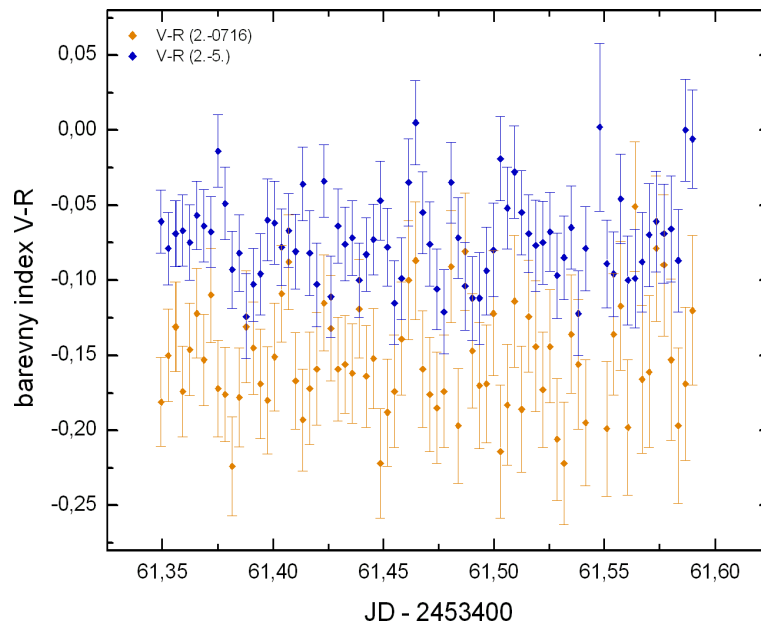
Obrázek 3.7: Křivka barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) pro noc 6./7.2.2005.



Obrázek 3.8: Křivka barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) pro noc 8./9.2.2005.



Obrázek 3.9: Křivka barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) pro noc 24./25.3.2005.



Obrázek 3.10: Křivka barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) pro noc 31.3./1.4.2005

Data poslední noci 31.3./1.4.2005 (obrázek 3.10) také na první pohled nesledují žádný trend a rozptyl hodnot je během celého měření u obou objektů téměř konstantní: u srovnávací hvězdy je to zhruba 0,13 mag a u blazaru asi 0,17 mag. Průměrné hodnoty se liší o 0,07 mag.

Shrnutí

Během žádné z nocí tedy není pozorována v závislosti barevného indexu na čase žádná výrazná změna, porovnáme-li jeho průběh s barevným indexem 5. srovnávací hvězdy. Ze všech grafů je ale patrná přítomnost poměrně velkého rozptylu naměřených hodnot, který se zdá být pro data blazaru a srovnávací hvězdy srovnatelný.

3.3 Kumulativní křivky pro všechna data

Vyneseme-li si světelné křivky pro blazar a srovnávací hvězdu v obou filtrech ze všech pozorovacích nocí do jednoho grafu (obrázek 3.11), budou na první pohled lépe patrná některé fakta, která lze vyčíst i z grafů pro jednotlivé noci:

Od první pozorovací noci ke druhé a třetí došlo k výraznému poklesu magnitudy blazaru asi o 0,5 mag a i během dalších nocí se magnituda blazaru měnila. Je tedy patrné, že se blazar nemění jen v průběhu jednotlivých nocí (jako například první a poslední pozorovací noc, obrázky 3.1 a 3.5), ale také na škále týdnů a měsíců. Například od čtvrté k páté pozorovací noci magnituda blazaru jistě stoupala, zatímco během páté noci téměř lineárně klesala.

Ovšem lze také vidět, že pozorování blazaru ve filtru R ve druhé pozorovací noci se výrazně liší od noci následující, zatímco data naměřená ve filtru V jsou zhruba stejná – 6.2.2005 je blazar ve filtru R mnohem jasnější než 8.2.2005 zatímco ve filtru V se jeho intenzita tolik nemění.

Jelikož změna barevného indexu je rozdíl jasnosti objektu ve dvou filtrech (viz kapitola 1.3), měla by se tato diskontinuita projevit v křivkách barevných změn. A opravdu je zřejmé, že 6./7.2.2005 měl blazar barevný index $V-R$ zhruba $-0,25$ mag (obrázek 3.7), zatímco v ostatních pozorovacích nocích se jeho hodnota pohybovala v intervalu od $-0,16$ mag do $-0,13$ mag.

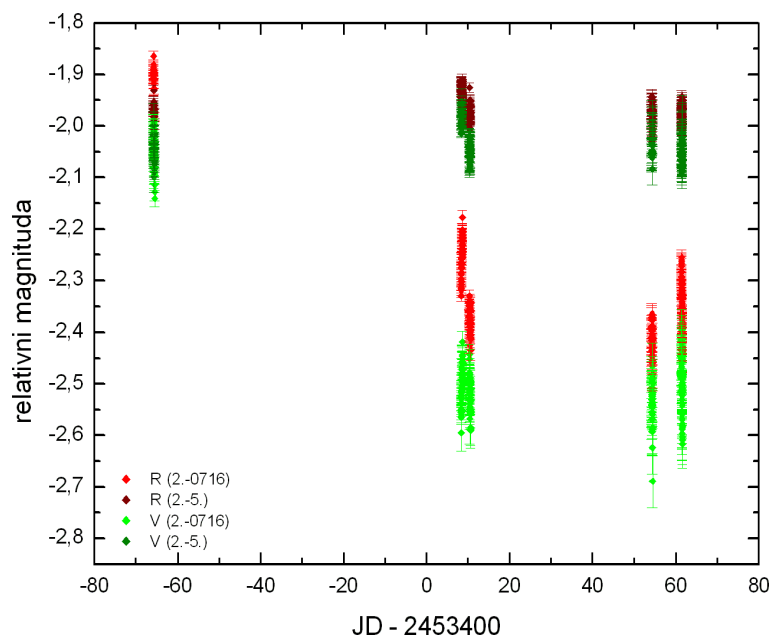
V grafech pro noci 24./25.11.2004, 6./7.2.2005 ani 8./9.2.2005 (obrázky 3.6, 3.7 a 3.8) ale žádná výraznější změna barevné křivky není. Mezi druhou a třetí pozorovací noci by tedy muselo dojít k výrazné změně barvy objektu téměř skokem z jedné hodnoty na druhou.

Mnohem pravděpodobnější se proto zdá být vysvětlení, že jsme data naměřili v jiném filtru než v R, když systém výměny filtrů nepracoval správně, nejspíše ve filtru I.

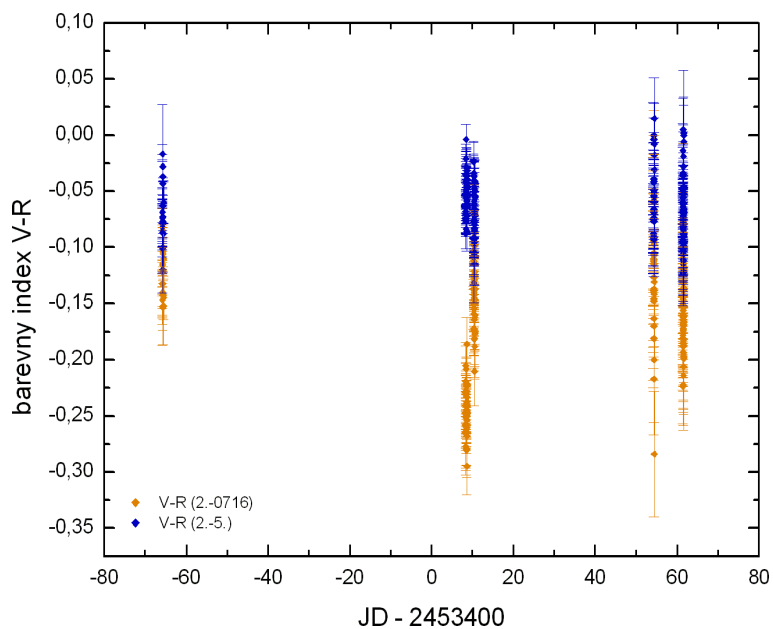
Závislost barevného indexu na čase můžeme také vynést do jednoho grafu pro data ze všech nocí.

Na obrázku 3.12 jsou do grafu vyneseny i hodnoty z noci 6./7.2.2005, které pravděpodobně nejsou hodnoty barevného indexu $V-R$. A na obrázku 3.13 jsou stejné závislosti vyneseny již bez sporné noci 6./7.2.2005.

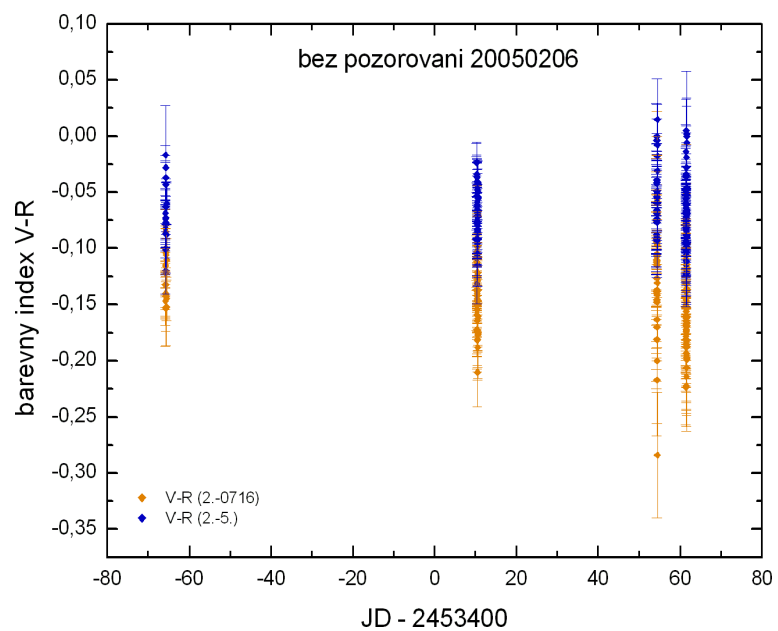
Křivka barevných změn na této škále nevykazuje žádnou přímou tendenci, ale konstantní (beze změn) nejspíše také není. Podobné chování ovšem vykazuje i barevný index 5. srovnávací hvězdy a je možné ho vysvětlit změnou barevných indexů srovnávaných objektů při průchodu světla atmosférou za různých povětrnostních podmínek.



Obrázek 3.11: Světelné křivky blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) ve filtrech R a V pro všechny pozorovací noci.



Obrázek 3.12: Křivky barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) ve filtrech R a V pro všechny pozorovací noci.



Obrázek 3.13: Křivky barevných změn blazaru (2.-0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.-5.) ve filtrech R a V pro všechny noci kromě 6./7.2.2005.

Tímto přímým způsobem tedy změnu barvy blazaru nemůžeme ani prokázat ani zamítnout.

Kapitola 4

Analýza rozptylů zpracovaných dat

Vyzkoušíme tedy ještě jeden způsob, kterým by se nám mohlo podařit odhalit barevné změny blazaru, ačkoli o nich už nic bližšího nezjistíme. Statistické metody totiž umožňují zjistit charakter rozptylu dat nebo vzájemně porovnat dva rozptyly.

Někdy je možné určit charakter rozptylu dat a některé jeho parametry z jednoduchých měř polohy, prostým výpočtem například směrodatné odchylky. Tyto metody jsou ale velice citlive k hrubým chybám – jen jediná hodnota může výsledek zcela zkreslit. Mnohem robustnější metodou je použití histogramu (následující kapitola). Z něj je charakter rozptylu v hrubých rysech patrný na první pohled.

4.1 Histogram

Obor, ve kterém se nachází všechna zkoumaná data x_1, \dots, x_n , rozdělíme na intervaly I_1, \dots, I_k , kterým se říká třídy. Neodporují-li tomu nějaké velmi závažné důvody, volí se tyto třídy stejně velké. Nechť teď n_j je počet těch hodnot x_1, \dots, x_n , které patří do třídy I_j , pro $j = 1, \dots, k$. Čísla n_j se nazývají třídni četnosti. Graficky se pak tato data zobrazují ve tvaru tyčkového diagramu, polygonu četnosti, či histogramu. [2]

4.2 Gaussovo rozdělení

Jak bylo řečeno v úvodu kapitoly 3.3 data, jejichž fluktuace vznikají náhodně, mají Gaussovo normální rozdělení. To znamená, že relativní zastoupení jednotlivých hodnot v měřeném systému dat je dáno Gaussovou funkcí:

$$\varphi(x|x_0, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-x_0)^2/2\sigma^2}$$

Jde o funkci proměnné x s parametry x_0 a σ . Tento vzorec udává hustotu pravděpodobnosti normálně rozdělených dat, která je normovaná (tedy celková pravděpodobnost je jednotková). Taková funkce vyjadřuje pravděpodobnost, že naměřená hodnota bude právě x .

x_0 je střed Gaussovy funkce. V případě dat s normálním rozdělením je totožný se střední hodnotou naměřených dat. V systému hodnot je zastoupena nejčastěji a je to tedy nejpravděpodobnější hodnota měřené veličiny.

σ je pološířka funkce v polovině její výšky, odpovídá rozptylu hodnot a určuje tedy nejistotu, se kterou můžeme hodnotu x_0 považovat za přesnou hodnotu měřené veličiny. Pro data s normálním rozdělením přesně odpovídá statistické směrodatné odchylce.

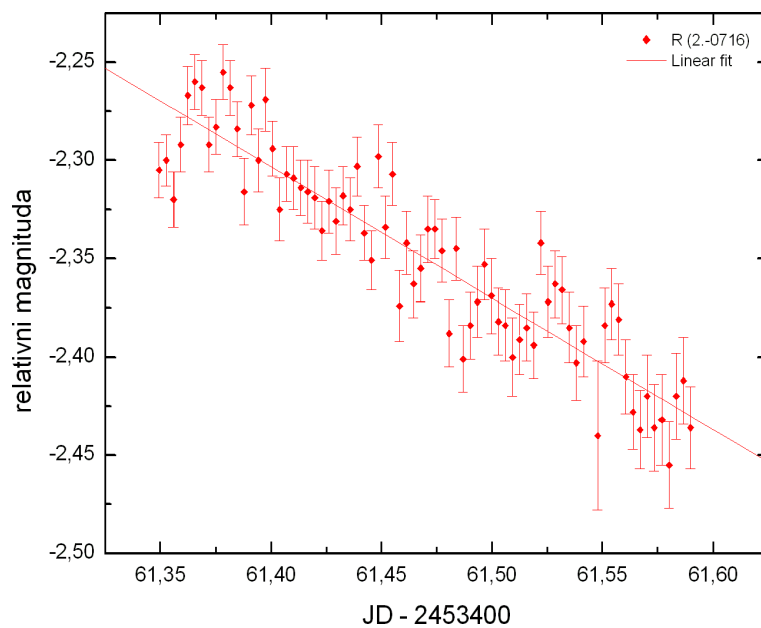
4.3 Výběr dat

Jak už bylo zřejmé z pozorování a další zpracování to potvrzovala, nejkvalitnější data jsme naměřili v noci z 31.3. na 1.4.2005. Během této noci docházelo také k výraznému poklesu jasnosti blazaru a jak vyplývá z již zmíněných studií (uvedeny v kapitolách 1.1.4 a 2.1) blazary obecně ale i blazar PKS 0716+714 projevují nejvýraznější barevné změny při rychlých změnách intenzity.

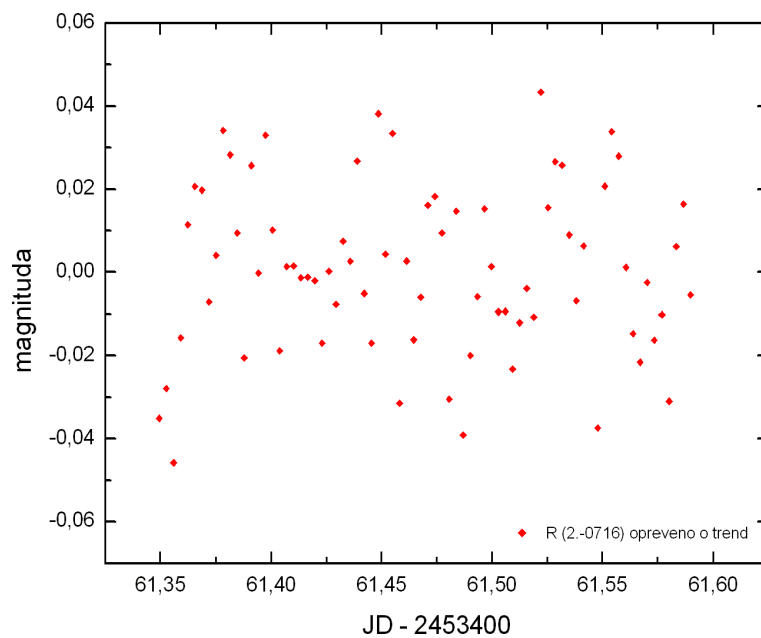
4.4 Analýza

Chceme tedy zjistit charakter rozptylů dat naměřených v pozorovací noci z 31.3. na 1.4.2005. Vytvoříme proto pro tato data histogramy (grafy četností) a charakter rozptylu budeme diskutovat.

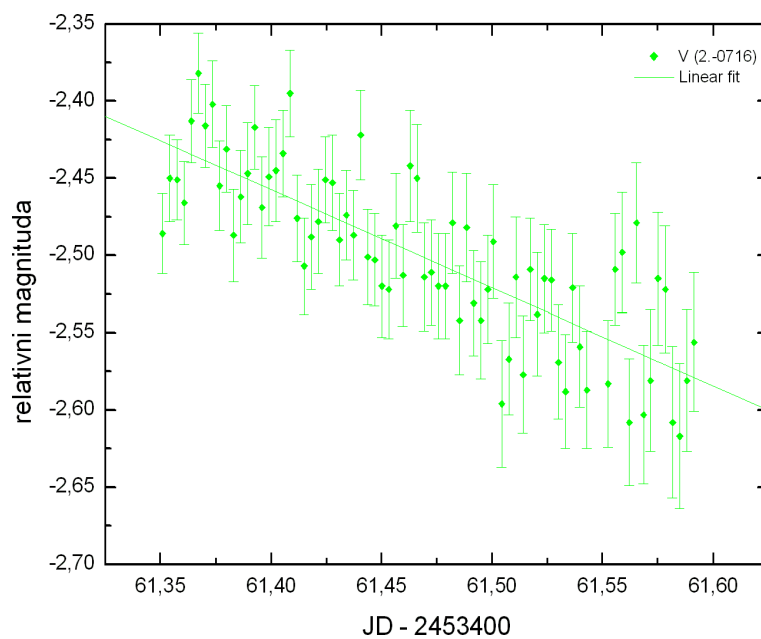
Podíváme se nejprve na rozdělení dat ve světelných křivkách. Tyto závislosti u blazaru ovšem jeví výrazný lineární trend, který jistě není způsoben rozptylem dat kolem nějaké střední polohy, ale přímo změnou zařivého výkonu objektu. Proložíme tedy těmito daty lineární závislost $y = A + Bx$ metodou nejmenších čtverců (obrázky 4.1 a 4.3), kde x je redukované Juliánské datum, y příslušná hodnota relativní magnitudy a A a B jsou parametry.



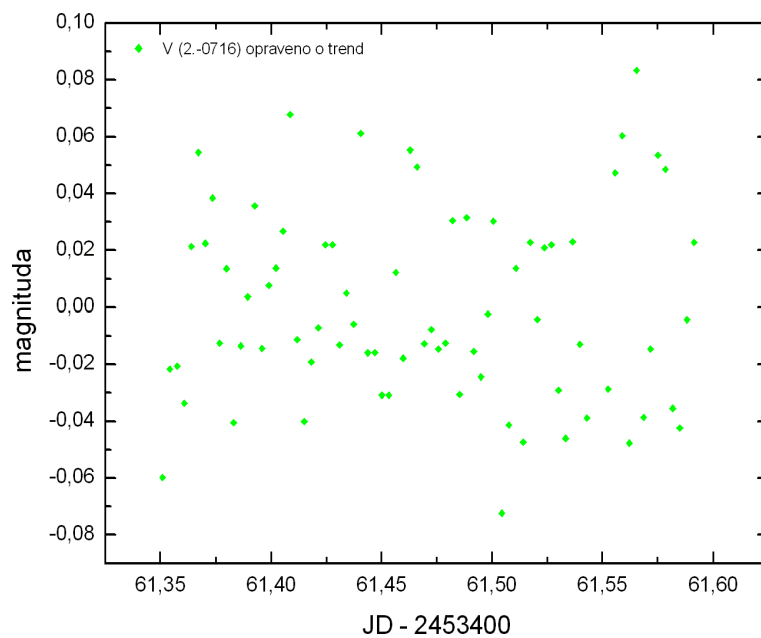
Obrázek 4.1: Lineární fit daty pořízenými v R filtru v noci 31.3./1.4.2005. Rovnice regrese je $y = 38,73 - 0,67x$.



Obrázek 4.2: Hodnoty relativní magnitudy pro blazar ve filtru R opravené o lineární trend (viz. obrázek 4.1) pro noc 31.3./1.4.2005.



Obrázek 4.3: Lineární fit daty pořízenými ve V filtru v noci 31.3./1.4.2005. Rovnice regrese je $y = 36,50 - 0,64x$.



Obrázek 4.4: Hodnoty relativní magnitudy pro blazar ve filtru V opravené o lineární trend (viz. obrázek 4.3) pro noc 31.3./1.4.2005.

Pokud získané trendy od naměřených hodnot odečteme, měl by nám zůstat jen šum s více či méně náhodným rozdělením. Takto upravená data jsou do grafu vynesena na obrázcích 4.2 a 4.4. Střední hodnota těchto dat je nula, což je dáno jednoduše tím, jak jsme data získali.

Na obrázcích 4.5 až 4.8 jsou uvedeny histogramy pro data blazaru (po korekci trendu) a 5. srovnávací hvězdy ve filtrech R a V z vybrané noci.

Při analýze barevných indexů již odpadá komplikace s odstraněním trendu a hned tedy uvádím histogramy – jsou na obrázcích 4.9 a 4.10.

Abychom mohli charakter rozptylu dat lépe posoudit, jsou histogramy metodou nejmenších čtverců proloženy Gaussovou funkcí normálního rozdělení. Protože ale na osu y nevynášíme poměrné nebo procentuální zastoupení, hodnotou není tato proložená funkce normovaná, ale má tvar:

$$\varphi'(x|x_0, \sigma, A) = Ae^{-(x-x_0)^2/2\sigma^2}$$

kde A je další parametr funkce.

Poznámka: Parametry proložené Gaussovy funkce na volbě velikosti tříd histogramu závisí jen málo, přesto je vhodné tuto volbu uvážit, případně vyzkoušet různé hodnoty. Délka intervalu by měla zhruba odpovídat hodnotě σ nebo být menší a v intervalu obsahujícím hodnotu x_0 by mělo být alespoň \sqrt{n} hodnot, kde n je celkový počet naměřených hodnot.

Diskuze

Aby bylo možné histogramy porovnat, jsou použity v odpovídajících si grafech vždy stejné velikosti tříd.

Žádný z histogramů na první pohled úplně přesně neodpovídá proložené Gaussově funkci normálního rozdělení. Důvodem je malý počet naměřených hodnot.

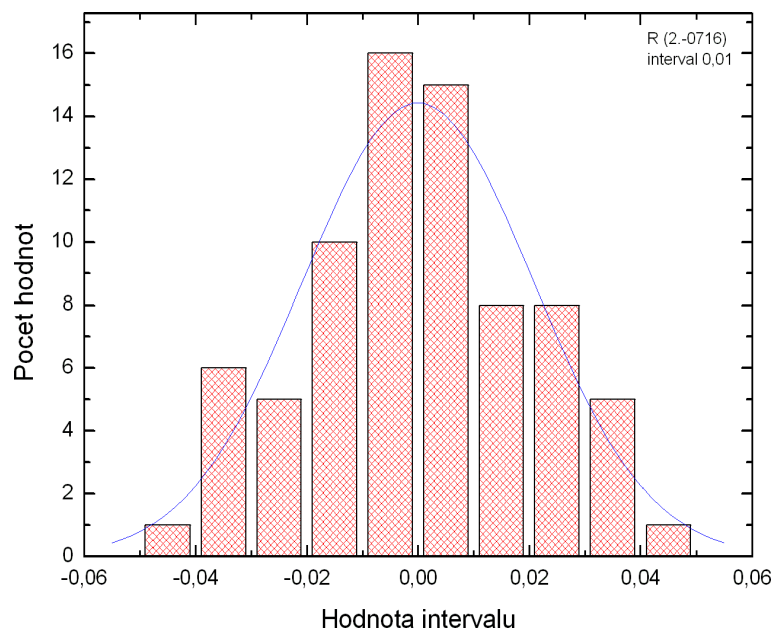
Lze si povšimnout, že tyto grafy četnosti pro data blazaru jsou vždy mnohem širší a tedy i nižší než pro 5. srovnávací hvězdu. V grafu pro data z filtru R blazaru (obrázek 4.5) je maximální třídní četnost 16, u stejného histogramu pro srovnávací hvězdu (obrázek 4.6) je tato hodnota 22. Ve filtru V je v grafu pro blazar maximální třídní četnost 18 (obrázek 4.7) a 19 u 5. srovnávací hvězdy (obrázek 4.8). A pro barevný index blazaru má histogram maximální četnost 15 (obrázek 4.9), zatímco graf srovnávací hvězdy má maximální třídní četnost 20 (obrázek 4.10). Tyto údaje lze vyčíst přímo z histogramů (bez proložených Gaussových křivek) a je zřejmé, že nejistota střední hodnoty u dat blazaru je mnohem větší, než u dat naměřených pro srovnávací hvězdu.

Dále je z grafů patrné, že srovnávací hvězda, má ve filtru R i V jednu třídu s maximální třídní četností a ve třídách na obě strany od ní, třídní četnost klesá. Histogramy blazaru tuto vlastnost nemají. Pro grafy četnosti barevného indexu to už neplatí – na obě strany klesající tendenci v grafu srovnávací hvězdy narušuje poslední třída, v histogramu blazaru jsou však takové třídy dvě.

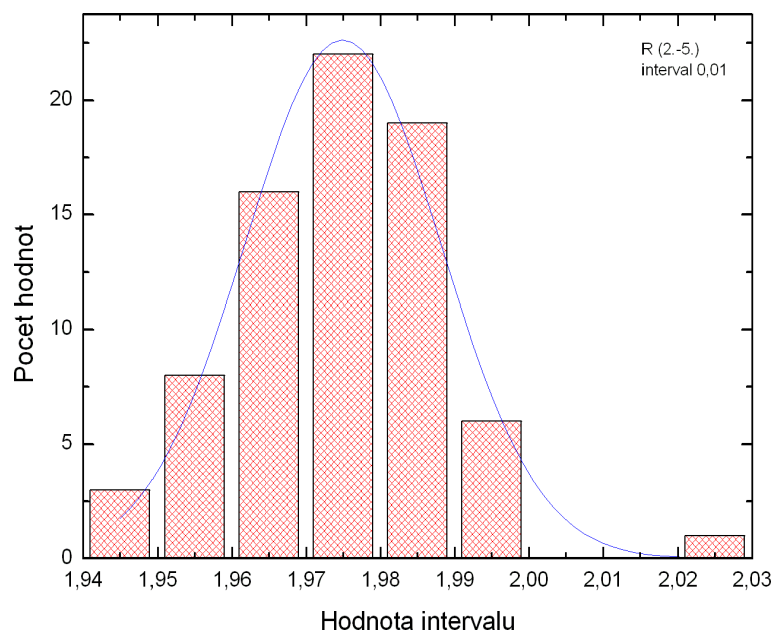
Z histogramů pro světelné křivky je dobře patrné, že data blazaru nemají normální Gaussovo rozdělení, zatímco data srovnávací hvězdy se tomuto rozdělení dobře blíží. Je třeba si ale uvědomit, jak jsme hodnoty, které histogram tvoří získali – pokles relativní magnitudy jsme aproximovali lineární závislostí. To, že tato data nemají normální rozdělení znamená, že intenzita zdroje neklesala během zkoumané noci lineárně.

Z histogramů pro barevné indexy podobné zvěry již učinit nelze. Rozdělení hodnot jak pro blazar tak pro 5. srovnávací hvězdu se dá považovat za normální. Je ale patrné, že rozptyl hodnot blazaru je mnohem větší než rozptyl hodnot srovnávací hvězdy.

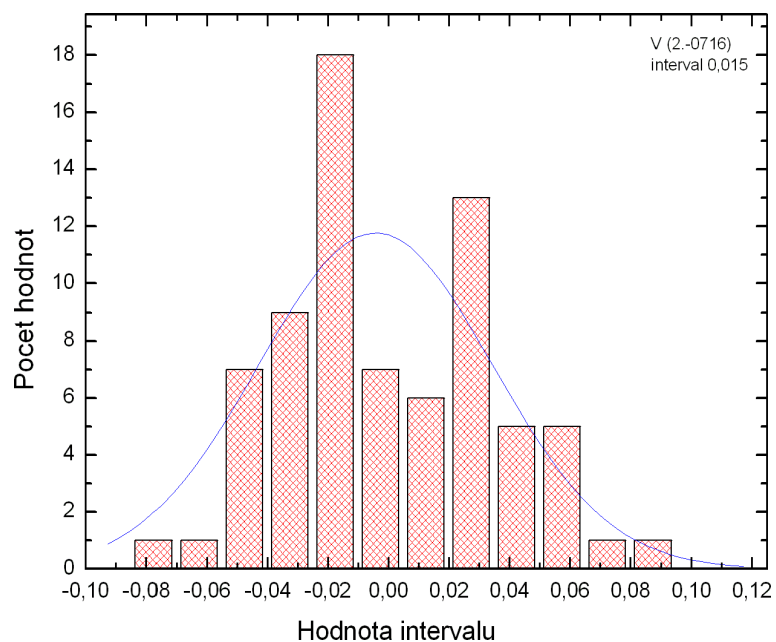
Stejně závěry lze učinit i pokud v histogramu zvolíme jiné velikosti tříd.



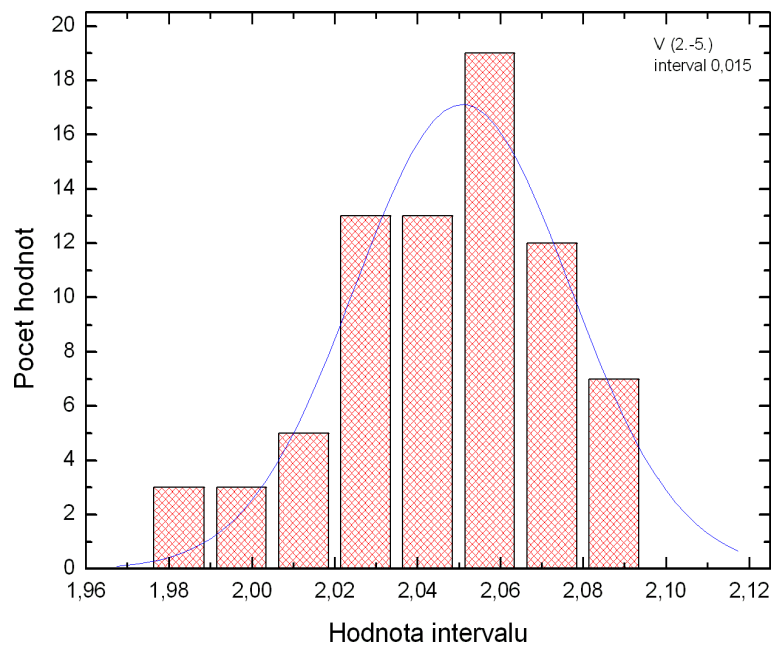
Obrázek 4.5: Histogram pro data blazaru ve filtru R z noci 31.3./1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.



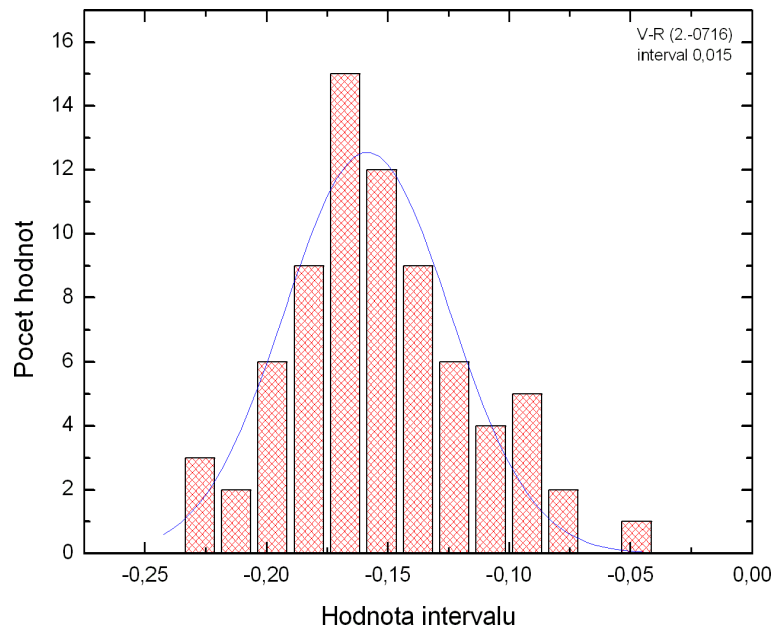
Obrázek 4.6: Histogram pro data 5. srovnávací hvězdy ve filtru R z noci 31.3./1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.



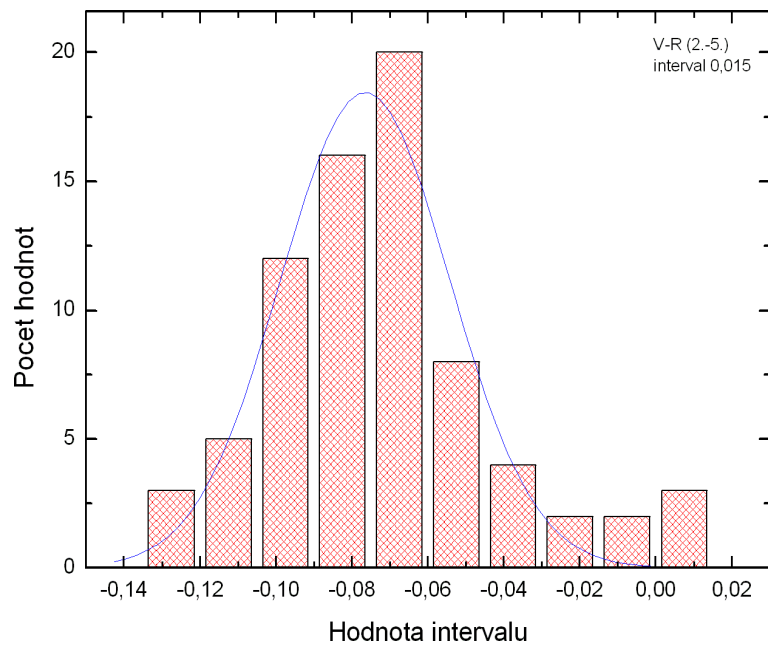
Obrázek 4.7: Histogram pro data blazaru ve filtru V z noci 31.3./1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.



Obrázek 4.8: Histogram pro data 5. srovnávací hvězdu ve filtru V z noci 31.3./1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.



Obrázek 4.9: Histogram pro barevný index blazaru v noci 31.3/1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.



Obrázek 4.10: Histogram pro barevný index 5. srovnávací hvězdy v noci z 31.3.2005 na 1.4.2005 s proloženou Gaussovou funkcí.

4.5 F–test

Provedme teď jakýsi důkaz sporem: řekněme, že k barevným změnám nedochází, a že křivka barevných změn ale také světelné křivky ve filtrech R a V blazaru mají normální Gaussovo rozdělení, stejně tak jako tyto křivky 5. srovnávací hvězdy. Gaussovy funkce proložené histogramy těchto křivek mají parametry uvedené v následujících tabulkách 4.1 a 4.2.

R	A	x_0	σ
(2.–0716)	14,43	$-3,38 \cdot 10^{-6}$	0,021
(2.–5.)	22,64	1,98	0,013
V			
(2.–0716)	11,78	-0,004	0,039
(2.–5.)	17,12	2,05	0,026

Tabulka 4.1: Parametry Gaussových funkcí proložených histogramy dat světelných křivek blazaru (2.–0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.–5.) pro noc 31.3./1.4.2005.

V–R	A	x_0	σ
(2.–0716)	12,56	-0,16	0,034
(2.–5.)	18,45	-0,08	0,022

Tabulka 4.2: Parametry Gaussových funkcí proložených histogramy barevných indexů blazaru (2.–0716) a 5. srovnávací hvězdy (2.–5.) pro noc 31.3./1.4.2005.

Můžeme nyní provést statistický test shodnosti dvou rozptylů, takzvaný F–test:

Máme-li dvě normální nezávislá rozdělení X_1, \dots, X_m a Y_1, \dots, Y_n , pro jejichž počty platí $m \geq 2$, $n \geq 2$, a náhodnou veličinu $Z = S_X^2/S_Y^2$, pak platí:

Je-li $Z > F_{n,m}$, pak rozptyly těchto dvou systémů dat nejsou shodné.

Je-li $Z < F_{n,m}$, pak o shodnosti zkoumaných rozptylů tímto způsobem nelze rozhodnout.

Čísla $F_{n,m}$ jsou tabelována. [2]

Směrodatné odchylky S_X^2 , S_Y^2 jsme nezískali výpočtem, ale proložením Gaussovy funkce histogramem. A jak jsem uvedla v kapitole 4.2, pološířka této funkce odpovídá směrodatné odchylce, tedy:

$$Z = \frac{S_X^2}{S_Y^2} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \text{ pro } \sigma_1 > \sigma_2$$

Zkoumané systémy naměřené v pozorovací noci 31.3./1.4.2005 obsahují 75 hodnot. Hodnota F je tedy pro všechna data stejná. Nejbližší tabelované hodnoty jsou $F_{60,60}$ a $F_{120,120}$. Použijeme první hodnotu:

$$F_{60,60} = 1,84 \text{ na hladině pravděpodobnosti } 0,99$$

Hodnoty Z uvádím v tabulce 4.3.

	Z
R	2,53
V	2,25
V-R	2,33

Tabulka 4.3: Hodnoty Z pro světelné křivky a křivku barevných změn naměřených dat.

Každé Z je tedy větší než $F_{60,60}$. Rozptyly hodnot blazaru a 5. srovnávací hvězdy nejsou tedy shodné ani v jednom ze tří případů – ve filtru R, ve filtru V ani pro hodnoty barevného indexu.

Z této analýzy plyne, že blazar PKS 0716+714 obecně, ale zejména jeho barevný index, má jiné rozdělení hodnot než 5. srovnávací hvězda. To může být způsobeno buď přítomností dalších šumů, které nemají přímou vazbu na vznik záření, a nebo naopak proměnností zdroje, kterou my bohužel zaznamenáváme jen jako šum.

Kapitola 5

Závěr

V teoretické části jsem popsala základní fyzikální principy vedoucí k jevům pozorovaným u blazarů a aktivních galaxií obecně. Během pěti pozorovacích nocí jsem naměřila závislosti relativní magnitudy vybraného blazaru PKS 0716+714 na čase ve dvou spektrálních filtrech R a V. Naměřená data jsem předzpracovala, jak je u CCD snímků běžné a vynesla je jako světelné křivky do grafů. Z měření ve dvou filtrech je možné zjistit závislost barevného indexu objektu na čase, které jsou taktéž vyneseny do grafů. V poslední kapitole jsem zkoumala charakter rozptylu naměřených dat blazaru z noci 31.3./1.4.2005 a porovnávala jej s rozptylem dat vybrané srovnávací hvězdy.

Je patrné, že data ve filtru R jsou kvalitnější než data pořízená ve filtru V, což je způsobeno větší citlivostí kamery v oboru R.

Relativní magnituda blazaru se v průběhu jednotlivých nocí výrazně měnila a zaznamenali jsme i změnu na delší časové škále zahrnující všechny pozorovací noci. Naproti tomu barevný index nejeví žádnou výraznější fluktuaci, ale tato data mají na první pohled patrný velký rozptyl hodnot.

Světelné křivky pozorovací noci, pro kterou jsme prováděli statistickou analýzu (31.3./1.4.2005), jeví výrazný trend. Abychom mohli určit charakter rozdělení těchto dat, odečetli jsme od nich lineární závislost. Zjistili jsme ale, že takto získaná data, také nemají Gaussovo rozdělení a lze proto usoudit, že proložená závislost nebyla správná, neboli intenzita blazaru během zkoumané noci neklesala lineárně.

O charakteru rozptylu hodnot barevného indexu už nelze takto přímo rozhodnout. Protože jsme ale hodnoty barevného indexu získali výpočtem z hodnot naměřených ve filtrech R a V, a tyto Gaussovo rozdělení nemají, lze o normálnosti rozdělení u barevného indexu blazaru pochybovat.

Naopak, když jsme předpokládali, že hodnoty ve filtrech R a V i barevného indexu blazaru normální charakter rozdělení mají, výsledky F-testu jednoznačně ukazují, že Gaussovo rozdělení u blazaru a srovnávací hvězdy nejsou stejné.

Ačkoli tato práce barevné změny blazaru neprokázala, plyne z jejích výsledků, že charakter barevného indexu $V-R$ blazaru PKS 0716+714 a 5. srovnávací hvězdy se značně liší.

Literatura

- [1] Robson, I., *Active galactic nuclei*, Wiley, 1996
- [2] Anděl, J., *Statistické metody*, Matfyzpress, Praha, 1993
- [3] Bach, U., Krichbaum, T. P. a další, *Kinematic study of blazar S5 0716+714*, *A&A* **433**: 815–825 (2005)
- [4] Gimmoni, P. a další, *Synchrotron and inverse Compton variability in BL Lac object S5 0716+714*, *Astron. Astrophys.* **351**: 59–64 (1999)
- [5] Kaastra, J. S. & Roos, N., *Massive binary black holes & wiggling jets*, *Astron. Astrophys.* **254**: 96–98 (1992)
- [6] Kleczek, J., *Velká encyklopedie astronomie*, Academia, 2002
- [7] Mikulášek, Z., *Úvod do fyziky hvězd a hvězdných soustav*, Brno, 2000
- [8] Navrátil, K.: soukromé sdělení 2000
- [9] Raiteri, C. M., Villata, M. a další, *Optical and radio behaviour of the BL Lacertae object 0716+714*, *A&A* **402**: 151–169 (2003)
- [10] Sixtová, L., *Diplomová práce, Blazary a jejich pozorování*, Brno, 2004
- [11] Speziali, R. & Natali, G., *BVI mikrovariability in BL Lac outburst summer 1997*, *Astron. Astrophys.* **339**: 382–384 (1998)
- [12] Sterken, Chr., Manfroid, J., *Astronomical photometry (A Guide)*, Nizozemí, 1992
- [13] Štolc, M., Švestka, J., Vanýsek, V., *Fyzika hvězd a vesmíru*, Praha, 1983
- [14] Urry, C. M. a Padovani, P., *Unified schemes for radio-loud AGN*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **107**: 803–845 (1995)
- [15] Vagnetti, F. & Trevese, D., *Color variability of AGNs*, *Mem. S.A It.* Vol. **74**: 963 (2003)
- [16] Vanýsek, V., *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia Praha, 1980
- [17] <http://www.lsw.uni-heidelberg.de/projects/extragalactic/charts/0716+714.html>
- [18] <http://www.profc.udec.cl>
- [19] <http://physics.nist.gov>

- [20] Clements, S. D., Smith, A. G., Aller, H. D. a Aller, M.F., AJ **110**: 529 (1995)
- [21] Heeschen, D. S., Krichbaum, T., Schalinski, C. a Witzel, A., AJ **94**: 1493 (1987)
- [22] Heidt, J. a Wagner, S. J., A&A **305**: 42 (1996)
- [23] Gabudza, D. C., Kovalev, Y. Y. a další, A&A **333**: 445 (1998)
- [24] Ghisellini, G., Maraschi, L. a Dondi, L., A&AS **120**: 503 (1996)
- [25] Ghisellini, G., Villata, M. a další, A&A **327**: 61 (1997)
- [26] Giommi, P., Barr, P., Garilli, B., Maccagni, D. a Pollock, A., ApJ **356**: 455 (1990)
- [27] Kadler, M., Kerp, J. a Kirchbaum, T. P., A&A, submitted (2004)
- [28] Kollgaard, R. I., Vistas in Astronomy **38**: 29 (1994)
- [29] Marscher, A. P. a Gear, W. K., ApJ **298**: 114 (1985)
- [30] Pian a další, ApJ **492**: L17 (1998)
- [31] Quirrenbach, A., Witzel, A. a další, ApJ **372**: L71 (1991)
- [32] Raiteri, C. M., Villata, M. a další, A&A **377**: 396 (2001)
- [33] Raiteri, C. M., Villata, M. a další, A&A **402**: 151–169 (2003)
- [34] Smith, A. G. a Nair, A. D., PASP **107**: 863 (1995)
- [35] Tornikoski, M., Valtaoja, E. a další, A&A **289**: 673 (1994)
- [36] Villata, M., Raiteri, C. M., Lanteri, L., Sobrito, G. a Cavallone, M., A&AS **130**: 305 (1998)
- [37] Villata, M. a Raiteri, C. M., A&A **347**: 30–36 (1999)
- [38] Villata, M., Mattox, J. R. a další, A&A **363**: 108 (2000)
- [39] Villata, M., Raiteri, C. M., a další, A&A **390**: 407 (2002)
- [40] Wagner, S. J., Witzel, A. a další, AJ **111**: 2187 (1996)
- [41] Witzel, A., Heeschen, D. S., Schalinski, C. a Krichbaum, T., Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Hamburg **65**: 239 (1986)
- [42] Witzel, A., Schalinski, C. a další, A&A **206**: 245 (1988)

Tato práce byla vysázena typografickým systémem L^AT_EX 2_ε.