



MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká Fakulta

Bakalárska práca

Identifikácia rentgenových zdrojov v optickom obore

Matúš Kocka

Brno 2007

Abstrakt

- Práca sa zaoberá spôsobmi identifikácie optických náprotivkov rentgenových zdrojov objavených družicami INTEGRAL a Swift. Tiež sa venuje analýze fluktuácií jasnosti týchto objektov, farebným indexom a svetelným krivkám.
- Goal of our thesis is to find optical counterparts of selected X-ray and gamma sources measured by INTEGRAL and Swift space missions. Our work also provides basic measurement of short-term variations of sources in optical band, as well as its colour curve and light curve analysis.

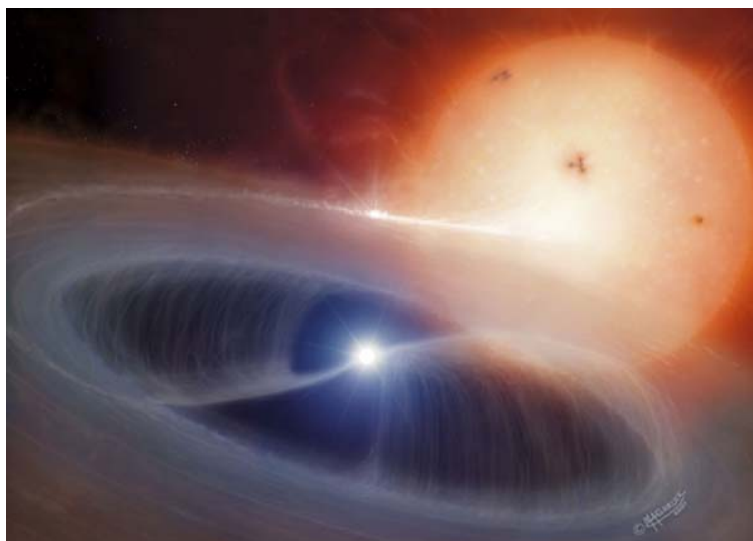
Čestne prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne, len na základe dobrých rád môjho vedúceho a použitej literatúry.

V Brne dňa:

Matúš Kocka

„ If you haven't found something strange during the day it hasn't been much of a day “

John Archibald Wheeler



Chcel by som poďakovať Filipovi, vedúcemu s neuveriteľne pevnými nervami, pod ktorého vedením som sa naučil obrovské množstvo nových vecí z najkrajšej vedy na svete, Astronómie. Tiež ďakujem Hanke, Milke, Gabovi, Ondrovi, Tomášovi a Bajuovi, že boli v správny čas na správnom mieste keď som potreboval.

Obsah

1 Úvod	7
2 X-ray a gama astronómia	8
2.1 Jeho výsosť: Blackbody	9
2.1.1 Wienov posunovací zákon	11
2.2 Cyklotrónová a synchrotrónová emisia	11
2.2.1 Power-Law spektrum	13
2.3 Comptonov a inverzný Comptonov jav	13
2.4 511 KeV	14
2.5 Kto ako svieti?	15
2.6 Farebné indexy	15
2.7 INTEGRAL	20
3 Typy objektov	22
3.1 Galaktické objekty	22
3.2 Extragalaktické objekty	24
4 Pozorované objekty	25
4.1 Pozorovacia aparátúra	25
4.2 Software a úprava snímkov	26
4.3 Výber objektov	26
4.4 Pozorovania	27
4.5 IGRJ00370+6122	28
4.6 IGRJ01583+6713	29
4.7 IGRJ06253+7334	29
4.8 IGRJ00254+6822	30

OBSAH

5	Metódy identifikácie	31
5.1	Analýza šumu	31
5.1.1	Histogram	32
5.1.2	Mocné Gaussovo rozdelenie	32
5.2	Hertzsprung-Russellov diagram	33
5.3	Svetelná krivka	34
5.4	Porovnanie s katalógmi	34
6	Analýza šumu	36
6.1	Vybrané objekty a dáta	36
6.2	Analýza	36
6.3	IGRJ00370+6122	37
6.4	IGRJ01583+6713	41
6.5	IGRJ06253+7334	44
6.6	Diskusia k metóde porovnania šumu	47
7	Hertzsprung-Russellov diagram	48
7.1	Vybrané objekty a dáta	48
7.2	Spracovanie	48
7.3	IGRJ00370+6122	49
7.4	IGRJ01583+6713	49
7.5	IGRJ06253+7334	50
7.6	Diskusia k metóde HR diagramu	51
8	Svetelná krivka	52
9	Porovnanie s katalógmi	54
10	Záver	56
	Literatúra	58

Úvod

Človek dostal od prírody do daru detektor elektromagnetického žiarenia, ktorý sa nazýva oko. Oko je citlivé na elektromagnetické žiarenie o vlnových dĺžkach približne od 300 do 800 nm; tejto časti spektra vravíme svetlo. Pravdepodobne hneď, ako človek oko dostal, pozrel sa na oblohu a tak položil základy najkrajšej vedy, Astronómie.

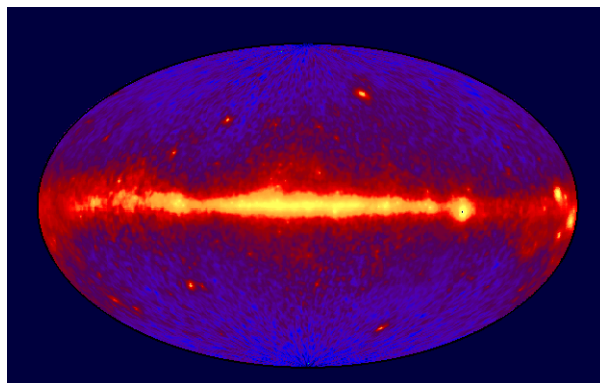
S postupom času sa zdokonal'ovala technológia, človek vymyslel spôsoby ako detekovať elektromagnetické žiarenie väčších vlnových dĺžok, čo dalo za vznik „rádiovej astronómii“ a „infračervenej astronómii“. Človek tiež prišiel na spôsob ako detekovať elektromagnetické žiarenie krátkych a veľmi krátkych vlnových dĺžok. Rentgenovým žiarením sa označila časť elektromagnetického spektra s vlnovými dĺžkami zhruba od 10 do 0,01 nm a žiarením gama časť spektra menšia ako 0,01 nm.

Problém je v tom, že zemská atmosféra je nepriepustná pre fotóny s tak krátkymi vlnovými dĺžkami. Preto museli astronómovia počkať až dovtedy, kým rozvoj kozmonautiky nepriniesol možnosť dostať detektor mimo zemskú atmosféru. Toto sa stalo realitou v druhej polovici 20. storočia a dalo za vznik „astrofyzike vysokých energií“, vede, ktorá sa zaoberá tými najenergetickejšími procesmi vo vesmíre. Práve na extrémne krátkych vlnových dĺžkach „svietia“ najzáhadnejšie obludy vesmíru ako akrečné disky okolo čiernych dier, záhadné záblesky žiarenia gama či blazary.

V tejto práci sa budem venovať identifikácii takýchto objektov v optickej oblasti spektra. Družice ako Integral, SWIFT, COMTON, Beppo-SAX dokážu určiť polohu novoobjaveného zdroja len s určitou presnosťou, ktorá je typicky niekoľko oblúkových minút. V takomto chybovom boxe sa však zväčša nachádza dosť hviezd z našej galaxie. Mojim cieľom je použitím vhodných metód identifikovať a tým pádom presne určiť polohu rentgenového či gama zdroja.

X-ray a gama astronómia

Vesmír je plný rôznych typov objektov svietiacich na rôznych vlnových dĺžkach. Na najkratších vlnových dĺžkach svietia najviac tie najexotickejšie objekty. Jedná sa prevažne o materiál zahriaty v akrečných diskoch na extrémne teploty, či už sú to akrečné disky okolo neutrónových hviezd, planetárnych čiernych dier, alebo okolo supermasívnych čiernych dier v jadrách galaxií. Takmer vždy však ide o objekty, ktoré sú zahalené rúškom tajomstva.



Obr. 2.1: Obloha v gama z prístroja EGRET na Compton Observatory [21], NASA

Výskum týchto objektov je zložitý. Vysoko energetické fotóny sa náročne detekujú a ich koncentrovanie d'alekohľadom do ohniskovej roviny, kde sa nachádza detektor je len ťažko realizovateľné. K zobrazeniu sa nepoužíva klasická fokusujúca optika, ale pomerne zložité postupy využívajúce tzv. kódové masky. Preto majú rentgenové a gama d'alekohľady veľké zorné pole a ani tie najdokonalejšie nedokážu určiť presne polohu pozorovaného objektu tak, aby bola porovnateľná

s optickým oborom. Ďalším problémom je malý odstup signálu od šumu, fotónov zo zdroja je málo, ale ostatných vysoko energetických fotónov tvoriacich pozadie je priveľa. Preto sú potrebné dlhé expozície v ráde dní.

Táto práca pojednáva o metódach a spôsoboch identifikácie vysokoenergetických kozmických zdrojov, či už tých z našej Galaxie, alebo extragalaktických. Úvodom svojej práce by som sa chcel venovať práve mechanizmom, vďaka ktorým tieto objekty svietia. Jedná sa síce o viacero zložitých a komplexných procesov, ale je vhodné ich spomenúť.

Najfrekvencovanejšie procesy produkujúce spojité spektrum z astrofyzikálnych telies sú termálna emisia, synchrotrónové žiarenie, Comptonov a inverzný Comptonov proces.

2.1 Jeho výsosť: Blackbody

Všetky telesá zahriate na určitú teplotu emitujú elektromagnetické žiarenie; čím je teplota vyššia, tým je vlnová dĺžka emitovaného žiarenia kratšia. Normálne telesá, s akými bežne prichádzame do styku, sú v skutočnosti dosť komplikovanými žiaričmi, pretože nie všetko žiarenie z okolia prijímajú, ale niečo aj odrážajú. Preto sa používa fyzikálna aproximácia zvaná absolútne čierne teleso (anglicky „black body“). Absolútne čierne teleso je teleso v termodynamickovej rovnováhe so svojím okolím. Všetko žiarenie, čo naň dopadá, je dokonale pohlcované. Zároveň je dokonalým žiaričom. Takéto teleso samozrejme neexistuje¹, avšak v prvom priblížení môžeme takýmto modelom popisovať väčšinu astrofyzikálnych telies.

Emisiu čierneho telesa o teplote T v Kelvinoch (K) popisuje Planckov zákon

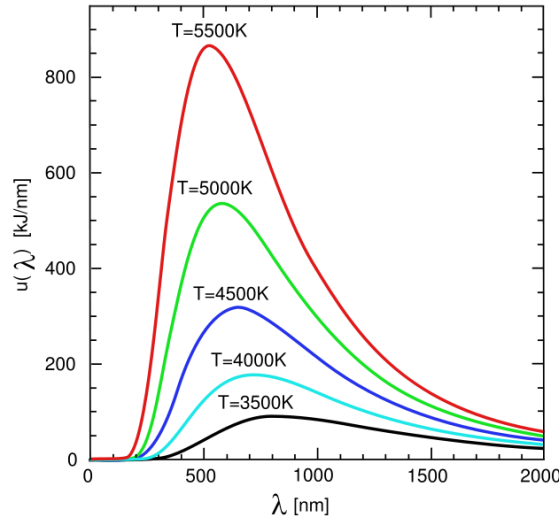
$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}, \quad (2.1)$$

v jednotkách Watt na meter štvorcový na jednotkový priestorový uhol cez jednotku frekvencie ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{Hz}^{-1}$). B_{ν} je intenzita emitovaného žiarenia počítaná na intervale frekvencií ν , h je Planckova konštanta, c je rýchlosť svetla vo vákuu, k je Boltzmanova konštanta a T je teplota. Tento vzťah sa tiež používa v tvare pre interval vlnových dĺžok:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)}. \quad (2.2)$$

Výsledná intenzita emitovaného žiarenia má potom rozmer ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$). Vzťah (2.2) je znázornený graficky na obrázku (2.2). Výsledná krivka je známa pod rôznymi menami, v tejto práci ju budem nazývať blackbody spektrum. Blackbody

¹V skutočnosti existuje takmer dokonalé čierne teleso a tým je sám Vesmír. Meranie reliktného žiarenia ukázalo, že momentálne zodpovedá spektru dokonalého čierneho telesa o teplote 2,725K, čo znamená že Vesmír je homogénny a izotropný, presne tak, ako hovorí Prvý kozmologický princíp. Za toto zistenie bola roku 2006 udelená Nobelova cena za fyziku lídrom projektu COBE (NASA), Dr. George F. Smoot a Dr. John C. Mather



Obr. 2.2: Blackbody spektrá viacerých objektov o rôznych teplotách. Všimnite si, že krivka popisujúca spektrum teplejšieho telesa vždy prekryje celú krivku chladnejšieho telesa. [22]

spektrum nám presne popisuje závislosť množstva emitovaného žiarenia danej vlnovej dĺžky na absolútnej teplote telesa.

Všimnime si na obr. (2.2), že krivka blackbody spektra rozdeľuje graf na dve časti, časť napravo od krivky, smerom k väčším vlnovým dĺžkam sa nazýva Rayleigh-Jeansov región a oblasť na druhej strane, smerom ku kratším vlnovým dĺžkam sa nazýva Wienov región.

Pretože Rayleigh-Jeansov región sa nachádza v dlhovlnnej časti spektra, je charakteristický výraz v exponente v rovnici (2.2) $hc/\lambda kT \ll 1$. Exponent môžeme potom rozvinúť $e^{hc/\lambda kT} = 1 + hc/\lambda kT$, ďalšie členy rozvoja môžeme zanedbať. Rovnica (2.2) vo vlnových dĺžkach sa potom redukuje na

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2ckT}{\lambda^4}, \quad (2.3)$$

a obdobne sa rovnica pre frekvenciu ν redukuje na

$$B_{\nu}(T) = \frac{2\nu^2 kT}{c^2}. \quad (2.4)$$

V krátkovlnnej oblasti, keď $hc/\lambda kT \gg 1$, môžeme preto urobiť aproximáciu $[e^{hc/\lambda kT} - 1] \sim e^{hc/\lambda kT}$. Známy vzťah (2.2) sa následne redukuje na

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 e^{hc/\lambda kT}} \quad (2.5)$$

a obdobne pre vzťah s frekvenciou ν

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 e^{h\nu/kT}}. \quad (2.6)$$

Celkovú emisiu z povrchu sférického čierneho telesa spočítame pomocou Stefan-Boltzmannovho zákona:

$$L = 4\pi r^2 \sigma T^4, \quad (2.7)$$

kde $4\pi r^2$ je plocha sférického telesa o teplote T , σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5.670 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

2.1.1 Wienov posunovací zákon

Wienov posunovací zákon popisuje vzťah medzi vlnovou dĺžkou píku emisie absolútne čierneho telesa a jeho teplotou:

$$\lambda_{\max} = b/T \quad (2.8)$$

kde λ_{\max} je vlnová dĺžka maxima píku v metroch, T je teplota a b je tzv. Wienova posunovacia konštanta, $b = 2.8977685 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$.

2.2 Cyklotrónová a synchrotrónová emisia

Jedná sa o netermálne emisie, takže rozloženie fotónov sa neriadi Maxwellovým rozložením. Ak sa elektrón nachádza v magnetickom poli, pôsobí naň Lorentzova sila, ktorá ho núti pohybovať sa po špirále okolo magnetických siločiar. Tento pohyb je pohybom zrýchleným a preto musí elektrón vyžarovať fotóny. Energia emitovaných fotónov je priamo úmerná magnetickej indukčii B . Keď sa jedná o relatívne slabé magnetické polia, čiže elektróny sa nepohybujú relativistickými rýchlosťami, nazýva sa táto emisia cyklotrónová a má monochromatické spektrum.

Frekvenciu cyklotrónového žiarenia určíme z jednoduchej úvahy, Lorentzova sila pôsobí na elektrón ako sila dostredivá, teda: $vBe = m_e v^2/r$, po elementárnej úprave dostaneme vzťah pre frekvenciu (ν) cyklotrónového žiarenia, kde e je elementárny náboj a m_e je hmotnosť elektrónu

$$\nu_c = \frac{Be}{2\pi m_e}. \quad (2.9)$$

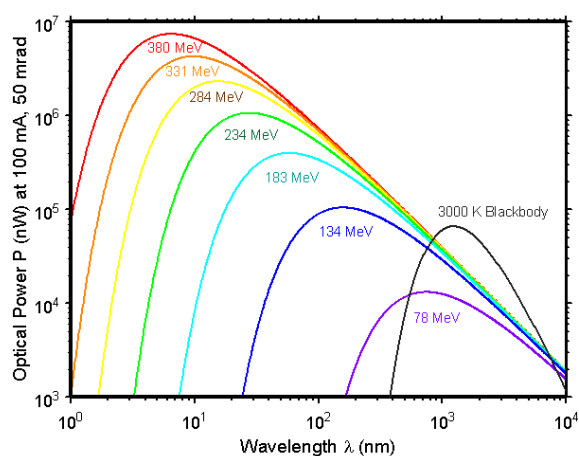
Vo vesmíre existujú objekty s tak obrovskými, doslova "brutálnymi" intenzitami magnetického poľa, že sa v nich elektróny pohybujú relativistickými rýchlosťami. Tento druh emisie sa nazýva synchrotrónovou emisiou. Spektrum synchrotrónovej emisie je spojené v dôsledku relativistických efektov, ktoré extrémne rozširujú spektrálne čiary. Frekvencia synchrotrónového žiarenia (ν_s) je zmenená Lorentzovým faktorom

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (2.10)$$

potom pre frekvenciu synchrotrónového žiarenia platí

$$\nu_s = \gamma^2 \nu_c. \quad (2.11)$$

2. X-ray a gama astronómia



Obr. 2.3: Porovnanie synchrotrónového spektra a blackbody spektra v logaritmickú škále, obrázok pochádza z laboratórií NIST. [23]

Synchrotrónové spektrum je mocninové (obr. 2.3), pretože rozdelenie energií elektrónov má mocninový charakter. Energia elektrónov závisí na ich rýchlosti a ich rýchlosť závisí na intenzite magnetického poľa. Čím silnejšie magnetické pole kozmický objekt má, tým viac bude maximum synchrotrónovej emisie posunuté ku kratším vlnovým dĺžkam.



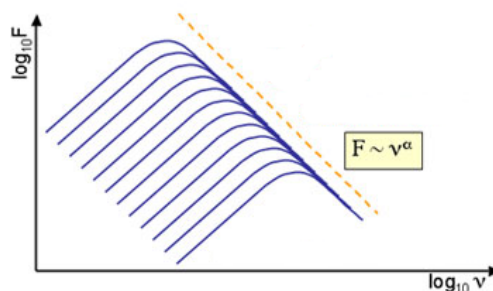
Obr. 2.4: Jet z galaxie M87 v Panne, spôsobuje ho obrovská, supermasívna čierna diera v centre galaxie, jet má viac ako 100 000 ly. [24]

Veľké množstvo objektov vo vesmíre má jety, ale tie sú v skutočnosti veľmi úzke, jedná sa o kužel (obr. 2.4), ktorého vrchol zvierá uhol $2/\gamma$. Len v malom množstve prípadov máme to šťastie a dotyčný objekt mieri svojim jetom na nás, prípadne ním na nás namieri len z času na čas. Keď sa tak stane, môžeme pozorovať zmeny jasnosti a tzv. farebné zmeny v jete, spôsobené pravdepodobne

rôznymi hustotnými zmenami v materiále akrečného disku, ktorý dopadá na zdroj silného magnetického poľa. Zdrojom tohoto magnetického poľa môže byť neutrónová hviezda (pulzary, magnetary) alebo čierna diera, či supermasívna čierna diera v jadre galaxie, či kvasaru. V prípade, že na nás kvasar mieri jetom, hovoríme o tzv. blazare.

2.2.1 Power-Law spektrum

Výsledné spektrum synchrónrónovej emisie je sumou spektier jednotlivých elektrónov, pohybujúcich sa v magnetickom poli po špirále. Každý elektrón emituje žiarenie a dá sa ukázať, že najviac okolo tzv. kritickej frekvencie ν_0 . Ako môžeme vidieť na obr.(2.5), príspevky od jednotlivých elektrónov nakoniec vytvoria spektrum, v ktorom v logaritmickej škále pozorujeme klesajúcu priamku tzv. power-law spektrum.



Obr. 2.5: Power-law spektrum, na vodorovnej osi je frekvencia v logaritmickej škále a na zvislej osi je intenzita v logaritmickej škále

Už keď boli prvýkrát pozorované spektrá rentgenových zdrojov, najmä AGN³, ukázali sa byť hladké, bez spektrálnych čiar a ich pozorované časti dobre odpovedali vzťahu

$$P_\nu \propto \nu^{-\alpha} \propto \lambda^\alpha. \quad (2.12)$$

Pokles intenzity s narastajúcou frekvenciou ν je závislý na tzv. spektrálnom indexe α , kde $\alpha \simeq 1$. Spektrálny index α charakterizuje daný objekt a pre rôzne kategórie kozmických zdrojov vysokých energií má charakteristické hodnoty (tabuľka 2.1). Podľa tvaru power-law spektra sa dá určiť, o aký objekt sa presne jedná a určiť niektoré jeho charakteristiky. Tieto metódy sa využívajú najmä v rádio-astronómii.

2.3 Comptonov a inverzný Comptonov jav

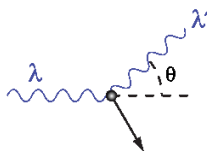
Pri interakcii rentgenových fotónov s elektrónmi z okolia dochádza k tzv. Comptonovmu javu, kedy vysokoenergetický fotón odovzdá časť svojej energie elektrónu s ktorým sa "zrazí". V spektre budeme potom pozorovať jednak fotóny pôvodnej

³AGN - Active Galactic Nuclei, aktívne galaktické jadro

objekt	α
rádio galaxie	≈ -0.7
pulsari	$-3 < \alpha < -2$
AGN	$-1 < \alpha < +1$

Tabuľka 2.1: Charakteristické hodnoty spektrálneho indexu α pre rôzne druhy objektov.

vlnovej dĺžky a potom fotóny väčšej vlnovej dĺžky, ktoré odovzdali časť svojej energie elektrónom. Zmena vlnovej dĺžky fotónu závisí na uhle rozptylu θ , ako je vidieť na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Comptonov jav

Zmena vlnovej dĺžky $\Delta\lambda$ je popísaná rovnicou (2.13), kde $\Delta\lambda$ je rozdiel vlnových dĺžok medzi koncovou λ_f vlnovou dĺžkou a počiatočnou λ_i . Člen $h/m_e c$ sa nazýva Comptonova vlnová dĺžka, je to charakteristická zmena vlnovej dĺžky a jej hodnota je $\lambda_c = 0.00243$ nm:

$$\Delta\lambda = \lambda_f - \lambda_i = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta). \quad (2.13)$$

V praxi to znamená, že pri Comptonovom efekte dopadajúce rentgenové žiarenie urýchľuje elektróny a samotné fotóny tohoto žiarenia svoju energiu strácajú.

V spektre rentgenových a gama zdrojov sa obyčajne výrazne prejavuje jav opačný ku Comptonovmu javu, tzv. inverzný Comptonov jav, pri ktorom relativistické elektróny odovzdávajú svoju energiu fotónom. Elektróny sú týmto mechanizmom "ochladzované" a preto sa predpokladá, že v takýchto miestach nemôžu dosiahnuť vyšších teplôt ako 10^{12} K.

Synchrotrónová emisia produkuje fotóny, ktoré sa rozptyľujú na okolitých elektrónoch a takto urýchlené elektróny produkujú ďalšie fotóny, toto však nepokračuje donekonečna, ale s nástupom inverzného Comptonovho javu sa systém stabilizuje.

2.4 511 KeV

Niektoré vysokoenergetické zdroje emitujú veľké množstvo energie v podobe fotónov o energii 511 KeV. Jedná sa o anihiláciu elektrónu a pozitronu. Táto môže

dopadnúť viacerými spôsobmi, ktoré závisia najmä na kinetickej energii interagujúcej dvojice častíc. Najčastejší záver je vyžiarenie dvoch gama fotónov.²

2.5 Kto ako svieti?

Pri identifikácii rentgenových a gama zdrojov sa stáva, že nepoznáme druh objektu ktorého presnú polohu je potrebné identifikovať. Pri rôznych druhoch objektov je rôzny spôsob emisie a dôvod, prečo svietia v krátkych vlnových dĺžkach. V prípade, ak sa jedná o AGN, je pravdepodobný výskyt jetu; ten svieti z dôvodu kombinácie synchrotrónovej emisie a Comptonovho a inverzného Comptonovho javu. To je dobré si uvedomiť, ak sa pozeráme priamo do jetu, ako tomu je napríklad pri známom OJ 287. Samozrejme dodatočným a veľmi silným zdrojom je tiež termálna emisia z akrečného disku, ktorého najteplejšie časti, ktoré sú najbližšie k centrálnej supermasívnej čiernej diere, svietia v rentgene až v gama. Spôsobuje to extrémne zahriatie materiálu v disku v dôsledku turbulentných prúdov a slapových síl.

Pri ostatných druhoch objektov sa jedná prevažne o termálnu emisiu z akrečného disku. Tejto problematike sa budem bližšie venovať v nasledujúcej kapitole.

2.6 Farebné indexy

Najlepším spôsobom ako sa o kozmickom objekte niečo dozvedieť je získať jeho spektrum, ak to je možné, v čo najväčšom¹ rozsahu vlnových dĺžok. Avšak získať kvalitné spektrum objektov s relatívne malou jasnosťou nie je vôbec jednoduché, je to doménou veľkých ďalekohľadov.

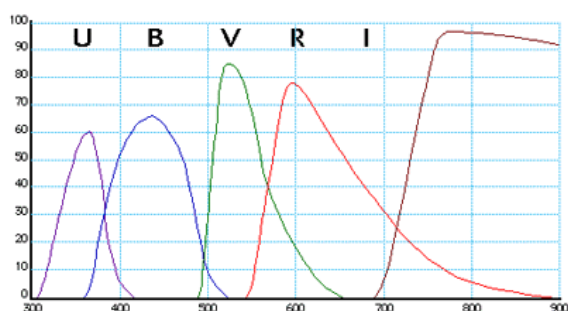
Ak sa chce astronóm bez spektrografu dozvedieť niečo zaujímavé o danom objekte, nutne musí využívať metódy astronomickej fotometrie a teda zisťovať intenzitu daného objektu v rôznych fotometrických farbách (filtroch) v čase. V astronomickej praxi sa používajú rôzne skupiny filtrov. Jeden z najstarších a veľmi rozšírených systémov je Morganov & Johnsonov systém UB_V [13], ktorý bol neskôr rozšírený o filtre R a I na systém UB_VR_I a ešte doplnený o filtre v blízkej IR oblasti J, K, L, ktorých maximálna priepustnosť sú v miestach spektra, ktoré sú minimálne postihnuté spektrálnymi pásmi vodnej pary.

Rozšírený UB_V systém je najpoužívanejším fotometrickým systémom na svete, v tabuľke je stručne uvedené maximum priepustnosti jednotlivých filtrov.

²Pri anihilácii elektrónu s pozitronom platí niekoľko zákonov. Zákon zachovania náboja, celkový náboj pred a po procese je nula. Zákon zachovania hybnosti a celkovej energie, preto nemôže vzniknúť len jeden fotón. Zákon zachovania uhlového momentu, čo znamená, že trajektórie vzniknutých fotónov zvierajú rovnaký uhol ako trajektórie elektrónu a pozitronu.

¹V poslednej dobe sa stali bežnými multispektrálne prehliadky napr. blazarov, kedy sa získava spektrum a pozorujú svetelné zmeny takmer v celom spektre vlnových dĺžok od rádiovkej až po gama oblasť

2. X-ray a gama astronómia



Obr. 2.7: Systém fotometrických filtrov UBVRI, na zvislej osi je priepustnosť v percentách a na vodorovnej vlnová dĺžka v nm.

filter	max priepustnosť
U	365 nm
B	440 nm
V	545 nm
R	700 nm
I	900 nm
J	1250 nm
K	2200 nm
L	3400 nm

Tabuľka 2.2: Zoznam filtrov a maximum ich priepustnosti v nm.

Vzťah medzi hviezdnu veľkosťou pozorovaného objektu v danom filtri a jeho žiarivým tokom $F(\lambda)$ závisí na niekoľkých parametroch. Najmä na funkcií $S(\lambda)$ popisujúcej citlivosť detektora, odrazivosť zrkadiel teleskopu a predovšetkým spektrálnu priepustnosť filtra. Pre filter napr. R je výsledná hviezdna veľkosť rovna

$$R = R_0 - 2.5 \log_{10} \int_0^{\infty} F(\lambda) S_R(\lambda) d\lambda + C_R, \quad (2.14)$$

kde C_R je konštanta. Pre každý filter je táto konštanta navrhnutá² tak, aby hviezda Vega (α Lyrae) mala v každom z filtrov nultú hviezdnu veľkosť.

Porovnaním farebných indexov hviezd dokážeme približne určiť ich povrchovú teplotu. Štandardne sa používajú farebné indexy $U - B$ a $B - V$. V konkrétnom prípade zvolíme experimentálnu hviezdu s indexmi: $U - B = -1.19$ a $B - V = -0.33$. Veľká záporná hodnota indexu $U - B$ indikuje, že hviezda je nápadne jasnejšia v UV oblasti. A skutočne, tieto farebné indexy patria hviezde s povrchovou teplotou 42 000 K. S Wienovho posunovacieho zákona (2.8) je možné jednoducho určiť, že maximálna emisia bude na 69 nm, čo je UV oblasť elmag. spektra.

²Neskôr bol systém upravený aby hviezdnu veľkosť 0 mag mala hviezda spektrálnej triedy A0 s $T_{\text{ef}} \sim 10000$ K

2. X-ray a gama astronómia

Kozmické objekty svietiace ako absolútne čierne teleso (predovšetkým hviezdy) majú maximum svojej emisie posunuté tým viac ku kratším vlnovým dĺžkam, čím majú vyššiu teplotu. O tom hovorí známy Wienov posunovací zákon (2.8). Na obrázku obr.(2.8) sú zobrazené blackbody spektrá rôzne teplých objektov a v nasledujúcej tabuľke nájdeme ich farebné indexy.

Teplota [K]	$U - B$	$B - V$	$V - R$
2500	1.90	1.57	1.18
5000	0.45	0.21	-0.08
7500	-0.03	-0.23	-0.47
10000	-0.26	-0.44	-0.66
15000	-0.48	-0.63	-0.82
20000	-0.58	-0.72	-0.90
25000	-0.63	-0.77	-0.94
35000	-0.69	-0.82	-0.99
52000	-0.73	-0.86	-1.02

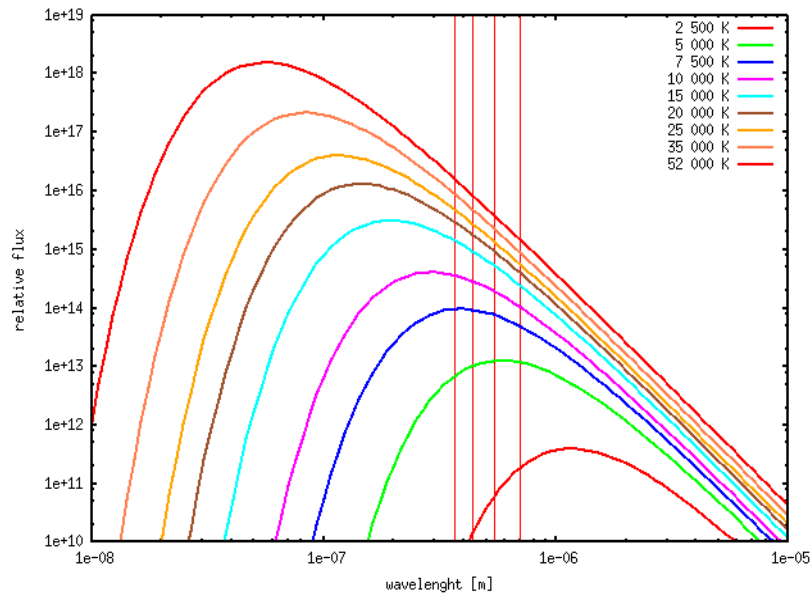
Tabuľka 2.3: Farebné indexy pre rôzne horúce hviezdy.

Hodnoty sú počítané pre ideálny prípad, bez atmosféry a 100% priepustnosť filtrov bola braná len v bode maxima ich priepustnosti, v ostatných miestach je nulová. Z tabuľky je zrejmé, že objekt s teplotou 2500 K bude najmenej jasný v U , jasnejší v B , ešte jasnejší vo viditeľnej oblasti V a najjasnejší v červenej oblasti – filter R . Naopak teleso s teplotou 35000 K bude najjasnejšie v U filtri a najslabšie v R . V tomto prípade sú všetky tri farebné indexy záporné, pretože platí, že teleso je menej jasné vo farbe ktorú "odčítame"³. Takto vychádza hodnota farebného indexu záporná, ak je hviezda jasnejšia v krátkovlnnejšom filtri a kladná, ak je jasnejšia v dlhovlnnejšom. Praktické využitie farebných indexov je najlepšie vidieť pri telese s povrchovou teplotou 5000 K. Z $U - B$ vidieť, že je jasnejšie v B a z $B - V$ dokonca, že vo V je ešte jasnejšie, ale už $V - R$ má kladnú hodnotu, teda maximum emisie je niekde medzi V a R . Keby sme povrchovú teplotu nepoznali, mohli by sme ju jednoducho odhadnúť z Wienovho posunovacieho zákona (2.8) a určite by sme odhadli číslo okolo 5000 K.

Skúmaný objekt nemusí nutne žiariť termálnou emisiou, ale môže vyžarovať netermálne. Potom je charakter spektra popísaný tzv. power-law (2.12) krivkou. Takýmito objektami sú napr. blazary. Power-law spektrum je charakterizované spektrálnym indexom α , ktorý pre danú kategóriu objektov nadobúda konkrétny rozsah hodnôt. V nasledujúcej tabuľke sú hodnoty farebných indexov pre niektoré α . Na obr.(2.9) sú zobrazené priebehy spektier z tabuľky. Pri identifikácii rentgenových zdrojov nás zaujímajú len tie objekty, ktoré môžeme pomocou farebných indexov

³Pozor, hviezdna veľkosť je logaritmickej funkcia definovaná tak, že tzv. magnitúda jasnejšej hviezdy je nižšie číslo ako hviezdy slabšej! napr. Deneb (α Cyg) má vo V 1.25mag a Achernar (α Eri) je 2-krát jasnejšia hviezda s hviezdovou veľkosťou vo V 0.5mag. Viac v [7] str.:78-90

2. X-ray a gama astronómia



Obr. 2.8: Niekoľko blackbody spektier v logaritmickej škále, zvislé čiary symbolizujú maximá priepustnosti filtrov, zľava: U , B , V , R . Na zvislej osi je relatívna intenzita zdrojov, na vodorovnej je vlnová dĺžka v metroch.

odhaliť, a to sú práve tie, ktoré majú spektrálny index α záporný. Potom sa tieto objekty javia ako horúce modré hviezdy, výrazne odlišné od bežných hviezd a takto prezrádzajú, že sú podozrivé.

α	$U - B$	$B - V$	$V - R$
-0.1	-0.02	-0.02	-0.03
-0.5	-0.10	-0.12	-0.14
-1.0	-0.20	-0.23	-0.27
-1.5	-0.30	-0.35	-0.41
-2.0	-0.41	-0.46	-0.54
-2.5	-0.51	-0.58	-0.68
-3.0	-0.61	-0.70	-0.82

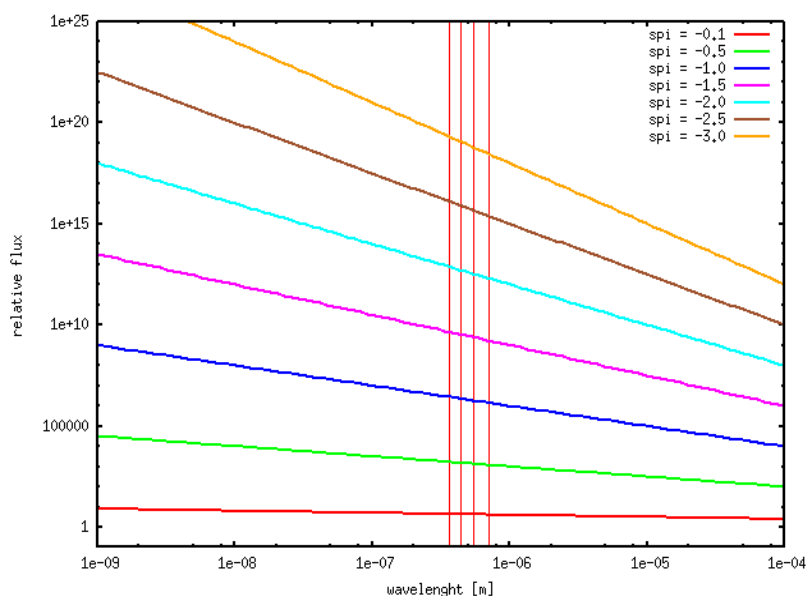
Tabuľka 2.4: Farebné indexy pre objekty s rôznym spektrálnym indexom α .

Z obrázku (obr. 2.9) je vidieť, že hodnoty farebných indexov závisia na sklone power-law spektra. Čím je hodnota α menšia ako 0, tým sa javí objekt modrejší (teplejší). V reálnom svete je power-law spektrum možné popísať priamkou len na malej časti spektra a celkový popis býva veľmi zložitý.

Je na mieste otázka, či je možné pomocou farebných indexov rozlíšiť, či sa jedná o objekt sviaci termálnou, alebo netermálnou emisiou. V ideálnom prí-

2. X-ray a gama astronómia

pade, pri vynesení hodnôt farebných indexov do grafu v logaritmickej škále, dostávame pre termálnu emisiu krivku, ale pre netermálnu emisiu priamku. Samozrejme všetky rentgenové a gama zdroje vo vesmíre sa od ideálneho prípadu odlišujú, ich spektrum je kombináciou termálnej a netermálnej emisie, zahŕňajúce ešte množstvo ďalších efektov.



Obr. 2.9: Power-law spektrá zdrojov s rôznymi hodnotami spektrálneho indexu α , zvislé čiary symbolizujú maximá priepustnosti filtrov, zľava: *U*, *B*, *V*, *R*. Na zvislej osi je relatívna intenzita zdrojov v jednotkovej vzdialenosti, na vodorovnej je vlnová dĺžka v metroch.

Farebné indexy priamo informujú o povrchovej teplote objektu, čo sa veľmi hodí pri identifikácii rentgenových a gama zdrojov. Predpokladáme, že hľadaný zdroj je odlišný od obyčajných hviezd najmä tým, že je výrazne teplejší. Objavuje sa však niekoľko problémov. Veľkou prekážkou pri určovaní farebných indexov (farby) kozmických objektov je zemská atmosféra, kde v dôsledku Rayleighov rozptylu⁴ dochádza k "odmodraniu" svetla kozmických objektov a preto sa nám objekty nižšie na oblohe javia červenšie.⁵ Druhým problémom je tzv. medzihviezdna extinkcia, tiež známa pod pojmom medzihviezdne zčervenanie. Kozmický priestor, najmä medzi hviezdami v rovine galaxie, nie je vôbec prázdny ale je riedko vyplnený plynom a prachom. Na čistočkách tohto prachu dochádza k rozptylu svetla kratších vlnových dĺžok; z tohoto dôvodu sa nám hviezdy v blízkosti roviny gala-

⁴V zemskej atmosfére sa najviac rozptyľuje modré svetlo, pretože jeho vlnová dĺžka je porovnateľná s rozmermi prekážok, na ktorých sa rozptyľuje, jedná sa o náhodné zhluky rôznych molekúl vo vzduchu. Práve preto je obloha modrá.

⁵Najlepším príkladom je Slnko pri západe, alebo východe, kedy jeho lúče prechádzajú cez najväčšiu masu atmosféry a preto sa javí výrazne načervenalé.

xie javia mierne červenšie. Podobne je tomu aj pri pozorovaní extragalaktických objektov, kde k "odmodrávaníu" svetla dochádza v medzigalaktickom médiu, čo je v skutočnosti veľmi riedky horúci plyn, ale keďže svetlo prekonáva obrovské vzdialenosti, tento efekt môže byť predsa len patrný. Ďalším efektom, ktorý môže spôsobiť, že sa v skutočnosti horúci kozmický objekt svietiaci v krátkych vlnových dĺžkach bude javiť chladnejší, je tzv. červený posuv. Prejavuje sa najmä pri veľmi vzdialených galaxiách, kde môže byť vplyvom Dopplerovho posuvu posunutá blízka UV oblasť až do červenej oblasti spektra.

Všetky spomínané efekty môžu prekaziť identifikáciu rentgenového zdroja, ktorý je v skutočnosti oveľa teplejší ako okolité hviezdy premietajúce sa do jeho susedstva na oblohe. Našťastie astronómovia disponujú niekoľkými odlišnými metódami ako podozrivé objekty odhaliť. Týmto metódam sa budeme postupne venovať v nasledujúcich kapitolách.

2.7 INTEGRAL

INTEGRAL je kozmický d'alekohľad určený pre pozorovanie v rentgenovej a gama oblasti spektra patriaci ESA. Na obežnú dráhu okolo Zeme ho vyniesla ruská nosná raketa Proton-DM2 z kozmodrómu Bajkonur 17. októbra 2002. Nachádza sa na eliptickej obežnej dráhe s perigeom 9000 km a apogeom 153000 km. Jeden obchod mu trvá 72 hodín.



Obr. 2.10: INTEGRAL, International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, ESA [25]

INTEGRAL sa venuje prehliadkam oblohy vo vysokých energiách (10KeV-10MeV), výskumu vysokoenergetických zdrojov a detekcii GRB ⁶. Nesie na palube niekoľko vedeckých zariadení:

- IBIS/ISGRI (Imager on Board the INTEGRAL Satellite) pozoruje v rozsahu energií 15KeV až 10MeV, matematicky spracovaný obraz má uhlové rozlíšenie menej ako jednu minútu,

⁶GRB - Gamma Ray Burst, jedná sa o najenergetickejší fenomén vo vesmíre, keď sa za zlomok sekundy až pár sekúnd uvoľní nesmierne množstvo energie.

2. X-ray a gama astronómia

- SPI (SPectrometer for INTEGRAL) je hlavným spektrometrom, operuje v rozsahu energií 20KeV až 8MeV,
- JEM-X je dvojitý spektrograf operujúci v rozsahu energií 3KeV až 35KeV,
- OMC je CCD kamera operujúca vo viditeľnej oblasti spektra,
- IREM (INTEGRAL Radiation Environment Monitor) je zariadenie na monitorovanie radiácie.

Rentgenové a gama zdroje skúmané v tejto práci pochádzajú z prehliadok oblohy misiou INTEGRAL.

Ďalším veľmi úspešným vesmírnym ďalekohľadom pozorujúcim na extrémne krátkych vlnových dĺžkach je SWIFT patriaci NASA. Na obežnú dráhu okolo Zeme ho vyniesla nosná raketa Delta II, 20. novembra 2004. Jeho hlavnou misiou je detekcia a lokalizácia zábleskov žiarenia gama (GRB).

V rentgenovej oblasti pracujú ešte kozmické ďalekohľady Chandra (NASA), XMM-Newton (ESA). Veľkým prínosom boli dnes už nepracujúce zariadenia: Beppo-SAX a Compton Gamma Ray Observatory.

Typy objektov

V problematike identifikácie rentgenových a gama zdrojov sa stretávame so zaujímavou skutočnosťou. Ak nepoznáme fyzikálnu podstatu objektu, ktorého poloha nie je presne určená, môže ísť o široké spektrum objektov galaktických, ale aj extragalaktických. Môžeme typ objektu odhaliť už zo spektra vo vysokých energiách, ale nie je to pravidlom. Ak sa neznámy objekt nachádza blízko galaktickej roviny, je veľmi pravdepodobné, že pochádza z našej Galaxie a naopak, ak sa nachádza v blízkosti galaktického pólu, pravdepodobne ide o nejaký druh AGN.

3.1 Galaktické objekty

Medzi galaktické objekty svietiace vo vysokých energiách patria buď pozostatky po masívnych hviezdach: čierne diery a neutrónové hviezdy, prípadne kataklizmatické premenné hviezdy či Be hviezdy. Stručne charakterizujeme tieto objekty.

- Hviezdne čierne diery (black holes) sú kozmické objekty vzniknuté z gravitačne zrúteného jadra masívnej hviezdy, ktorej hmotnosť v záverečných štádiách vývoja prevyšovala $3M_{\odot}$. Samotná čierna diera je len ťažko odhaliteľná, ale ak sa nachádza v miestach s veľkým množstvom medzihviezdnej látky, môže sa okolo nej vytvoriť akrečný disk. Natol'ko hustý medzihviezdny materiál sa nachádza len v galaktickom centre, kde sa aj niekoľko takýchto objektov pozoruje.
- LMXB (Low Mass X-ray binary) sú častejším z dvojice typov rentgenových dvojhviezdnych systémov. Málo hmotná (low mass) sekundárna zložka patrí medzi hviezdy neskorých spektrálnych tried s typickou hmotnosťou menšou ako $2M_{\odot}$. Primárnou zložkou je neutrónová hviezda, ojedinele hviezdna čierna diera. Primárna zložka obieha blízko sekundárnej, pretože hviezdy

3. Typy objektov

neskorších spektrálnych tried sú pomerne malé. Dochádza k prenosu látky zo sekundárnej na primárnu zložku, vytvára sa akrečný disk. Až štvrtina zo všetkých známych LMXB sa nachádza v guľových hviezdokopách, kde je vyššia pravdepodobnosť vzniku binárneho systému zachytením neutrónovej hviezdy.

- HMXB (High Mass X-ray binary) sú rentgenové dvojviezdy, kde sekundárnu zložku tvorí hmotná hviezda, obor alebo nadobor spektrálneho typu O alebo B. Hviezda nemusí nutne vyplňať svoj Rocheov lalok, pretože takto hmotné hviezdy majú dostatočne silný hviezdny vietor, aby materiál ním nesený vytvoril okolo primárnej zložky akrečný disk. Orbitálne periódy HMXB sú dlhšie ako u LMXB, pretože sekundárne zložky systému sú oveľa väčšie hviezdy. HMXB sa nachádzajú v galaktickej rovine, kde je dostatok materiálu, aby tu vznikli masívne hviezdy. Je pravdepodobné, že HMXB sú v skutočnosti neskoré štádiá vývoja binárnych systémov pozostávajúcich z hmotných hviezd, kde sekundárna zložka prežila explóziu primárnej zložky, s tým aby supernova. Primárnou zložkou sa tak stala neutrónová hviezda, prípadne hviezdna čierna diera. Asi najznámejšou HMXB je vôbec prvá potvrdená čierna diera Cygnus-X1.
- Kataklyzmatické premenné hviezdy (CV – Cataclysmic Variables) jedná sa o binárne systémy, kde je primárnou zložkou biely trpaslík, okolo ktorého sa vytvára akrečný disk svietiaci v UV až v rentgene. Hmota dopadajúca na povrch bieleho trpaslíka zvyšuje jeho hmotnosť a dochádza k zapáleniu termonukleárných reakcií v jeho horných vrstvách. Nasleduje explózia a vyvrhnutie časti materiálu. Keď hmotnosť bieleho trpaslíka prekročí Chandrasekharovu medzu ¹, tiaž vrchných vrstiev prekoná tlak degenerovaného elektrónového plynu a hviezda vybuchne ako supernova; podľa okolností a chemického zloženia ako supernova typu Ia, Ib, alebo Ic. CV sa dajú na oblohe pomerne ľahko objaviť, vďaka akrečnému disku sa javia ako horúce modré hviezdy. Medzi CV patria novy, rekurentné novy a supernovy. V astronómii je obvyčajne zložitý vymedziť presne kategórie objektov a tak je tomu aj pri tzv. rentgenových binárnych systémoch, kde vlastne neexistujú presné hranice medzi CV, HMXB a LMXB. Jedná sa o objekty, ktoré sú skúmané v rentgenovej a gama oblasti spektra len pár desiatok rokov, preto ešte samotná nomenklatúra týchto objektov nie je jednoznačná a nemusí korešpondovať s nomenklatúrou premenných hviezd v optickej oblasti.
- Be hviezdy sú hviezdy hlavnej postupnosti spektrálnej triedy B s markantnými vodíkovými emisnými čiarami. Nezriedka je u nich pozorovaná rentgenová emisia, ktorá môže mať viacero príčin. Charakter rentgenovej emisie je termálny. Môže ísť napr. o interakciu masívneho hviezdneho vetra s horúcim plynom v hviezdnej koróne.

¹Je maximálna možná hmotnosť bieleho trpaslíka, tj. $1.44 M_{\odot}$

3.2 Extragalaktické objekty

Extragalaktické rentgenové a gama zdroje môžeme rozdeliť do dvoch kategórií. Jednou sú aktívne galaktické jadrá (AGN) a druhou záblesky žiarenia gama (GRB). Pri fenoméne GRB sa za krátky čas uvoľní obrovské množstvo energie. V optickej oblasti spektra pohasínajú v ráde minút až hodín. Optická emisia sa nepozoruje pri každom GRB. Z týchto dôvodov sa ich identifikácii² v tejto práci nevenujem. Klasifikovať AGN nie je vôbec jednoduché a ani to nie je cieľom tejto práce, preto uvediem len jednoduchú klasifikáciu v tabuľke (3.1), aby bolo jasné, s akými objektmi máme dočinenia.

Trieda	Pod-trieda	Popis
Seyfertove galaxie	Typ I	Široké aj úzke emisné čiary, slabá rádiová emisia, rentgenová emisia, špirálové galaxie, zmeny jasnosti
	Typ II	Len úzke emisné čiary, slabá rádiová emisia, slabá rentgenová emisia, špirálové galaxie, nepremenné
Kvasary	Radio-loud (QSR)	Široké aj úzke emisné čiary, silná rádiová emisia, žiarenie polarizované, zmeny jasnosti
	Radio-quiet (QSO)	Široké aj úzke emisné čiary, slabá rádiová emisia, žiarenie slabo polarizované, zmeny jasnosti
Rádiové galaxie	BLRG	Široké aj úzke emisné čiary, silná rádiová emisia, žiarenie slabo polarizované, eliptické galaxie, zmeny jasnosti
	NLRG	Iba úzke emisné čiary, silná rádiová emisia, žiarenie nie je polarizované, eliptické galaxie, bez zmien jasnosti
Blazary	BL Lac	Skoro bez emisných čiar, silná rádiová emisia, žiarenie silne polarizované, rapídne zmeny jasnosti
	OVV kvasary	Široké aj úzke emisné čiary, silná rádiová emisia, žiarenie silne polarizované, rapídne zmeny jasnosti, oveľa jasnejšie ako BL Lac
ULIRG		Kvasary zahalené prachom, starburst fenomény
LINER		Podobné málo svietivým Seyfert II galaxiám, špirálové galaxie, starburst fenomény, HII oblasti

Tabuľka 3.1: Veľmi stručná klasifikácia AGN. Samotná klasifikácia je výborne popísaná v [2] str.:1085-1141.

Skrátené názvy objektov v tabuľke (3.1): ULIRG - ULtraluminous InfraRed Galaxies, LINER - Low Ionization Nuclear Emission-line Regions.

²Jediným možným spôsobom identifikácie GRB je hľadanie optického náprotivku na súradniciach určených špecializovanou družicou (Swift, INTEGRAL) porovnaním získaných snímok s katalógom, alebo DSS - Digitalized Sky Survey [26]

Pozorované objekty

Jednou z najdôležitejších častí tejto práce bolo vhodne zvolit' pozorované objekty. Tie som vyberal z online katalogu na stránkach ISDC¹, konkrétne na internetovej adrese <http://isdc.unige.ch/~rodrigue/html/igrsources.html>. Jedná sa o webovú stránku na ktorej sa objavujú polohy a informácie o najnovších zdrojoch z misie INTEGRAL.

4.1 Pozorovacia aparátúra

Na pozorovanie som využíval ďalekohľad patriaci Ústavu teoretickej fyziky a astrofyziky Prírodovedeckej fakulty Masarykovej univerzity na Kravej hore, Montebello observatory[28] MPC kód 616. Univerzitná pozorovateľňa je vybavená 62cm zrkadlovým teleskopom na vidlicovej paralaktickej montáži. V Newtonovom ohnisku sa nachádza CCD kamera ST-8 s čipom KAF-1600 vyrobená spoločnosťou Santa Barbara Instruments Group. Ohnisková vzdialenosť ďalekohľadu je 2.78m pri svetelnosti 1:4.5. V takejto konfigurácii je zorné pole kamery približne 17.0' × 11.3', na jeden pixel pripadá 0.68". Počas môjho pozorovania som na kamere využíval binnig 3, čo znamená, že vyčítacia elektronika kamery zlúči náboj v matici 3×3 px a vytvorí z nich jeden. Normálne rozlíšenie kamery (v mode binning 1) je 1530×1020 px, v mojom prípade to bolo 510×340 px. Kamera je vybavená filtermi Johnson-Cousinsovho systému *BVRI*.

Čip KAF-1600 je výrobkom spoločnosti KODAK. Jedná sa o starší model s priemernou kvantovou účinnosťou² okolo 30%. Kvantová účinnosť je pre rôzne

¹ISDC - INTEGRAL Science Data Center

²Kvantová účinnosť - číslo charakterizujúce percento fotónov, ktoré je kamera schopná premeniť na elektrický signál

vlnové dĺžky iná, je popísaná grafom kvantovej účinnosti čipu, ktorý dodáva výrobca. Čip v kamere na Monteboo observatory je najviac citlivý v červenej a blízkej infračervenej oblasti, teda vo filtroch *R* a *I*. Naopak je veľmi málo citlivý v oblasti filtrov *U* a *B*. Z toho dôvodu som pozoroval prevažne vo filtroch *V*, *R*, kde je citlivosť kamery dostatočná.

K pozorovaniu som tiež využíval 40cm zrkadlový ďalekohľad patriaci Hvezdární a Planetáriu M. Koperníka v Brne, na ktorom bola osadená CCD kamera ST-7, taktiež vybavená filtermi Johnson-Cousinsovho systému *BVRI*. Nanešťastie táto kamera začiatkom zimy 2006 prestala fungovať.

4.2 Software a úprava snímok

Ďalekohľad na Monteboo observatory je plne automatizovaný astronomický prístroj ovládaný pomocou balíka programov *NightView*. O riadenie ďalekohľadu sa stará program *telescope* s grafickým rozhraním *xmove*. Ovládanie CCD kamery je zabezpečené programom *night_control* s grafickým rozhraním *gtnightview*. Tento balík rovnako obsahuje programy pre získavanie flatfieldov³ (*night_flats*) a darkframov⁴ (*night_darks*). Autorom sady programov je Filip Hroch [29], programy sú určené pre operačné systémy postavené na platforme UNIX.

Ďalekohľad patriaci HaP. M. Koperníka bol v dobe môjho pozorovania vybavený komerčným softvérom CCDOPS[30], ktorým sa ovládala kamera. Na ovládanie ďalekohľadu, filtrov a tiež na dávkové expozície sa používal softvér od Ing. Milana Wudiu.

Získané snímky boli štandardne upravované balíkom *munipack*[31]. Od každej snímky bol odčítaný darkframe a potom bola snímka rozdelená flatfieldom. Následne som pomocou aplikácie *muniphot* urobil apertúrnú fotometriu objektov na jednotlivých snímkach a pomocou aplikácie *munimatch* identifikoval a stotožnil jednotlivé hviezdy. Následné spracovanie záviselo na tom, o akú metódu identifikácie, či hľadania zmeny jasnosti išlo.

4.3 Výber objektov

Na samotný výber objektov boli kladené tieto základné požiadavky.

- Deklinácia musela byť kladná a najlepšie väčšia ako 30° , aby bol objekt čo najvyššie na oblohe a jeho svetlo prechádzalo čo najmenšou atmosférickou hmotou⁵.

³Flatfield - tzv. vyrovnávací snímka, ktorou sa podelí snímka oblohy, aby sa čiastočne vyrovnala nehomogénnosť citlivosti čipu a odstránili artefakty, napr. obraz prachu na čipe.

⁴Darkframe - temná snímka, ktorá sa odčíta od snímky oblohy, aby sa odstránil tepelný a vyčítavajúci šum.

⁵Brnenská obloha je znečistená prachom a svetelným smogom, preto sa objekty nízko nad obzorom len ťažko pozorujú.

- Rektascenzia by mala byť taká, aby objekt kulminoval zhruba v polovici pozorovacieho intervalu.
- Pozorovaný objekt by sa nemal nachádzať v blízkosti galaktickej roviny.

Podľa týchto parametrov som na webovej stránke ISDC[27] vybral a pozoroval osem INTEGRALovských zdrojov (tabuľka: 4.2). Jedným z rozhodujúcich faktorov bolo počasie, keď prakticky od polovice novembra 2006 do polovice januára 2007 neboli vhodné pozorovacie podmienky. Počet kandidátov na pozorovanie bol obmedzený, pretože väčšina INTEGRALovských zdrojov sa nachádza na južnej pologuli. Je to spôsobené tým, že družica INTEGRAL pozoruje prevažne v galaktickej rovine a častejšie na záporných deklináciách.

4.4 Pozorovania

Celkovo som pozoroval 15 nocí. Pochopiteľne, nie vždy to boli celé astronomické noci, veľké množstvo pozorovaní bolo nekvalitných, či už kvôli oblačnosti, ktorá počas noci prišla, alebo kvôli blízkej uhlovej vzdialenosti objektu od Mesiaca. Astronómia je veda, v ktorej dokonale napozorované dáta prakticky neexistujú, preto som mal za cieľ napozorovať pokiaľ možno čo najviac dát a tie najkvalitnejšie vybrať na spracovanie. Prehľad nocí a pozorovaných objektov je v nasledujúcej tabuľke (4.1).

Dátum	Objekty
29.9.2006	IGRJ00370+6122
17.10.2006	IGRJ00370+6122, IGRJ00370+6122
10.19.2006	IGRJ01583+6723
15.11.2006	IGRJ00254+6822
30.11.2006	IGRJ00370+6122
25.1.2007	IGRJ00254+6822, IGRJ09253+6929
23.2.2007	IGRJ09253+6929
2.3.2007	IGRJ09253+6929
14.3.2007	IGRJ09253+6929
15.3.2007	IGRJ06253+7334, IGRJ09253+6929, IGRJ16426+6536
16.3.2007	IGRJ06253+7334, IGRJ13091+1107, IGRJ19487+5120
25.3.2007	IGRJ06253+7334
26.3.2007	IGRJ06253+7334, IGRJ13149+4422
27.3.2007	IGRJ13149+4422
2.4.2007	IGRJ06253+7334
11.4.2007	IGRJ06253+7334

Tabuľka 4.1: Pozorovacie noci

4. Pozorované objekty

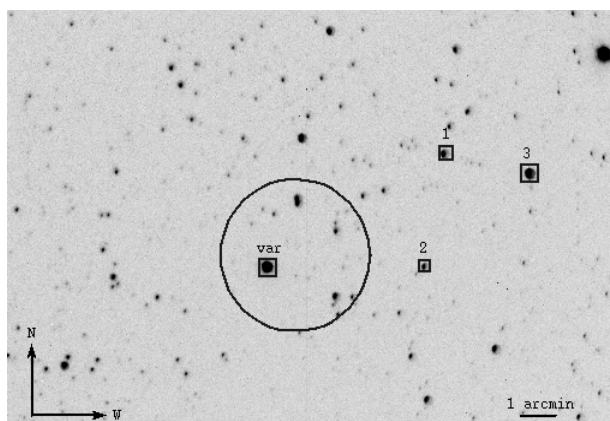
V tabuľke (4.2) je zoznam objektov vybraných na spracovanie, počet pozorovacích nocí a celkový počet snímok v daných filtroch. Všetky tieto dáta sú priložené k práci na DVD disku. Jedná sa o zdroje prevažne z tretej prehliadky INTEGRALU [11].

Objekt	nocí	V	R	I
IGRJ00254+6822	2	30	30	22
IGRJ00370+6122	3	282	284	-
IGRJ01583+6713	1	117	118	-
IGRJ06253+7334	6	237	239	-
IGRJ09253+6929	5	188	230	-
IGRJ13149+4422	2	70	70	-
IGRJ16426+6536	1	26	26	-
IGRJ19487+5120	1	11	11	-

Tabuľka 4.2: Zoznam pozorovaných objektov a počty snímok

4.5 IGRJ00370+6122

IGRJ00370+6122 bol objavený počas hĺbkovej prehliadky regiónu v Kasiopei misiou INTEGRAL. Prehliadka trvala od decembra 2003 do februára 2004, celková expozícia predstavovala 1.6Ms [16],[12].



Obr. 4.1: IGRJ00370+6122 je označený štvorcem s nápisom "var", číslami sú označené porovnávacie hviezdy, kruh v strede je errorbox určenia polohy zdroja družicou INTEGRAL .

Podľa [12] je kandidátom na optický náprotivok rentgenového zdroja hviezda TYC 4016-883-1, s jasnosťou vo filtri $V \sim 9.66$ mag. Jedná sa o hviezdu spektrálnej triedy BN0.5II-III [17]. Hviezda sa nachádza na súradniciach (J2000.0)

4. Pozorované objekty

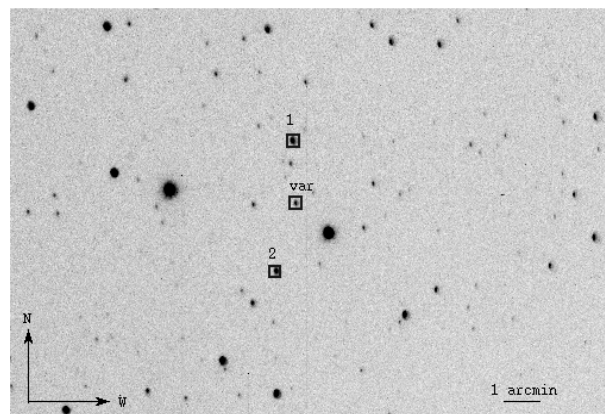
$\alpha = 00 : 37 : 09.6349$, $\delta = +61 : 21 : 36.501$ v súhvezdí Kasiopea.

Kandidát na optický náprotivok IGRJ00370+6122 a periodické zmeny intenzity v rentgene publikované v [12] naznačujú, že sa jedná o HMXB s orbitálnou periódou 15.665 dňa.

Ako porovnávaciu hviezdu som vybral hviezdu na snímke označenú ako 1 a pre kontrolu porovnávačej hviezdy hviezdu označenú ako 2. Hviezda 3 je síce jasnejšia, ale nakoniec nebola vhodná, pretože menila svoju jasnosť.

4.6 IGRJ01583+6713

IGRJ01583+6713 bol objavený misiou INTEGRAL počas pozorovania Cas A oblasti, december 2005 [18]. Podľa [19] sa jedná o "Be/X-ray binary", autori tak usudzujú na základe spektra s nízkym rozlíšením v optickej oblasti získaným na 2.4m MDM teleskope 24.12.2005. Sekundárnou zložkou tohoto systému je Be hviezda, primárnou pravdepodobne neutrónová hviezda. Podľa [18] sa tiež jedná o tzv. "hard X-ray transient", kde dochádza k zákrytom primárnej zložky. Rentgenový



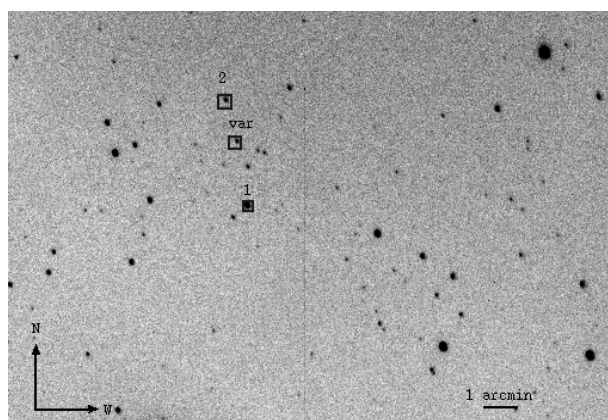
Obr. 4.2: IGRJ01583+6713 je označený štvorcikom s nápisom "var", číslami sú označené porovnávacie hviezdy.

zdroj IGRJ01583+6713 je na obrázku označený štvorčekom s nápisom "var". Jeho skutočná poloha je podľa [19] (J2000.0) $\alpha = 01 : 58 : 18.44$ a $\delta = +67 : 13 : 23.5$. Porovnávacie hviezdy sú na obrázku tiež označené štvorčekom, hlavná porovnávacια hviezda má číslo 1, druhá je označená číslom 2.

4.7 IGRJ06253+7334

Podľa [15] je IGRJ06253+7334 kataklizmatická premenná hviezda identifikovaná s jej optickým náprotivkom 1RXS J062518.2+733433. Jedná sa o hviezdu s jasnosťou v $R \sim 14,3$ mag. Nachádza sa na súradniciach (J2000.0) $\alpha = 06 : 25 : 16.21$ a $\delta = +73 : 34 : 39.6$.

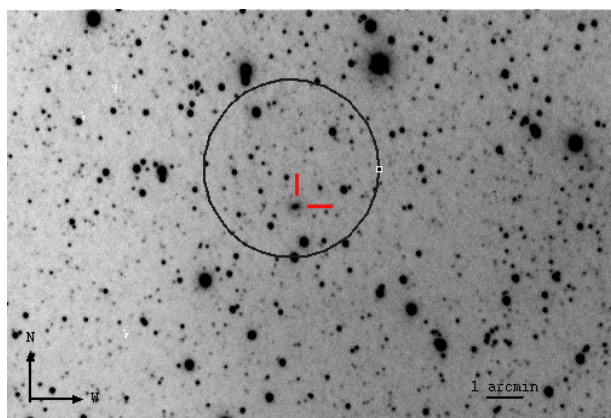
4. Pozorované objekty



Obr. 4.3: IGRJ06253+7334 je označený štvorcem s nápisom "var", číslami sú označené porovnávacie hviezdy.

4.8 IGRJ00254+6822

Podľa [20] je rentgenovým zdrojom galaxia na obrázku 4.4 označená červenými šípkami. Nachádza sa na súradniciach (J2000.0) $\alpha = 00 : 25 : 26.3$ a $\delta = +68 : 22 : 49.5$.



Obr. 4.4: IGRJ00254+6822 je potenciálny zdroj označený červenými šípkami, kruh okolo je errorbox z družice INTEGRAL o rozmeroch 2.4 uhlovej minúty.

Metódy identifikácie

Spôsobov, ako identifikovať podozrivý objekt vo hviezdnom poli, je obrovské množstvo. Zo súboru všetkých možných metód treba vždy vybrať tie, ktoré najviac využívajú vlastnosti objektu, ktorými sa prezrádza. Vo svojej práci sa pokúšam identifikovať rentgenové a gama zdroje. Tieto objekty majú niekoľko spoločných rysov a práve preto som zvolil za metódy identifikácie analýzu šumu, Hertzsprung-Russellov diagram (ďalej len HR diagram) a samozrejme analýzu svetelnej krivky. Ďalším spôsobom, ale už nie natoľko sofistikovaným, je hľadanie extragalaktických objektov na snímke a ich porovnávanie s katalógom. V tejto kapitole sa budem každej z metód venovať dôkladnejšie.

5.1 Analýza šumu

Jednou zo základných metód ako odhaliť podozrivý objekt, potenciálny rentgenový či gama zdroj maskujúci sa medzi hviezdami, je analýza šumu. Z povahy vysokoenergetických kozmických zdrojov vieme, že dôvodom termálnej emisie je obyčajne akrečný disk. V akrečnom disku sa vplyvom trenia zahrieva materiál na obrovské teploty. Netermálna emisia je spôsobená kombináciou synchrotrónového žiarenia, Comptonovho a inverzného Comptonovho javu, ktoré vytvárajú tzv. jet. Fyzika týkajúca sa podstaty akrečných diskov a jetov je veľmi zložitá, ale pre identifikáciu objektov majúcich akrečné disky a jety nám stačí vedieť len jednu vec. Takéto objekty šumia viac ako hviezdy. Pod slovom šumia treba rozumieť, že menia svoju jasnosť na veľmi krátkych časových úsekoch, v ráde sekúnd. Tieto zmeny sú porovnateľné s typickou chybou merania jasnosti CCD kamerou, čo je konkrétne na Monteboo observatory okolo 0.03 mag (pre hviezdu 12 mag). Samozrejme táto chyba je závislá na rôznych faktoroch, ako je jasnosť pozorovaného objektu a jeho výška nad obzorom.

Princíp určenia podozrivého objektu spočíva v porovnaní rozptylu nameraných dát pre kandidáta na rentgenový zdroj a porovnávaciu hviezdu. Na toto je vhodné použiť metódu histogramu, z ktorej je charakter rozptylu okamžite vidieť.

5.1.1 Histogram

Histogram je diagram počtosti umožňujúci porovnať hustoty počtosti s tvarom hustoty pravdepodobnosti vybraného teoretického rozloženia[6]. Konštrukcia histogramu je vzhľadom na to, o aký silný nástroj sa jedná, až prekvapivo jednoduchá. Celý súbor nameraných hodnôt rozdelíme na intervaly, tzv. biny, alebo tiež triedy. Štandardne sú biny ekvidištantné. Počet hodnôt, ktoré spadnú do daného binu, sa nazýva početnosť binu (triedy). Graficky môžeme jednotlivé biny zobrazit' typicky v tvare tyčkového diagramu, ktorého špeciálnym prípadom je histogram.

5.1.2 Mocné Gaussovo rozdelenie

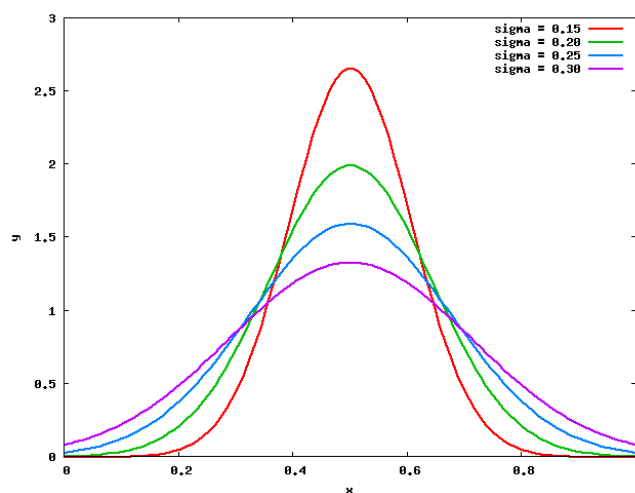
Gaussovo rozdelenie je najdôležitejším rozdelením spojite náhodnej veličiny, dajú sa ním však za istých okolností aproximovať aj niektoré diskkrétne rozdelenia. Všeobecne sa dá povedať, že Gaussovo rozdelenie sa dá použiť všade tam, kde je kolísanie náhodnej veličiny spôsobené súčtom veľkého počtu malých na sebe nezávislých vplyvov[9].

Fluktuácia jasnosti objektu (šum) je spôsobená obrovským množstvom malých príspevkov pochádzajúcich z termálnej a netermálnej emisie, ktorými daný objekt vyžaruje do priestoru elektromagnetické žiarenie. Rozdelenie tohoto šumu je náhodné a teda nutne Gaussovské. Potom môžeme relatívne zastúpenie jednotlivých hodnôt v meranom systéme popísať Gaussovou funkciou

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-x_0)^2/2\sigma^2}, -\infty < x < \infty. \quad (5.1)$$

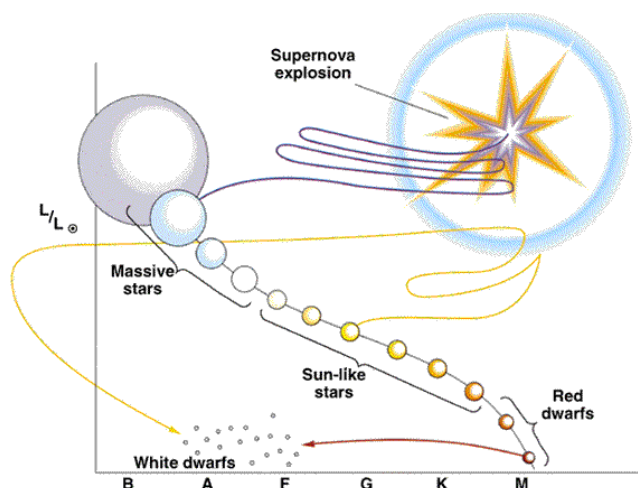
Táto funkcia má dva parametre x_0 a σ^2 , normálne (Gaussove) rozdelenie s týmito parametrami býva tiež označované ako $N(x_0, \sigma^2)$, kde x_0 je stredná hodnota a σ^2 je rozptyl náhodnej veličiny. Gaussova funkcia udáva hustotu pravdepodobnosti normálne rozdelených dát. Funkcia je normovaná, teda celková pravdepodobnosť je 1.

Na obrázku (5.1) sú zobrazené Gaussove krivky s rôznou hodnotou σ . Jednoducho povedané, čím je σ väčšia, tým je väčší rozptyl dát a teda dáta sú viac zašumené. Pri analýze šumu podozrivého objektu hľadáme presne toto. Kvôli vlastnostiam kamery, pozorovacej aparatúry a vplyvom zemskej atmosféry fluktuujú hodnoty jasnosti všetkých objektov na danej snímke, ale veľmi málo, navyše amplitúda týchto zmien je rovnaká pre všetky objekty na snímke. Avšak ak sa jedná o rentgenový či gama zdroj je pravdepodobné, že šumia viac, tento fakt bol overený v práci [14], kde autorka zistila, že rozptyl dát je pre blazary väčší ako pre porovnávaciu hviezdu. Preto je rozumné túto metódu skúsiť na rentgenový zdroj, nie je zaručené, že musí šumieť viac ako hviezdy, ale je to pravdepodobné.

Obr. 5.1: Gaussove krivky pre rôzne hodnoty σ .

5.2 Hertzsprung-Russellov diagram

Hertzsprung-Russellov diagram je diagram vyjadrujúci vzťah medzi povrchovou teplotou hviezdy a jej výkonom. Je viacero možností ako ho zostaviť, používajú sa závislosti: efektívna teplota – žiarivý výkon, farebný index – absolútna hviezdna veľkosť, spektrálna trieda – svietivosť. V HR diagrame sú zobrazené hviezdy ako body v určitých charakteristických miestach. Hviezda sa na HR diagrame nenachádza na svojom mieste navždy, ale postupuje. HR diagram je v podstate diagram života hviezd. Nachádza sa na ňom niekoľko významných oblastí, ktorými počas svojho života hviezda prejde.



Obr. 5.2: Hertzsprung-Russellov diagram.

Prakticky najdôležitejšou časťou je tzv. pás hlavnej postupnosti, po ktorom sa hviezda pohybuje smerom hore po grafe. Čas strávený na hlavnej postupnosti závisí najmä na hmotnosti hviezdy, rovnako ako to, kedy hlavnú postupnosť opustí.

V HR diagrame sa okrem hlavnej postupnosti nachádzajú ešte ďalšie dôležité oblasti. Napravo dole je oblasť červených trpaslíkov, chladných a málo hmotných hviezd, ktoré majú tým pádom malú svietivosť. Naľavo dole sa nachádza oblasť bielych trpaslíkov, malých horúcich hviezd, ale s relatívne malou svietivosťou. Napravo hore sa nachádza oblasť obrov a nad ňou oblasť nadobrov, obrovských, veľmi hmotných hviezd s nízkou povrchovou teplotou ale veľkou svietivosťou. Naľavo hore sa nachádza oblasť horúcich hviezd s veľkou svietivosťou. HR diagram je jedným zo základných nástrojov astronómov, kvalitne je popísaný v [5], alebo v [2].

Z predchádzajúcej charakteristiky vyplýva, že čím sa objekt v HR diagrame nachádza viac naľavo, tým je teplejší a čím vyššie, tým má väčšiu svietivosť.

V našom prípade zostavíme HR diagram hviezd v zornom poli. Na vodorovnú os vynesieme farebný index $V - R$ a na zvislú jasnosť objektu vo filtri V . Zaujímavé nás budú objekty s čo najnižšou hodnotou farebného indexu, teda hľadáme v zornom poli horúce (modré) objekty.

Tento postup je naozaj jednoduchý, ale skrýva v sebe jeden, skoro fatálny problém. Hviezdy v zornom poli sú určite od nás rôzne vzdialené, čiže ich svetlo prechádza cez rôznu masu medzihviezdneho média, kde dochádza k medzihviezdnému zčervenaniu. Práve preto sa vzdialenejšie hviezdy budú javiť červenšie. Pri použití len dvoch filtrov sa tento jav nedá eliminovať, ale aj napriek tomu predpokladáme, že rentgenový zdroj by mal byť odlišný od bežných hviezd a preto táto metóda môže byť úspešná.

5.3 Svetelná krivka

Analyzovať svetelnú krivku objektu u ktorého nie je vôbec známa perióda je veľmi zložitá úloha. Je potrebné získať dostatočné množstvo dát, ideálne toľko, že pokryjú spoľahlivo hneď niekoľkokrát celú periódu. Rentgenové zdroje nemusia nutne periodicky meniť svoju jasnosť, alebo krivka zmeny jasnosti môže byť superpozíciou viacerých periód.

Pri identifikácii rentgenových a gama zdrojov nám však v podstate stačí zistiť, či podozrivý objekt mení s časom svoju jasnosť, tým sa stáva ešte viac podozrivým. Ku skutočnej identifikácii a určení fyzikálnych vlastností daného objektu je potrebné porovnať fotometrické, ale aj spektroskopické dáta. Toto robí zo samotnej identifikácie neľahkú úlohu.

5.4 Porovnanie s katalógmi

Veľmi užitočnou metódou, ako identifikovať vo hviezdnom poli nový rentgenový zdroj, či prípadne odhaliť niekoľko kandidátov na optické náprotivky, je preskú-

manie katalógových informácií o hviezdach, prípadne galaxiách nachádzajúcich sa v errorboxe polohy rengenového zdroja.

Existuje obrovské množstvo prehliadok oblohy v rôznych vlnových dĺžkach, v podstate každá väčšia či menšia prehliadka dá za vznik novému katalógu. Ak sa v erroboxe daného zdroja nachádza niekoľko galaxií a jedna z nich je známa ako rádiový zdroj, je dosť možné, že bude zároveň aj rentgenovým zdrojom. Synchrotrónová emisia sa prejavuje najviac v rentgenovej a gama oblasti, ale tiež v rádiovkej oblasti. Teda sa dá predpokladať, že ak je v zornom poli rádiová galaxia, ide zrejme o nejaké AGN, a kandidát na optický náprotivok daného rentgenového zdroja je na svete.

Pri takomto prieskume objektov v okolí neznámeho rentgenového zdroja nemusíme nutne naraziť na galaxiu. Môžeme napríklad objaviť, že niektorá z hviezd bola pozorovaná v jednej z mnohých prehliadok oblohy v UV oblasti. Vtedy sa daná hviezda mení na podozrivú.

Samozrejme touto metódou je skoro nemožné niečo dokázať, ale môžeme si vytipovať pár objektov a u nich sledovať, či sa s časom nemení ich jasnosť, alebo môžeme získať ich spektrá.

Analýza šumu

6.1 Vybrané objekty a dáta

Zistiť ovať charakter rozptylu dát je rozumné pre objekty, kde bolo v pozorovacej noci získaných čo najviac meraní. Pre jednoduchosť zo súboru pozorovaných objektov vyberám také, ktoré sa javia ako bodové zdroje. Pri objektoch, ktoré nie sú bodovými zdrojmi svetla ako galaxie, je problematické určiť hranicu objektu na snímke a uskutočniť presnú fotometriu. Zvolil som tri objekty, každý v R filtri.

Objekt	noc	R	expozícia
IGRJ00370+6122	17.10.2006	150	25s
IGRJ01583+6713	19.10.2006	113	25s
IGRJ06253+7334	25.3.2007	77	90s

Tabuľka 6.1: Vybrané objekty, pozorovacie noci a počet snímok v R filtri s uvedenou expozičnou dobou.

6.2 Analýza

Cieľom je pre dané objekty popísané v tabuľke (6.1) vytvoriť histogramy pre filter R , pretože v tomto filtri je kamera výrazne citlivejšia ako vo V a získané dáta sú kvalitnejšie. Za predpokladu, že dané objekty sú zároveň rentgenové zdroje, mali by "šumieť" viac ako obyčajné hviezdy. Najskôr si zobrazíme svetelnú krivku pre každý objekt a noc. Je zrejmé, že jasnosť objektu nebude konštantná s časom, jednak to môže byť spôsobené zmenami jasnosti samotného objektu, ale tiež vplyvom extinkcie.

Je nutné každú sadu dát jednotlivých objektov opraviť o trend na danom snímku. Cez dáta sa preloží závislosť $y = a * x + b$ metódou najmenších štvorcov a následne odčítame trend od nameraných hodnôt. To spôsobí "vyrovnanie" dát a zostane len šum s náhodným rozdelením. Takto upravené dáta sa nachádzajú v nasledujúcich grafoch. Stredná hodnota dát opravených o trend je nula, kvôli tomu ako sme trend odčítali. Rovnaký postup je treba aplikovať aj na svetelnú krivku porovnávacej hviezdy voči ďalšej porovnávacej hviezde. Takto získame dve sady dát, šum zdroja a šum porovnávacej hviezdy.

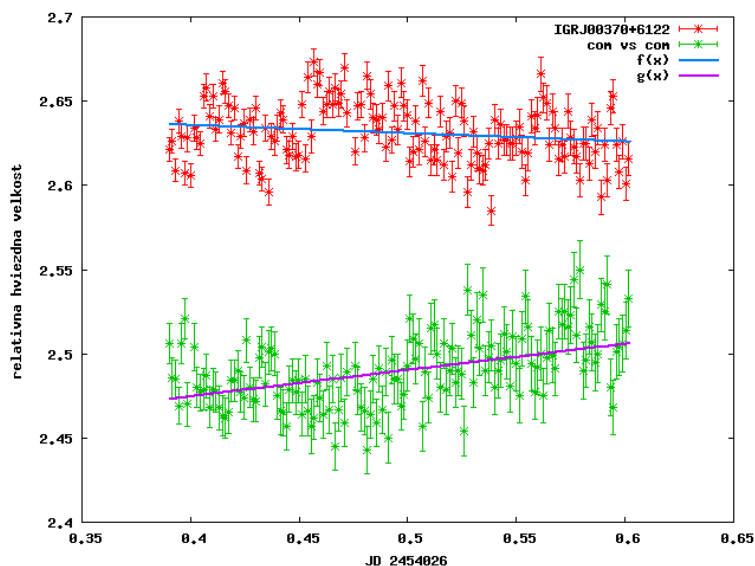
Následne je nutné rozdeliť namerané a zredukované jasnosti premennej hviezdy a porovnávacej hviezdy do binov. Dôležité je dobre zvoliť šírku binu. Dĺžka intervalu by mala mať podobnú hodnotu ako σ a v bine, v ktorom sa nachádza hodnota x_0 by malo byť \sqrt{n} hodnôt, kde n je celkový počet hodnôt.

Cez takto získaný histogram preložíme metódou najmenších štvorcov Gaussovú krivku. Pretože táto nie je normovaná na jednotku, zavedieme škálovací parameter A . Z jej tvaru a hodnoty σ je hneď zrejmé, či pozorovaný objekt šumí viac ako porovnávacia hviezda.

$$f(x|x_0, \sigma, A) = Ae^{-(x-x_0)^2/2\sigma^2} \quad (6.1)$$

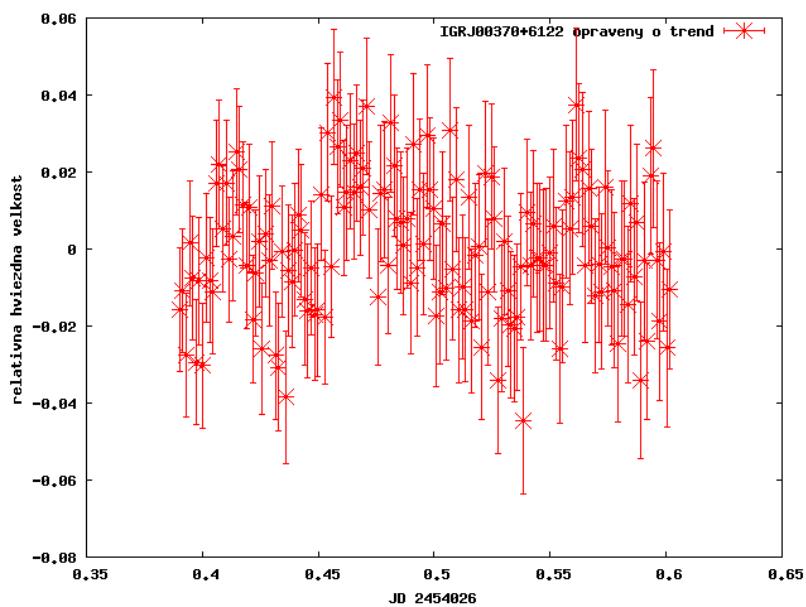
6.3 IGRJ00370+6122

Analýza šumu rentgenového zdroja IGRJ00370+6122 z noci 17.10.2006 vo filtri R.

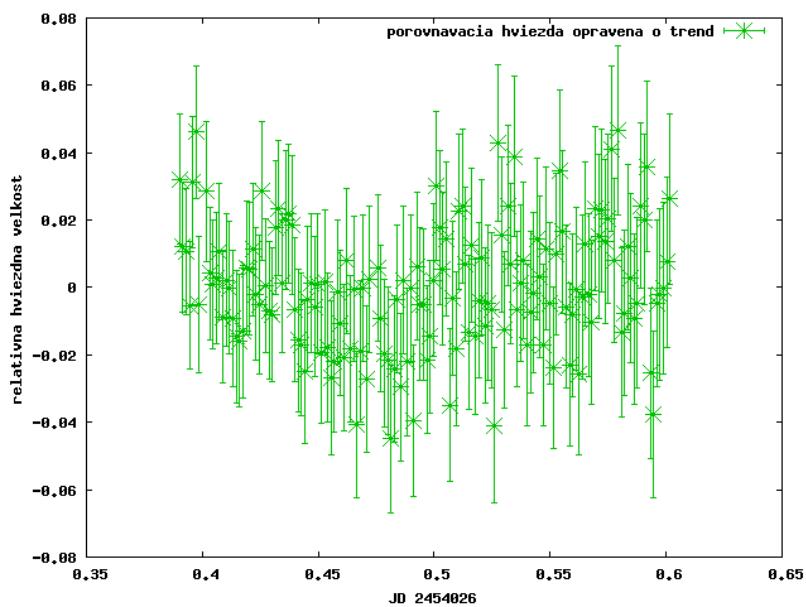


Obr. 6.1: Svetelná krivka IGRJ00370+6122 vo filtri R, pozorovacia noc 17.10.2006, rovnice preložených priamok: $f(x) = -0.048x + 2.656$ a $f(g) = 0.156x + 2.413$.

6. Analýza šumu



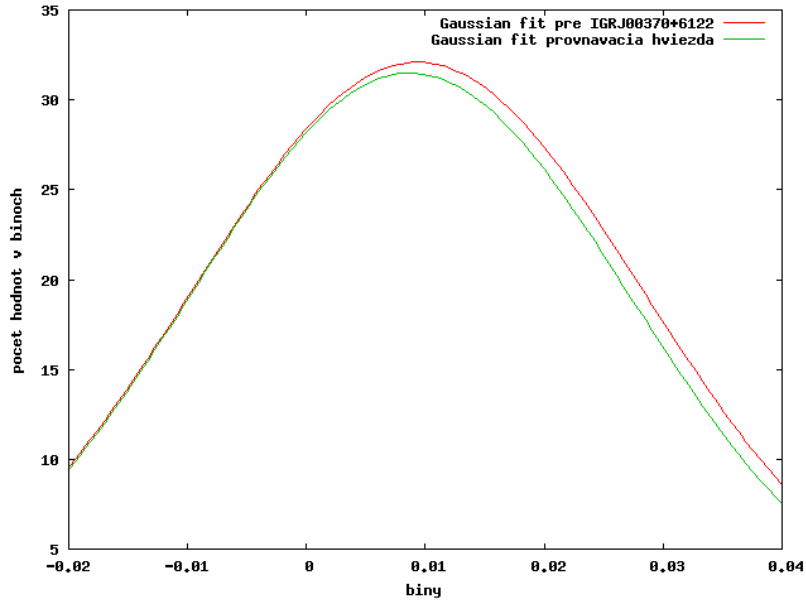
Obr. 6.2: Svetelná krivka IGRJ00370+6122 opravená o trend, chyby boli určené pomocou zákona šírenia chýb.



Obr. 6.3: Svetelná krivka porovnávej hviezdy opravená o trend, chyby boli určené pomocou zákona šírenia chýb.

6. Analýza šumu

Z dát získaných opravou svetelných kriviek o trendy som vytvoril histogram pre premennú hviezdu a pre porovnávaciu hviezdu. Biny som nastavil na vzdialenosť 0.01 mag. Pomocou rovnice (6.1) som cez dané histogramy preložil Gaussovú krivku. V tomto prípade nie je možné dokázať, že kandidát na rentgenový zdroj IGRJ00370+6122 šumí viac ako porovnávacia hviezda.



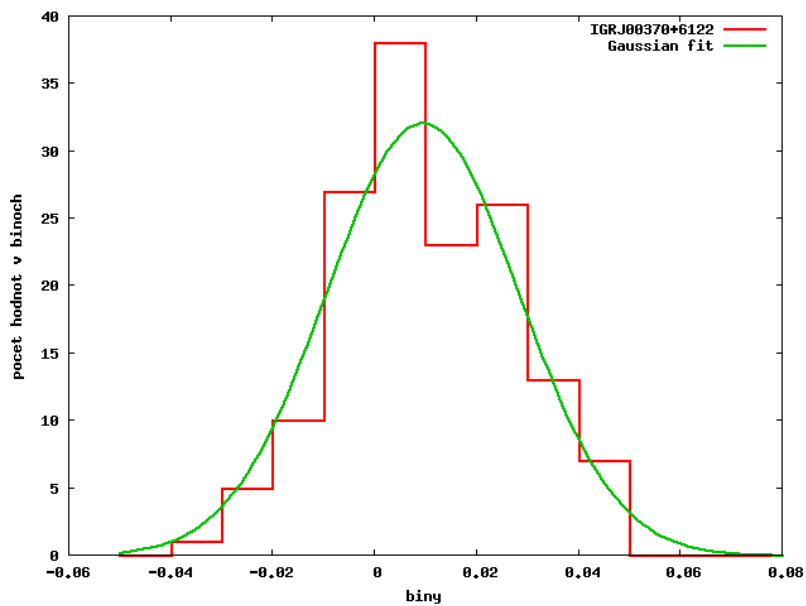
Obr. 6.4: Porovnanie preložených Gaussových kriviek cez histogramy šumu IGRJ00370+6122 a porovnávaciej hviezdy.

Ako je vidieť na obrázku (6.4), a tiež na obrázkoch (6.5) a (6.6), Gaussove krivky preložené cez histogramy sú si pre zdroj IGRJ00370+6122 aj pre porovnávaciu hviezdu veľmi podobné. V tabuľke (6.2) sú uvedené ich parametre.

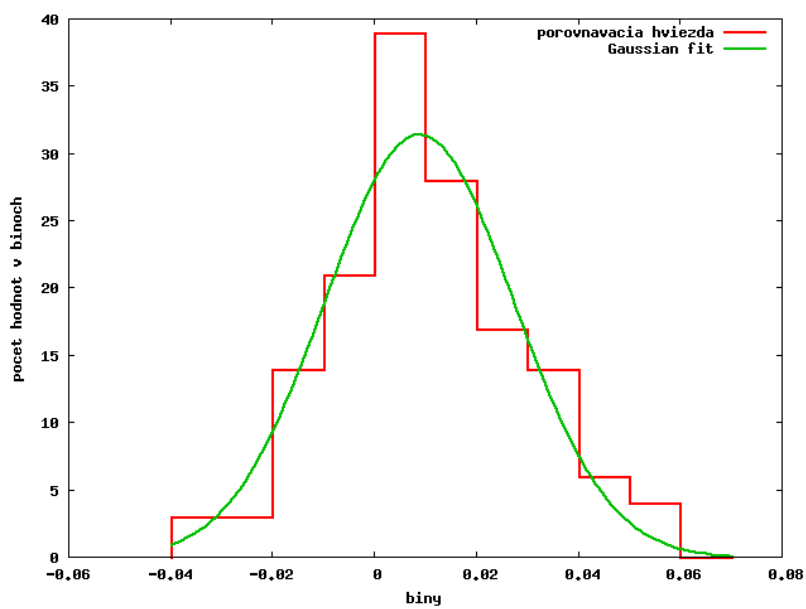
Objekt	A	x_0	σ
IGRJ00370+6122	32.095	0.0093	0.0267
hviezda	31.486	0.0087	0.0265

Tabuľka 6.2: Parametre Gaussových kriviek v prípade analýzy šumu IGRJ00370+6122.

6. Analýza šumu



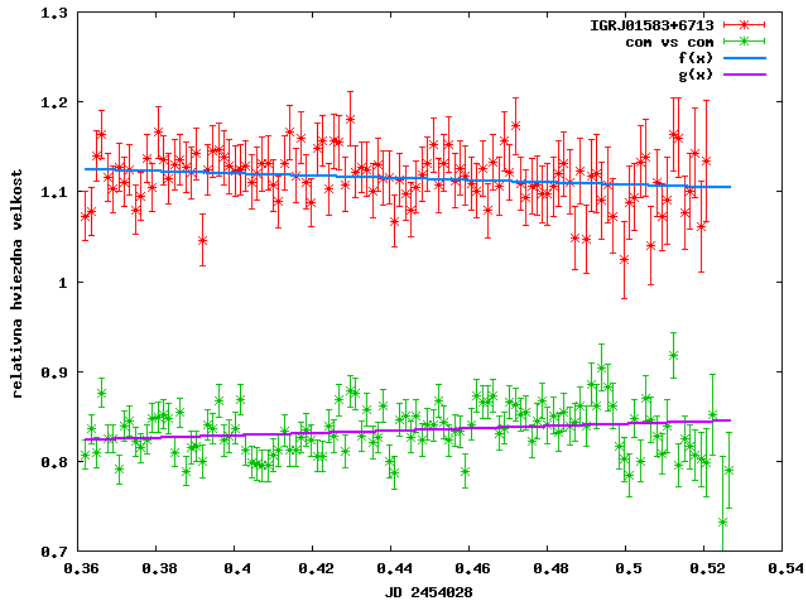
Obr. 6.5: Gaussova krivka preložená cez histogram fluktuácií jasnosti IGRJ00370+6122.



Obr. 6.6: Gaussova krivka preložená cez histogram fluktuácií jasnosti porovnávacej hviezdy.

6.4 IGRJ01583+6713

Analýza šumu rentgenového zdroja IGRJ01583+6713 z noci 19.10.2006 vo filtri R.



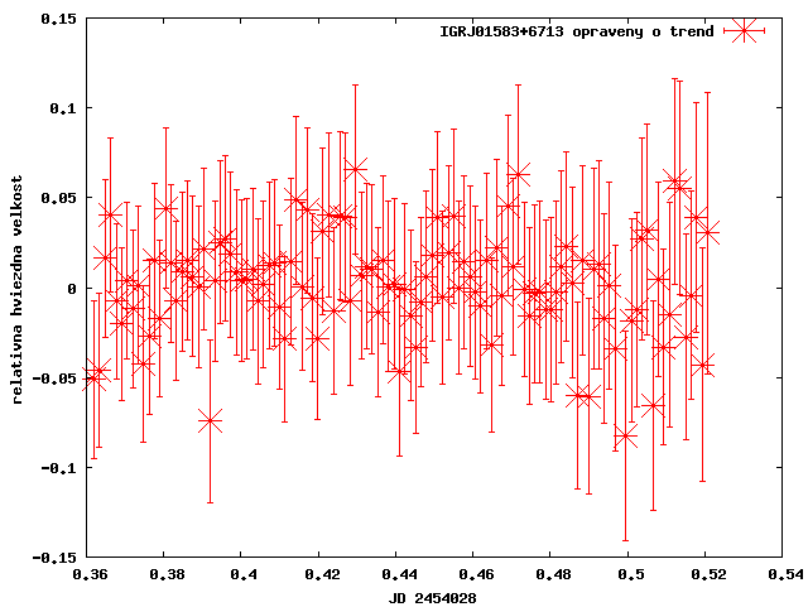
Obr. 6.7: Svetelná krivka IGRJ00370+6122 vo filtri R, pozorovacia noc 19.10.2006, rovnice preložených priamok: $f(x) = -0,129x + 1,171$ a $f(g) = 0.129x + 0.778$.

Namerané dáta som spracoval rovnako ako v predchádzajúcom prípade. Vytvoril som histogramy pre rentgenový zdroj IGRJ01583+6713 obr.(6.10) a porovnávaciu hviezdu obr.(6.11), úpravou ich svetelných kriviek obr.(6.7) o trendy, obr.(6.8) a obr.(6.9). Avšak ani v tomto prípade nie je výsledok uspokojivý, Gaussove krivky pre šum zdroja a porovnávacej hviezdy, obr.(6.12) sú si natoľko podobné, že nie je možné touto metódou rozhodnúť.

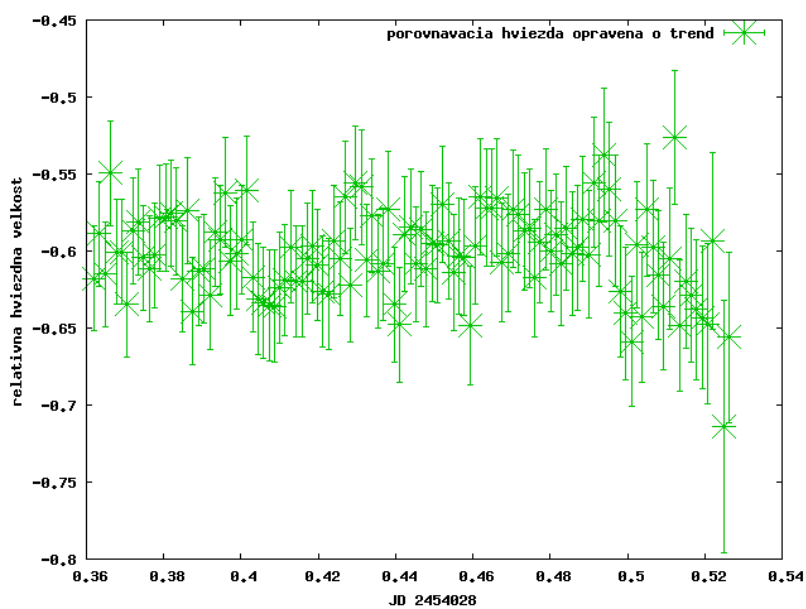
Objekt	A	x_0	σ
IGRJ01583+6713	18.048	0.0147	0.0327
hviezda	17.089	-0.5908	0.0385

Tabuľka 6.3: Parametre Gaussových kriviek v prípade analýzy šumu IGRJ01583+6713.

6. Analýza šumu

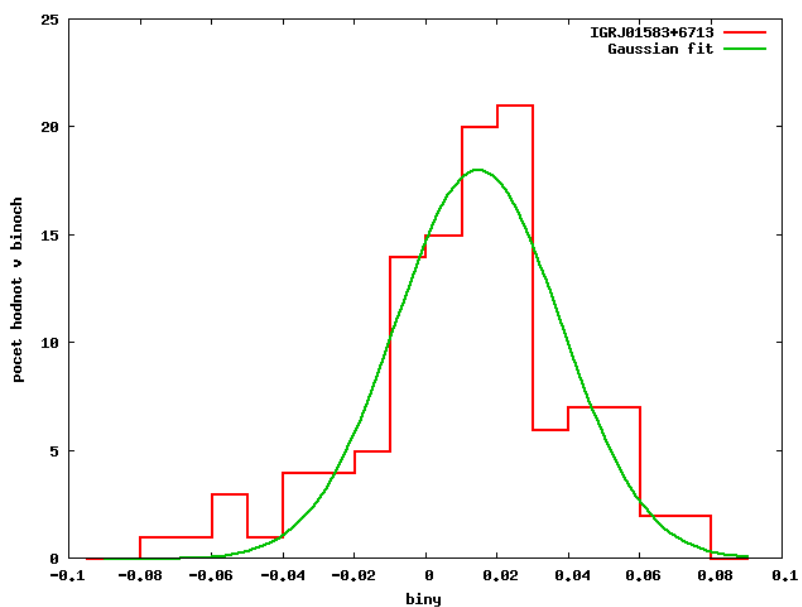


Obr. 6.8: Svetelná krivka zdroja opravená IGRJ01583+6713 o trend, chyby boli určené pomocou zákona šírenia chýb.

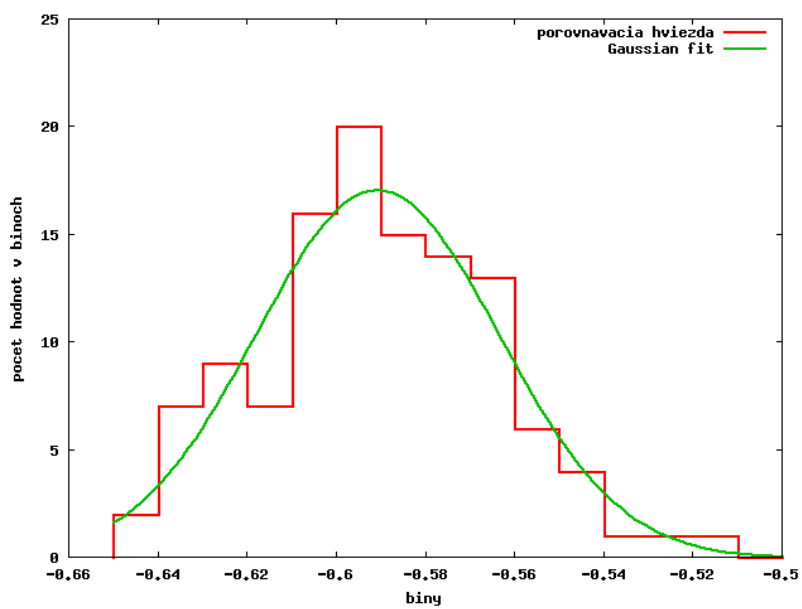


Obr. 6.9: Svetelná krivka porovnávej hviezdy opravená o trend, chyby boli určené pomocou zákona šírenia chýb.

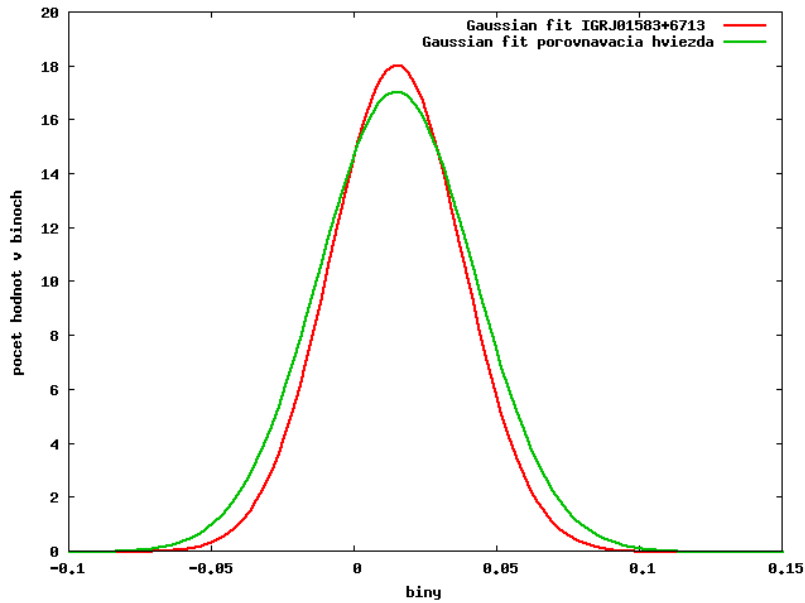
6. Analýza šumu



Obr. 6.10: Gaussova krivka preložená cez histogram fluktuácií jasnosti IGRJ01583+6713.



Obr. 6.11: Gaussova krivka preložená cez histogram fluktuácií jasnosti porovnávacej hviezdy.



Obr. 6.12: Gaussove krivky pre zdroj IGRJ01583+6713 a porovnávaciu hviezdu, kvôli lepšiemu porovnaniu vynesené s rovnakým parametrom x_0 .

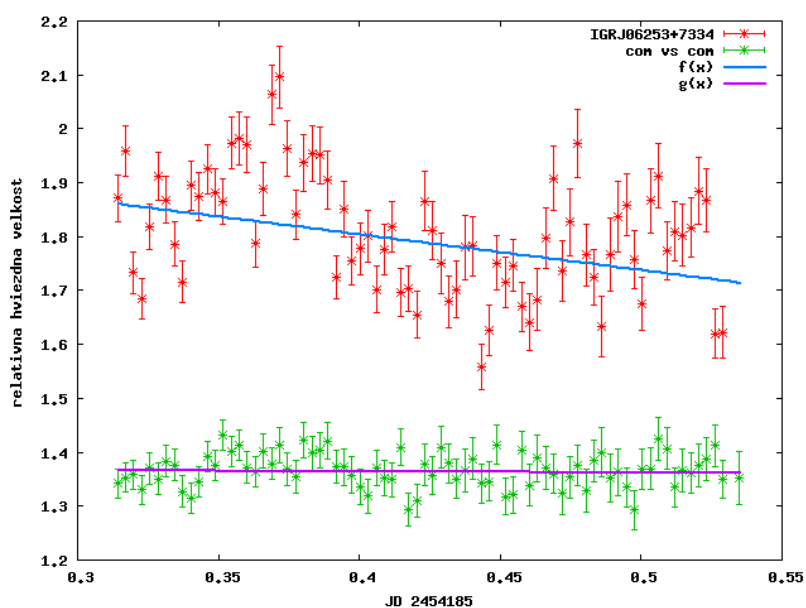
6.5 IGRJ06253+7334

Analýzu šumu rentgenového zdroja IGRJ06253+7334 je v podstate nemôžné urobiť metódou akú používam. Zo svetelnej krivky na obrázku (6.13) je jasne vidieť, že aproximácia priamkou a následné opravenie svetelnej krivky o tento trend je nevhodné, pretože objekt zjavne mení svoju jasnosť periodicky.

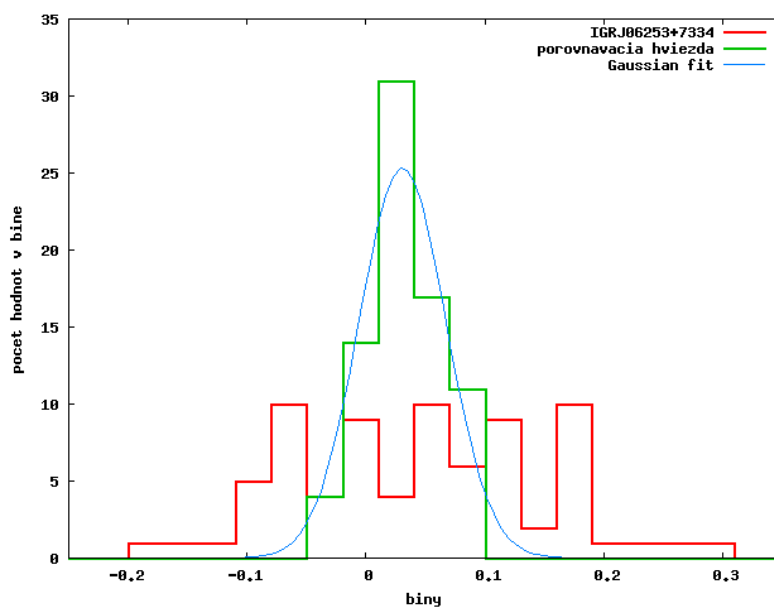
Z obrázku (6.14) je jasné, že prevedená úprava bola nevhodná pre tento zdroj, pretože výsledný histogram nemá ani zd'aleka Gaussove rozloženie, zato histogram popisujúci fluktuácie jasnosti porovnávej hviezdy sa riadi Gaussovým rozložením veľmi pekne. Pre tento prípad som použil trikrát väčšie biny a to síce s hodnotou 0,03mag.

Na obrázkoch (6.15) a (6.16) sú zobrazené svetelné krivky rentgenového zdroja IGRJ06253+7334 a porovnávej hviezdy, chyba je dopočítaná podľa zákona šírenia chýb. Na týchto obrázkoch je pekne vidieť, ako odčítanie lineárnych trendov pomohlo len porovnávej hviezde, ale pre zdroj to malo skôr negatívny účinok.

6. Analýza šumu

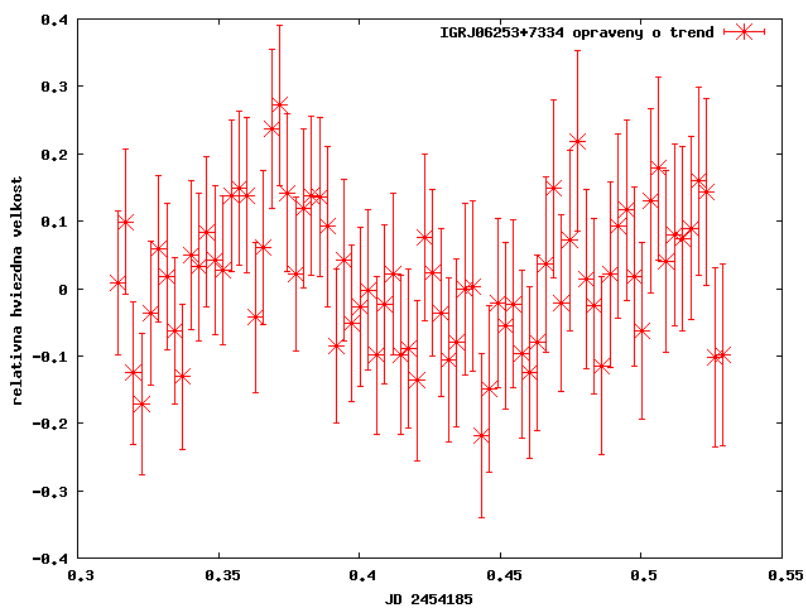


Obr. 6.13: Svetelná krivka IGRJ06253+7334 vo filtri R, pozorovaná noc 25.3.2007, rovnice preložených priamok: $f(x) = -0.662x + 2.07$ a $f(g) = -0.021x + 1.375$.

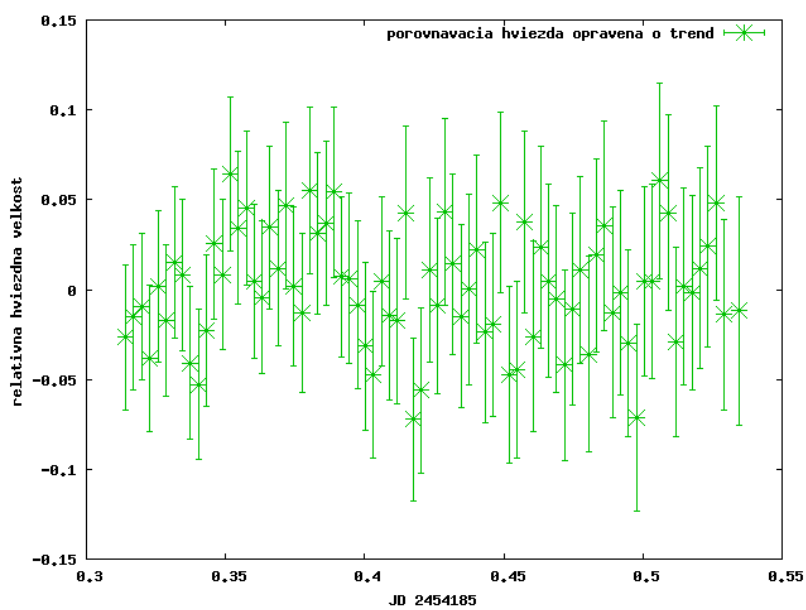


Obr. 6.14: Histogramy pre fluktuácie jasnosti rentgenového zdroja IGRJ06253+7334 a porovnávacjej hviezdy, cez histogram porovnávacjej hviezdy je možné pekne preložiť Gaussovú krivku, cez histogram zdroja v žiadnom prípade.

6. Analýza šumu



Obr. 6.15: Svetelná krivka IGRJ06253+7334 opravená o lineárny trend.



Obr. 6.16: Svetelná krivka porovnávacej hviezdy opravená o lineárny trend.

6.6 Diskusia k metóde porovnania šumu

Napriek tomu, že sa v predchádzajúcich troch prípadoch metóda analýzy šumu neosvedčila, netreba ju preto zavrhať. Dôvodov, prečo sa nepodarilo nič jednoznačne ukázať, môže byť hneď niekoľko. Rozdelil by som ich medzi dôvody spôsobené pozorovacou aparátúrou a dôvody spojené s fyzikálnymi vlastnosťami pozorovaného rentgenového zdroja.

Dôvodov spojených s pozorovacou aparátúrou sa ponúka hneď niekoľko. Pozorovacie podmienky neboli ideálne a v šume nie veľmi kvalitných dát nebolo možné preukázať, že daný zdroj šumí viac ako porovnávacía hviezda. Tiež je pravdepodobné, že trendy, ktoré sa na snímkach objavili, neboli lineárne, ale zložitejšie. Toto je jasné pri objekte IGRJ06253+7334. Na obrázku (6.14) je zreteľne vidieť, že šum tohoto zdroja nemá Gaussovo rozdelenie. Dá sa preto predpokladať, že sa jeho jasnosť menila s časom zložitejšie a pravdepodobne periodicky, ako je vidieť na obr.(6.13). V tomto prípade by bolo lepšie preložiť cez dáta nie lineárny trend, ale vhodnú periodickú funkciu. Aj napriek tomu sa podarilo ukázať, že daný objekt IGRJ06253+7334 mení svoju jasnosť.

Dôvodov neúspechu analýzy šumu spojených s fyzikálnou podstatou rentgenových zdrojov by sme tiež našli niekoľko. V prvom rade je to spomínaná periodická zmena jasnosti. Ďalším a závažnejším dôvodom je to, že pozorované objekty, nepochybne hviezdneho charakteru nešumia natoľko silno, aby sme to rozlíšili pozorovacou aparátúrou, ktorá bola k tomu využívaná. Preto by bolo bezpochyby zaujímavé zopakovať takúto analýzu šumu pre podobné objekty s prístrojom, ktorý by umožňoval väčšiu presnosť pri fotometrickom pozorovaní.

Hertzsprung-Russellov diagram

7.1 Vybrané objekty a dáta

HR diagram bol zostrojený pre tri už známe objekty: IGRJ01583+6713, IGRJ06253+7334, IGRJ06253+7334. Použité dáta sú zobrazené v tabuľke (7.1).

Objekt	noc	R	V	exp R	exp V
IGRJ00370+6122	17.10.2006	150	90	25s	60s
IGRJ01583+6713	19.10.2006	118	117	25s	60s
IGRJ06253+7334	25.3.2007	78	77	90s	120s

Tabuľka 7.1: Vybrané objekty, pozorovacie noci a počet snímok v R a V filtroch s dĺžkami expozícií.

7.2 Spracovanie

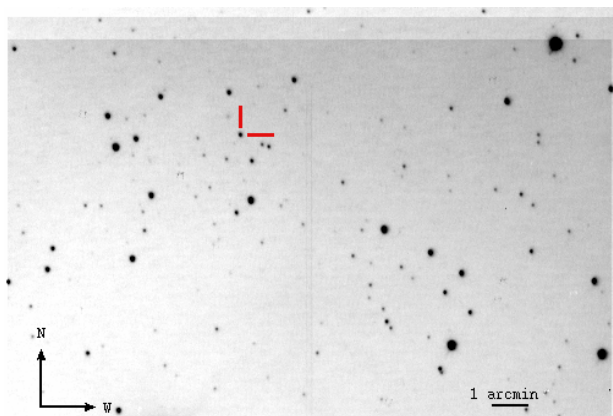
Spracovanie bolo v tomto prípade jednoduchšie ako pri analýze šumu. Celý postup spočíval v zložení jednotlivých snímok pre daný objekt a filter. Takto som vytvoril vždy dve zložené snímky, jednu pre V a druhú pre R filter. Následne som spravil fotometriu zložených snímok využitím aplikácie *muniphot*. To malo za následok vždy vznik súborov *.MAT v ktorých boli jednotlivé hviezdy vždy na konkrétnych riadkoch. Stačilo už len odčítať jasnosti $V - R$ a vyniesť do grafu. V každom z grafov je z dôvodu astronomickej konvencie os y otočená, potom sú menej jasné objekty bližšie k osi x a jasnejšie ďalej, presne tak ako to má byť v HR diagrame.

Pri tejto metóde je dôležité si uvedomiť, že farebné indexy $V - R$ sú relatívne,

7. Hertzsprung-Russellov diagram

teda majú význam len v danom HR diagrame, ale nie je možné porovnávať viacero objektov s relatívnymi farebnými indexmi v rôznych HR diagramoch. Takéto porovnávanie by bolo možné len ak by sme nakalibrovali hviezdne veľkosti hviezd v poli napríklad pomocou nejakého katalógu.

Na obrázku (7.1) je príklad zloženej snímky. Konkrétne sa jedná o zloženinu pozorovacej noci 25.03.2007, objekt IGRJ06253+7334 je označený šípkami, celková expozícia 78×90 sekúnd.



Obr. 7.1: Príklad zloženej snímky vo filtri R, IGRJ06253+7334 je označený šípkami, celková expozícia 78×90 sekúnd.

7.3 IGRJ00370+6122

HR diagram hviezdneho okolia rentgenového zdroja IGRJ00370+6122. Ako je spomínané v kapitole 4.5, jedná sa o HMXB, kde je sekundárnou zložkou horúci obor spektrálnej triedy BN0.5II-III. Preto sa dá predpokladať, že na HR diagrame sa tento objekt bude nachádzať výrazne naľavo, pretože sa javí ako modrý.

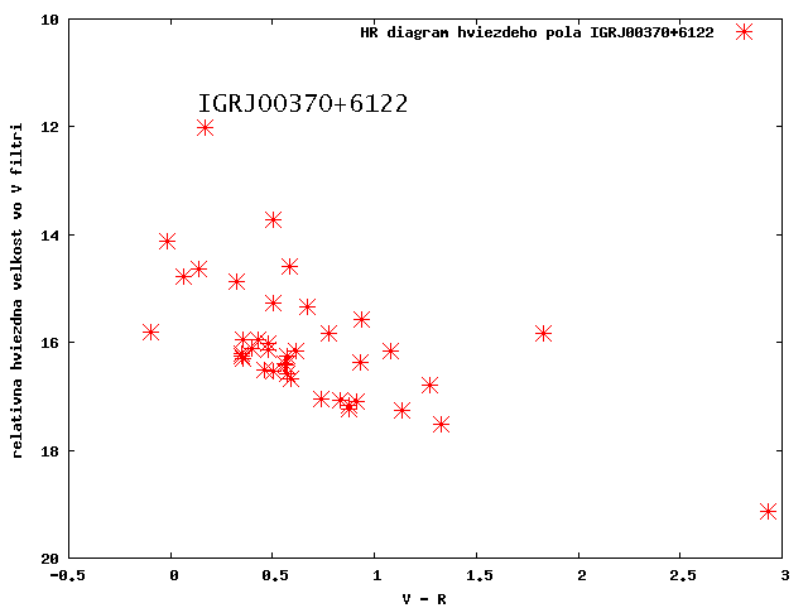
Pri pohľade na obr.(7.2) zistíme, že tento rentgenový zdroj naozaj leží medzi horúcimi hviezdami a s relatívnym farebným indexom $V - R \sim 0.17$ sa skutočne javí silne modrý.

7.4 IGRJ01583+6713

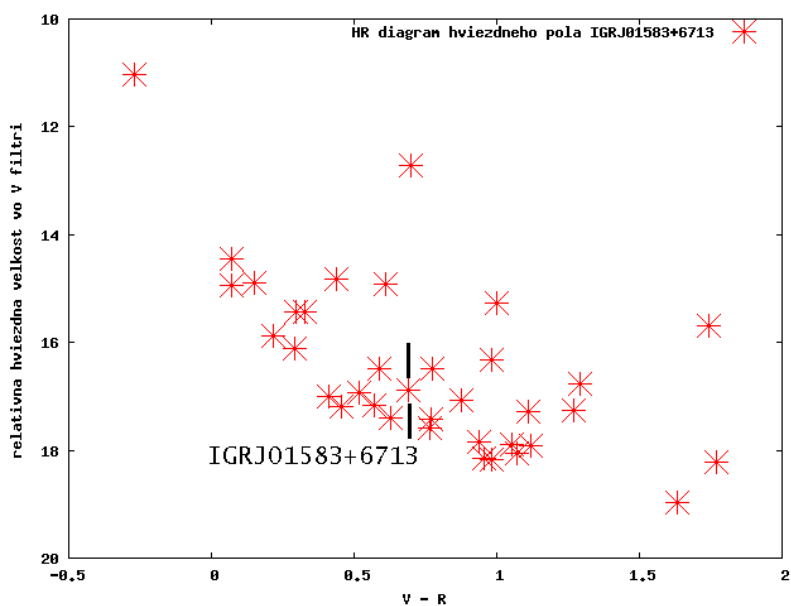
HR diagram hviezdneho okolia rentgenového zdroja IGRJ01583+6713. Podľa kapitoly 4.6 sa pravdepodobne jedná o rentgenový binárny systém, kde je sekundárnou zložkou Be hviezda a primárnou pravdepodobne neutrónová hviezda s akrečným diskom.

Ako je vidieť z obrázku (7.3), IGRJ01583+6713 sa javí ako pomerne málo jasná hviezda, s relatívnym farebným indexom $V - R \sim 0.69$. V tomto prípade by nám HR diagram nepomohol pri jej identifikácii, pretože objekt sa nachádza v časti HR diagramu, kde je veľa ostatných hviezd.

7. Hertzsprung-Russellov diagram



Obr. 7.2: HR diagram hviezdnej oblasti okolo rentgenového zdroja IGRJ00370+6122.



Obr. 7.3: HR diagram hviezdnej oblasti okolo rentgenového zdroja IGRJ01583+6713.

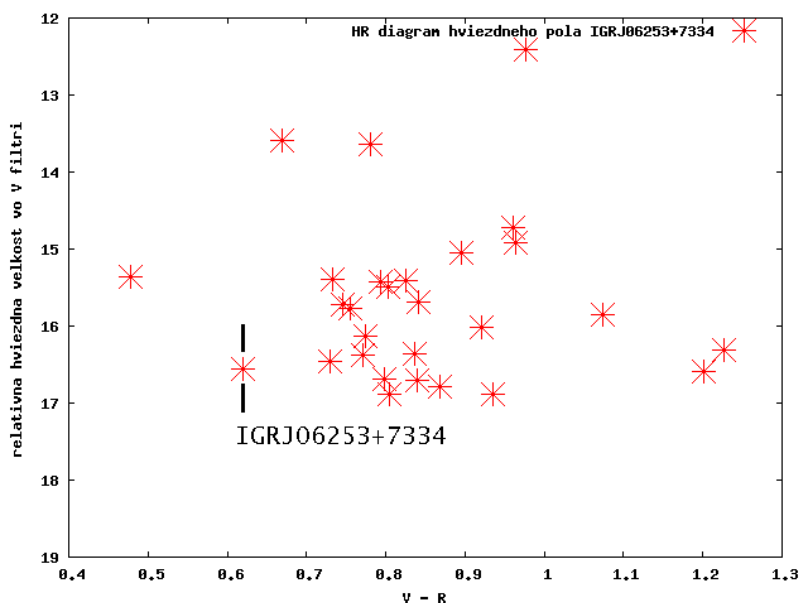
7.5 IGRJ06253+7334

HR diagram hviezdneho okolia rentgenového zdroja IGRJ06253+7334. Podľa kapitoly 4.7 je IGRJ06253+7334 kataklizmatickou premennou hviezdou. Dá sa pred-

7. Hertzsprung-Russellov diagram

pokladať, že akrečný disk okolo bieleho trpaslíka spôsobí, že zdroj sa bude javiť modrý.

Ako je vidieť na obrázku (7.4), skutočne sa rentgenový zdroj IGRJ06253+7334 javí výrazne modrý, v hviezdnom poli sa nachádza len jeden objekt modrejší ako tento zdroj, podľa katalógu USNO-A2.0 sa jedná o radovú hviezdu s katalógovým označením 1575-02541166.



Obr. 7.4: HR diagram hviezdnej oblasti okolo rentgenového zdroja IGRJ06253+7334.

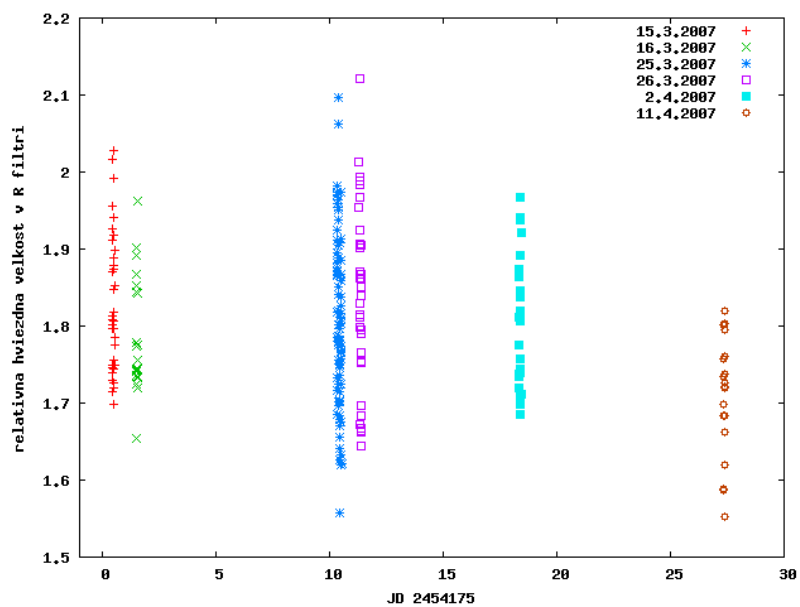
7.6 Diskusia k metóde HR diagramu

Využitie HR diagramu sa zdá byť dobrou metódou. Ak sa použijú na konštrukciu len dva filtre, je silne ovplyvnený medzihviezdnou extinkciou, ale aj napriek tomu môže odhaliť podozrivý objekt. U dvoch z troch skúmaných objektov sa ukázalo, že sú modrejšie (teplejšie) ako väčšina okolitých hviezd, čo sa dá považovať za úspech.

Metóda HR diagramu s využitím relatívnych farebných indexov je pomerne jednoduchá metóda, ktorou sa dá odhaliť podozrivý objekt veľmi rýchlo. Avšak, akonáhle by sme chceli prejsť od relatívnych farebných indexov k skutočným, prináša to so sebou veľa problémov. Potom by bolo nutné nakalibrovat' jasnosti hviezd podľa katalógu, čo by celú metódu značne skomplikovalo.

Svetelná krivka

Jednou z možností ako určiť podozrivý zdroj je zistiť, či sa jeho jasnosť mení s časom. Najjednoduchšie ako to urobiť je vyniesť si do grafu relatívnu zmenu jasnosti za každú pozorovaciu noc, dostaneme tak neobvykle vyzerajúcu svetelnú krivku ako na obrázku (8.1)



Obr. 8.1: Svetelná krivka rentgenového zdroja IGRJ06253+7334 počas šiestich pozorovacích nocí.

Z takejto svetelnej krivky môžeme vidieť, aká bola amplitúda zmeny jasnosti

8. Svetelná krivka

objektu počas jednotlivých nocí. Pre rentgenový zdroj IGRJ06253+7334 je amplitúda zmien jasnosti ~ 0.4 mag, čo je oveľa viac ako náhodný šum, preto sa dá usúdiť, že rentgenový zdroj IGRJ06253+7334 mení určite svoju jasnosť. Na základe svetelnej krivky analyzovanej v analýze šumu pre IGRJ06253+7334 a na základe svetelnej krivky zo šiestich nocí na obr.(8.1) je vysoko pravdepodobné, že mení svoju jasnosť pravidelne. To by zodpovedalo skutočnosti, že sa jedná o kataklizmatickú premennú hviezdu. Počet snímok a dĺžky expozícií sú v tabuľke (8.1)

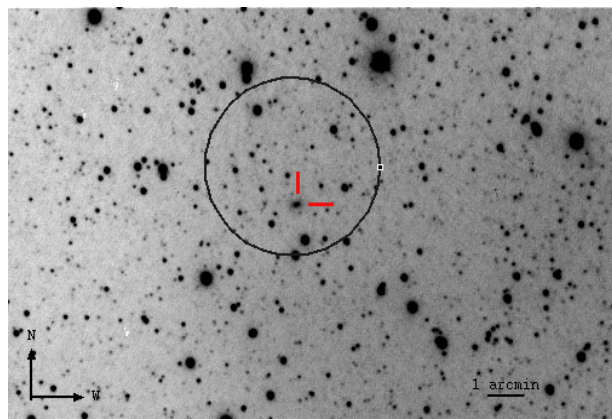
noc	R	exp R
15.3.2007	36	120s
16.3.2007	23	120s
25.3.2007	78	90s
26.3.2007	36	120s
2.4.2007	28	120s
11.4.2007	21	120s

Tabuľka 8.1: Pozorovacie noci, počet a dĺžka expozícií.

Analýza tvaru svetelnej krivky a určenie jej periódy je zložitým problémom, ktorému som sa z dôvodov veľkej náročnosti a obmedzenému predpísanému obsahu bakalárskej práce nevenoval. Pozorovanie a analýza svetelnej krivky rentgenového zdroja IGRJ06253+7334 bude ďalej pokračovať s využitím možností na Montebo observatory mimo rozsah tejto bakalárskej práce.

Porovnanie s katalógmi

Na záver spomeňme metódu dostupnú aj astronómom, ktorí nie sú vybavení pozorovacou aparatúrou. Jediné, čo potrebujú, je pripojenie na internet. V podstate jednou z prvých vecí, ktoré je nutné pri objavení nového rentgenového či gama zdroja urobiť, je nazrieť do astronomických databáz na miesto so súradnicami nového objektu a pozrieť sa, ktoré známe objekty sa tam nachádzajú. Podobne sa dal objaviť kandidát na optický náprotivok IGRJ00254+6822.



Obr. 9.1: IGRJ00254+6822 je potenciálny zdroj označený červenými šípkami, zložená snímka, celková expozícia 30×120 sekúnd

V errorboxe sa síce nachádza veľa hviezd, ale nachádza sa tam aj galaxia s katalógovými označeniami: *LEDA 136991* a *IRAS 00227+6805*. Nie je vysoko pravdepodobné, že v tak malom errorboxe sa bude nachádzať pomerne jasná galaxia, preto ju môžeme považovať za podozrivú. Či je však v skutočnosti AGN a teda

9. Porovnanie s katalógmi

aj rentgenovým zdrojom sa takto určiť nedá, je to ale pomerne dobrá metóda, ako nájsť kandidáta, ktorému sa potom oplatí venovať bližšie.

Záver

Cieľom práce, ktorú práve držíte v rukách, bolo vyskúšať rôzne metódy identifikácie rentgenových a gama zdrojov v optickom obore spektra. Skúsiť aplikovať na rôzne druhy objektov metódy dostupné aj menším astronomickým prístrojom, vybaveným len CCD kamerou a filtrami. Identifikovať hľadaný optický náprotivok vysokoenergetického kozmického zdroja nie je jednoduchá úloha. V skutočnosti na nej participujú rôzne skupiny astronómov, vedci zaoberajúci sa fyzikou vysokých energií pracujúci s družicami ako INTEGRAL, či Swift, ale tiež astronómia zaoberajúci sa pozorovaním v optickej, infračervenej a tiež rádiovnej oblasti.

V tejto práci sú postupne spomenuté mechanizmy emisie rentgenových a gama zdrojov. Nadväzuje problematika farebných indexov, jednej z najsilnejších astronomických metód na určovanie vlastností kozmických objektov. Ďalej práca pojednáva o typoch rentgenových zdrojov, rozdelených medzi galaktické a extragalaktické objekty.

Spracovanie vybraných objektov bolo realizované viacerými metódami, cieľom bolo otestovať tieto metódy a skúsiť nezávisle potvrdiť polohu zdroja.

Ako prvá metóda bola použitá analýza fluktuácií jasnosti objektu (šum). Toto bolo aplikované na tri objekty: IGRJ00370 +6122, IGRJ01583 +6713, IGRJ06253 +7334. Metóda sa síce priamo neosvedčila, nepodarilo sa mi dokázať ani v jednom z prípadov, že rentgenový zdroj šumí preukázateľne viac ako porovnávacía hviezda. Podarilo sa však ukázať, že zdroj IGRJ06253+7334 mení svoju jasnosť a to pravdepodobne periodicky.

Dôvodov, prečo sa analýza šumu nepodarila, môže byť viac. Je dosť možné, že dané objekty síce šumia viac ako porovnávacie hviezdy, ale tento rozdiel je zastretý nedokonalosťou pozorovacej aparatúry. Tiež je pravdepodobné, že trendy, ktoré sa na snímkach objavili, neboli lineárne, ale zložitejšie. Toto je zreteľné pri objekte IGRJ06253+7334. Na obrázku (6.14) je vidieť, že šum zdroja nemá Gaus-

sovo rozdelenie. Dá sa preto predpokladať, že sa jeho jasnosť menila s časom zložitejšie, ako je vidieť na obr.(6.13). V tomto prípade by bolo lepšie preložiť cez dáta vhodnú periodickú funkciu. Aj napriek tomu sa podarilo ukázať, že daný objekt IGRJ06253+7334 mení svoju jasnosť.

Svetelná krivka zdroja IGRJ06253+7334 je opísaná v kapitole osem. Takmer konštantný rozptyl dát z každej zo šiestich pozorovacích nocí naznačoval, že objekt mení svoju jasnosť periodicky s amplitúdou ~ 0.4 mag. Analýza svetelnej krivky takéhoto objektu je však zložitá a bolo by jej potrebné venovať oveľa viac priestoru, ako môže poskytnúť rozsah bakalárskej práce. IGRJ06253+7334 je objektom, ktorému sa bude venovať pozornosť aj mimo rozsah tejto práce.

Ďalšou metódou bolo vykreslenie HR diagramu hviezdneho poľa a určenie relatívneho farebného indexu rentgenového zdroja. Cieľom bolo dokázať, že rentgenové zdroje by mali byť odlišné od normálnych hviezd a mali by sa javiť modrejšie. Toto sa podarilo ukázať pre zdroje: IGRJ00370+6122 a IGRJ06253+7334, ktoré sa odlišovali od väčšiny hviezd v poli práve tým, že boli modrejšie (teplejšie). U IGRJ01583+6713 sa toto nepodarilo dokázať, rentgenový zdroj sa v HR diagrame premietol medzi normálne hviezdy.

Metóda HR diagramu sa ukázala byť užitočná a vhodná pre rýchle nájdenie potenciálne zaujímavých objektov v danom poli.

Ukážke, že v dnešnej dobe je možné robiť astronómiu len s použitím počítača a internetu, je venovaná deviata kapitola. V nej je ukázané, že je veľmi vhodné prejsť katalógy objektov nachádzajúcich sa v chybovom boxe, ktorý určuje polohu rentgenového zdroja. Takto je možné odhaliť kandidátov na optický náprotivok rentgenového zdroja.

V práci boli využité a odskúšané metódy identifikácie rentgenových a gama zdrojov. Rentgenová astronómia je stále ešte len v plienkach a je veľmi dôležité spájať metódy zaužívané v klasickej astronómii s novými metódami astronómie vysokých energií. Toto dáva za vznik robustným vedeckým postupom pri odhalovaní tajomstiev nášho Vesmíru.

Literatúra

- [1] Robson Ian: *Active Galactic Nuclei*, WILEY-PRAXIS Series In Astronomy and Astrophysics, England 1996
- [2] Carroll W. Bradley, Ostlie A. Dale: *An Introduction to Modern Astrophysics*, 2nd edition, Pearson International Edition, USA 2007
- [3] Sterken Chr., Manfroid J.: *Astronomical Photometry, A Guide*, Kluwer Academic Publishers, 1992
- [4] Mikulášek Z., Krtička J.: *Proměnné hvězdy*, skriptá ÚTFA Přf MU, 2007
- [5] Mikulášek Z., Krtička J.: *Úvod do fyziky hvězd a hvězdných soustav*, skriptá ÚTFA Přf MU, 2000
- [6] Bududíková M., Lerch T., Mikoláš Š.: *Základní statistické metody*, skriptá Přf MU, Brno 2005
- [7] Široký J., Široká M.: *Základy astronomie v příkladech*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1966
- [8] Kleczek J.: *Velká Encyklopedie Vesmíru*, Academia, Praha 2002
- [9] Hátle J., Likeš J.: *Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky*, Druhé, nezmenené vydanie, SNTL, Praha 1974
- [10] Hroch F.: *Astronomické praktikum*, skriptá ÚTFA Přf MU, Brno 2006
- [11] Birda A. J., Maliziab A., Bazzanoc A. et al.: *The 3rd IBIS/ISGRI Soft Gamma-Ray Survey Catalog*, arXiv:astro-ph/0611493v2 23 Jan 2007
- [12] den Hartog P.R., Kuiper L.M., Corbet R.H.D, t'Zand J.J.M., Hermsen W., Vink J., Collmar W.: *INTEGRAL survey of the Cassiopeia region in hard X rays*, arXiv:astro-ph/0601644v1

LITERATÚRA

- [13] Johnson H. L., Morgan W. W.: *Fundamental stellar photometry for standards of spectral types on the revised system of the Yerkes spectral atlas*, The Astrophysical Journal vol. 117 no. 3, May 1953
- [14] Krátká T.: *Barevné změny blazarů*, Přf MU, Brno 2005
- [15] Barlow E.J., et all: *20–100 keV properties of cataclysmic variables detected in the INTEGRAL/IBIS Survey*, arXiv:astro-ph/0607473v1
- [16] den Hartog P.R., Kuiper L.M., Corbet R.H.D, t'Zand J.J.M., Hermsen W., Vink J., Remillard R., van der Klis M.: *ATel #281, IGR J00370+6122 A new highmass Xray binary*
<http://www.astronomerstelegam.org/?read=281>
- [17] Negueruela I., Reig P.: *ATel #285 BD +60 73 = IGR J00370+6122*
<http://www.astronomerstelegam.org/?read=285>
- [18] Steiner C., Eckert D., Mowlavi N., Decourchelle A., Vink J.: *ATel #672 IGR J01583+6713, a new hard X-ray transient discovered by INTEGRAL*
<http://www.astronomerstelegam.org/?read=672>
- [19] Halpern J. P., Tyagi S.: *ATel #681 Be Star Counterpart of X-ray Transient IGR J01583+6713*
<http://www.astronomerstelegam.org/?read=681>
- [20] Kuiper L., den Hartog P.R., Hermsen W.: *ATel #939 Three new hard X-ray sources in the Cassiopeia/Perseus region discovered by INTEGRAL*
<http://www.astronomerstelegam.org/?read=939>
- [21] <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap980321.html>
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Planck's_law_of_black_body_radiation
- [23] <http://physics.nist.gov/MajResFac/SURF/SURF/sr.html>
- [24] PRC00-20SpaceTelescopeScienceInstitute, NASA
- [25] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=21>
- [26] http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form
- [27] <http://isdc.unige.ch/~rodrigue/html/igrsources.html>
- [28] <http://physics.muni.cz/~mb>
- [29] <http://www.physics.muni.cz/mb/nightview/>
- [30] <http://www.sbig.com/sbhtmls/ccdopsv5.html>

LITERATÚRA

- [31] <http://munipack.astronomy.cz/>
- [32] http://www.frontiernet.net/~landsman/HR/DeathofStars_diagram.gif

Tato práca bola vytvorená pomocou programu L^AT_EX a pri tvorbe práce nebol využitý žiadny komerčný softvér.