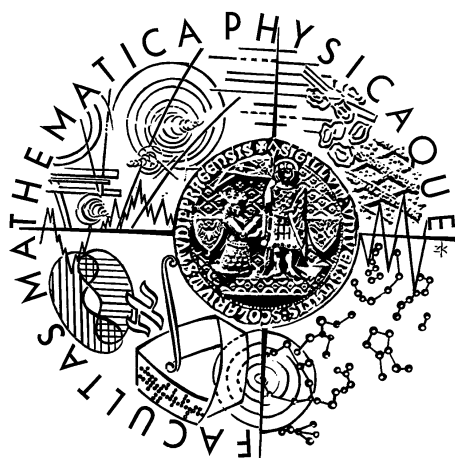


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Martin Jelínek

DETEKCE ZÁBLESKOVÝCH ZDROJŮ ZÁŘENÍ GAMA
POMOCÍ PŘÍSTROJŮ S CCD DETEKČÍ

Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: RNDr. René Hudec, CSc.

Studijní program: fyzika

Studijní směr: astronomie a astrofyzika

Ondřejov 2002

**DETEKCE ZÁBLESKOVÝCH
ZDROJŮ ZÁŘENÍ GAMA POMOCÍ
PŘÍSTROJŮ S CCD DETEKČÍ**

Martin Jelínek
Astronomický Ústav AV ČR

Upřímně děkuji všem, kteří mi pomohli při realizaci. Jmenovitě pak především René Hudcovi za mnohé cenné rady a za všestrannou pomoc. Petru Kubánkovi, Martinu Nekolovi, Liboru Švédovi, Ivaně Stoklasové, Radomíru Šmídovi, Janu Štroblovi, Davidu Ondřichovi a Martinu Topinkovi za obětavou pomoc při každodenním provozu dalekohledu BART.

m.

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 19. dubna 2002.

Martin Jelínek

SHRNUTÍ

Práce shrnuje aspekty detekce optických protějšků zábleskových zdrojů záření gama na snímcích ze širokoúhlých detekčních kamer.

První část nastiňuje problematiku gama záblesků s důrazem na jejich protějšky v jiných spektrálních oborech. Důraz se klade zejména na optické jevy.

Druhá část se zabývá zpracováním pozorovacího materiálu. Vzhledem k tomu, že se většinou jedná o snímky pořízené širokoúhlými CCD detektory robotických dalekohledů, jsou podrobněji rozebírány méně obvyklé postupy specifické pro jejich použití. Protože navíc podmínky pořízení takových snímků bývají málokdy dokonalé, věnuje se zvýšená pozornost fotometrii obtížně zpracovatelných snímků.

Následující část představuje robotický teleskop BART. Referuje o jeho primárním vědeckém zaměření, sekundárních cílech a o jeho možnostech. Diskutují se zde i některé konstrukční a softwarové detaily spojené s jeho provozem a správou dat, která pořizuje.

V závěru práce se prezentují vědecké výsledky dosažené BARTem — optická data pro pět gama záblesků pozorovaných BARTem jako odezva na hlášení sond. Z toho dvakrát byla optická data prvními na světě.

Diplomová práce má návaznost na mezinárodní projekt ESA INTEGRAL (Projekt ESA Prodex 14527), na projekt MŠMT KONTAKT ES002, na grant GA ČR 205/0145/99, a na projekt spolupráce AV ČR a CNR Itálie Výzkum zábleskových zdrojů záření gama.

Klíčová slova: gama záblesky, optické dosvity, optické transienty, pozorování, širokoúhlé systémy

Obsah

I.	Optické protějšky gama záblesků	1
1.1	Gama záblesky	1
1.1.1	Obecná charakteristika	1
1.1.2	Vysokoenergetická emise	3
1.2	Rozdělení poloh a jasností GRB	4
1.2.1	Pozorované rozložení	5
1.2.2	Skutečné polohy zdrojů	5
1.3	Nízkoenergetická emise GRB	6
1.3.1	Rentgenové protějšky	7
1.3.2	Detekce v optickém oboru	7
1.3.3	Radiová emise	8
1.4	Optické transienty a dosvity	8
1.4.1	Přímá optická emise gama záblesku	11
1.4.2	Optický dosvit	12
II.	Zpracování snímků	13
2.1	CCD fotometrie	13
2.1.1	Detekce objektů	14
2.1.2	Určení přístrojové magnitudy	14
2.1.3	Atmosférická extinkce	16
2.2	Přístroj bez filtru	19
2.3	Modelování pozadí snímků	22
III.	Pozadí CCD snímků	26
3.1	Rušivé jevy detekované CCD	26
3.1.1	Kosmické částice	26
3.1.2	Meteory	27
3.1.3	Lidská aktivita	28
3.2	Šum	28
3.2.1	Šum převodníku	29
3.2.2	Darkframe	29
3.2.3	Flatfield	30
3.3	Pozadí	30
3.3.1	Normální pozadí	31

3.3.2	Rozptýlené pozemské zdroje	31
3.3.3	Lokalizované pozemské zdroje	31
3.3.4	Měsíční světlo	32
IV.	Robotické alertní teleskopy	33
4.1	GCN	33
4.2	CCD alertní systémy	34
4.2.1	ETC	35
4.2.2	BART	35
4.2.3	BOOTES	36
4.2.4	TAROT	36
4.2.5	ROTSE	37
4.2.6	LOTIS	38
4.2.7	SUPER-LOTIS	38
4.2.8	Další	38
V.	Robotický teleskop BART	39
5.1	Historie	39
5.2	Cíle projektu	40
5.3	Pozorovací program	41
5.4	Konstrukce	42
5.5	Software	42
5.6	Problémy	43
5.7	Vyhlídky	45
5.8	Katalog objektů	46
5.9	Follow-up pozorování GRB	49
5.9.1	GRB 020124	50
5.9.2	GRB 020305	54
5.9.3	GRB 020317	57
5.9.4	GRB 020331	58
5.9.5	XRB 020406	60
5.9.6	Shrnutí	62
5.10	Monitoring	65
VI.	Diskuse	66
VII.	Závěr	70
VIII.	Obrazové přílohy	74

BACODINE	BAtse COordinates DIstribution NETwork
BART	Burst Alert Robotic Telescope
BOOTES	Burst Observer and Optical Transient Exploring System
CCD	Charge Coupled Device
ČR	Česká republika
GCN	GRB Coordinate Network
GNU	GNU is not Unix
GRB	Gamma-ray burst
HETE	High Energy Transient Explorer
IAU	International Astronomical Union
IAUC	IAU Circular
INTEGRAL	International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory
LINEAR	Lincoln Near Earth Asteroid Research
NF	Narrow-field
OA	Optical afterglow
OMC	Optical Monitoring Camera
OT	Optical transient
PSF	Point spread function
ROTSE	Robotic Optical Transient Search Experiment
RXTE	Rossi X-ray Transient Explorer
SAX	Satellite per Astronomia X
SNR	Signal-to-noise ratio
TAROT	Telescope a Action Rapide pour les Objets Transitoires
USA	United States of America
VLA	Very Large Array
VLT	Very Large Telescope
WF	Wide-field
XRB	X-ray burst

Tabulka 1: Použité zkratky

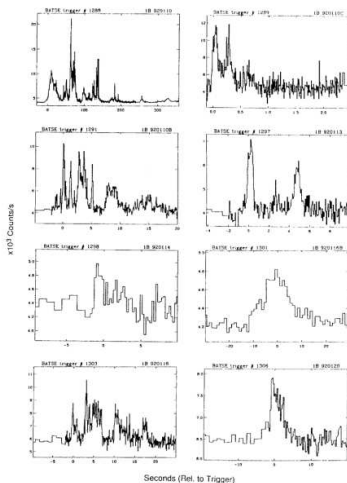
I. Optické protějšky gama záblesků

1.1 Gama záblesky

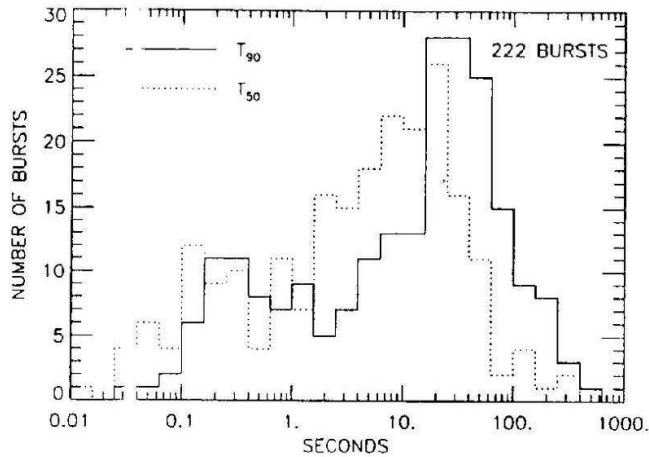
1.1.1 Obecná charakteristika

Záblesky gama¹ jsou jevy pozorované družicemi již od šedesátých let jako krátké, intenzivní výtrysky gama záření pocházející z kosmického prostoru. Gama záblesky svou emisí přesvítlí všechny ostatní zdroje gama záření na obloze včetně Slunce. Jedná se o jevy velmi rychlé, typická délka γ záblesku je mezi 0.01 a 100 s, nejkratší pozorované detaily časových profilů jsou na škále milisekund, nejdelší detekované záblesky měly délku kolem 1000 s.

¹ GRB = gamma ray burst



Obrázek 1: Několik ukávek světelných křivek gama záblesků z prvního katalogu γ záblesků BATSE (Fishman & Meegan, 1995).



Obrázek 2: Bimodalita rozdělení trvání γ záblesků. Kratší záblesky mívají tvrdší spektra (Fishman & Meegan, 1995).

Snahy o kategorizaci γ záblesků gama podle časových průběhů jejich intenzity narazily na obrovskou rozdílnost těchto křivek - vyskytují se jak pulzy krátké a jednoduché, tak dlouhé, hrotité. Byly nalezeny γ záblesky s několika vrcholy, s různými zvlněními i jednoduché a delší záblesky s relativně pozvolnou křivkou. Ukázka některých časových profilů GRB je na obrázku 1.

Přestože je velmi těžké vytvořit nějaké třídění γ záblesků podle časových profilů, lze profily velmi hrubě rozdělit do čtyř kategorií:

1. Jediný hrot
2. Plynulé emise jednotlivé nebo násobné s dobře rozpoznatelnými vrcholy
3. Více jasně oddělených hrotů nebo delších emisí
4. Nepravidelné a chaotické křivky a křivky s mnoha hroty

Důležitým výsledkem studia γ záblesků je rozlišení dvou různých typů těchto záblesků. Na distribuci dob trvání γ záblesků je vidět minimum kolem 2 s, které odděluje skupinu kratších záblesků od skupiny záblesků delších. Navíc se ukázalo, že kratší γ záblesky mají o něco tvrdší spektrum. Je možné, že se jedná o dva různé mechanismy vzniku jevu, ovšem s podobnými následky na okolní mezihvězdné

prostředí. O kratších záblescích se toho ví málo a jejich vnitřní mechanismus je předmětem spekulací. V současnosti je k dispozici větší množství pozorovacích dat pro delší γ záblesky díky *BeppoSAXu* s prahem detekce kolem 3 s.

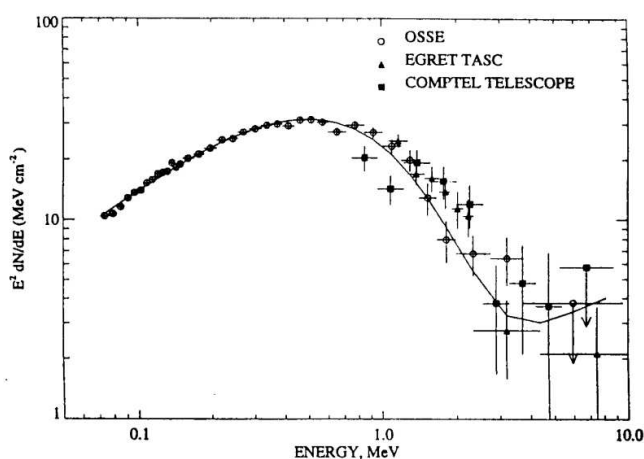
1.1.2 Vysokoenergetická emise

Naprostá většina energie gama γ záblesku je vyzářena v energiích nad 50 keV, tj. v oboru gama záření. Většina záblesků má spojité gama spektrum bez spektrálních čar, které má přibližně stejný tvar, ať je vzato v jediném okamžiku (tj. s minimální expoziční dobou), nebo je integrováno přes celou dobu trvání γ záblesku. Typické maximum spektra gama záblesku je kolem 600 keV, ale hodnota se může pro jednotlivé jevy značně lišit.

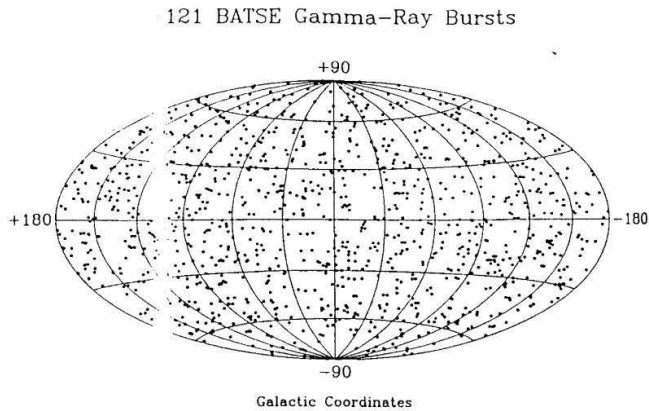
Obvyklým proložením spektra GRB je lomená mocninná funkce se zlomem v maximu. Spektrální čáry nebyly v gama spektrech γ záblesků prokázány.

1.2 Rozdělení poloh a jasností GRB

Pokud chceme zkoumat povahu zdrojů γ záblesků gama, měli bychom mít alespoň rámcovou představu o jejich vzdálenostech a tedy



Obrázek 3: Spektrum GRB 990601, pozorované *CGRO*. Představuje typické spektrum gama záblesku s maximem kolem 600keV (Fishman & Meegan, 1995).



Obrázek 4: Mapa rozložení γ záblesků gama po obloze (Fishman & Meegan, 1995).

i o energetické bilanci celého jevu. Otázka rozložení zdrojů gama záblesků ve vesmíru se dělí na dvě podotázky, rozložení vzdáleností zdrojů a rozložení poloh γ záblesků na obloze.

1.2.1 Pozorované rozložení

Rozložení poloh lze zkoumat poměrně jednoduše statistickými metodami, i když neznáme jednotlivé polohy γ záblesků zcela přesně. Ukazuje se, že jsou záblesky po nebeské sféře rozmístěny úplně rovnoměrně. Distribuci vzdáleností gama záblesků lze zkoumat jen nepřímou, jednak na ni lze klást určitá omezení plynoucí z úhlové distribuce, jednak lze počítat s distribucí jasnosti gama záblesků jako se složením luminozitivní funkce a vzdálenostní distribuce. Donedávna jsme neznali ani jednu ze složek distribuce jasností ani řádově.

Pozorování optických protějšků γ záblesků a jejich hostovských galaxií umožnilo změřit rudý posuv. Dnes je k dispozici kolem 30 takto proměřených gama záblesků (Greiner, 2002). Jejich rudé posuvy se pohybují v rozsahu kolem $z = 0.5$ – 2.0 se dvěma výjimkami: GRB 000131 má $z = 4.5$ a GRB 990425 má $z = 0.0085$.

Výběrové efekty působící na pozorování rudých posuvů jsou velmi silné — jednak se jedná pouze o γ záblesky dlouhé a velmi jasné, detekovatelné současnými sondami, jednak se optický protějšek daří nalézt jen u části jevů — takže je otázkou, zda je možné zjištění

zobecnit na celou šíři těchto jevů.

1.2.2 Skutečné polohy zdrojů

Původně bylo navrženo více různých modelů distribuce zábleskových zdrojů ve Vesmíru. V následujících odstavcích jsou shrnuty informace o nejčastěji uvažovaných modelech od nejbližších po vzdálené.

Sluneční okolí Nejbližší místo, kam se dá v okolí Slunce umístit zdroj gama záblesků, je v Oortově oblaku na hranici Sluneční soustavy. Zdroji γ záblesků v takových modelech by mohly být např. srážky komet nebo srážky komet s primordiálními černými dírami. Celý tento model je vysoce spekulativní a nepříliš pravděpodobný.

Galaxie Původně se předpokládalo, že záblesky vznikají v disku Galaxie. Zdroji by mohly být vysoce magnetizované galaktické neutronové hvězdy. (Ve vzdálenosti 1 kpc je potřebný výkon γ záblesku srovnatelný s Eddingtonovou jasností neutronové hvězdy 10^{38} erg/s.)

Míra izotropie v současnosti pozorovaného rozložení gama záblesků však takovýto model přesvědčivě vyřazuje vzhledem k tomu, že by jeho důsledkem musela být koncentrace slabých γ záblesků k rovině Galaxie.

Rozšířené galaktické halo Model kladoucí zdroje γ záblesků do tzv. rozšířeného galaktického hala. Jeho požadavek je společný tomuto zábleskovému modelu a některým modelům dynamiky galaxií. Jeho hlavní slabinou (zde) je nutnost vyrovnání koncentrace zdrojů k rovině galaxie mezihvězdnou extinkcí a (obecně) skutečnost, že se toto halo nepozoruje.

Vhodnými kandidáty na zdroje γ záblesků v rozšířeném galaktickém halu jsou (hypotetické) neutronové hvězdy vyvržené rychlostí 500–1000 km/s z Galaxie.

Vzdálený vesmír Výhodou kosmologických modelů je přímá interpretace izotropie zdrojů. Navíc i velmi jednoduché modely s konstantní svítivostí a bez vývoje zdrojů fungují poměrně uspokojivě. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost jevů (k „nakrmení“ γ záblesku s rudým posuvem $z = 1$ je zapotřebí energie cca 10^{51} erg/s

odpovídající jednomu anihilovanému Slunci!). Nedávné nalezení mateřských galaxií umisťuje přinejmenším zdroje delších gama záblesků do kosmologických vzdáleností.

1.3 Nízkoenergetická emise GRB

Pozorované nízkoenergetické opožděné emise souvisejí pravděpodobně s průnikem relativistické rázové vlny do okolní mezihvězdné hmoty. Tyto dosvity se pozorují v rentgenovém, ultrafialovém, viditelném a rádiovém oboru. Maximum energie vyzařovaných elektromagnetických vln postupně klesá, jak se pronikající rázová vlna zpomaluje. Maximum světelné křivky optického protějšku například podle řady teorií nenastává spolu s gama emisí, ale až po několika sekundách až minutách. Na místě optického protějšku gama záblesku je obvykle po jeho vymizení nalezena galaxie s aktivní tvorbou hvězd, vzácně se na stejném místě pozoruje supernova (GRB 980425) (Salomonson, 1998).

Má se proto za to, že delší γ záblesky souvisejí nějakým způsobem se supernovami, nebo že supernovy indukují. U galaxie a optického dosvitu je navíc možné změřit rudý posuv, takže je možné zjistit vzdálenost jevu.

O kratší a tvrdší skupině záblesků se v současné době víceméně spekulativně soudí, že jsou jejich původci splývající neutronové hvězdy obíhající v těsné dvojhvězdě.

1.3.1 Rentgenové protějšky

U většiny γ záblesků (90%) se v současné době daří detekovat rentgenové protějšky.

V rentgenovém oboru je možná astrometrie s přesností několika desítek úhlových vteřin.

Vzhledem ke snadnější detekci rentgenového záření ve srovnání s gama lze těchto protějšků využít k přesnější lokalizaci zdroje. Tento postup realizuje družice *BeppoSAX*, díky lokalizacím zpřesněným pozorováním rentgenových protějšků bylo poprvé možné hledat optické dosvity.

1.3.2 Detekce v optickém oboru

V optickém oboru se rozlišují dva typy emisí. Dříve prokázané, tzv. dosvity (afterglows) se detekují velkými dalekohledy se zpožděním

několika hodin až dnů. V současné době se daří tyto dosvity nacházet poměrně často.

Teoreticky byly předpovězeny tzv. transienty², které mají výrazně rychlejší průběh a z nichž byl doposud prokázán jediný u GRB 990123.

Optické protějšky jsou detailně diskutovány v části 1.4 na str. 8.

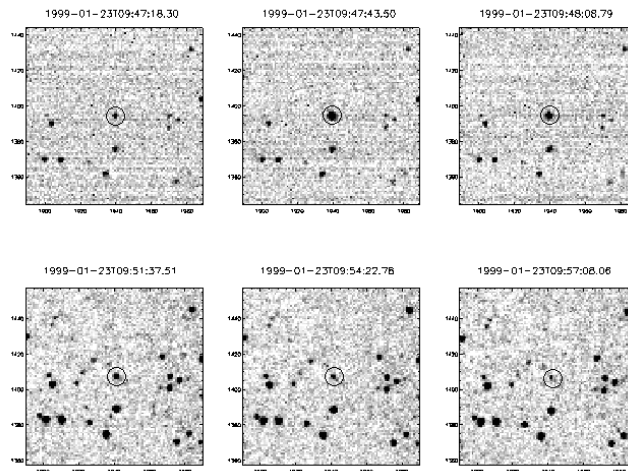
1.3.3 Radiová emise

Detekují se rovněž rádiové protějšky gama záblesků. Pomocí radio-teleskopu VLA se daří lokalizovat tyto transienty s chybou několika desetin úhlové vteřiny. U rádiových dosvitů se prokazatelně vyskytuje opožděná emise (GRB 000911, Berger et al, 2000; VLA).

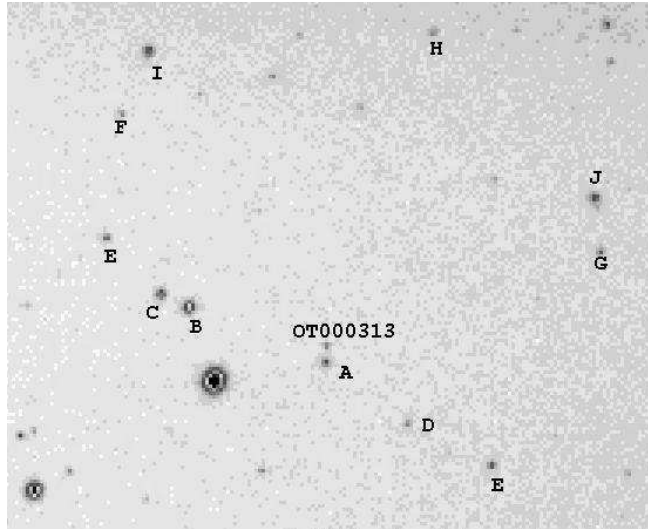
1.4 Optické transienty a dosvity

Jako první identifikace GRB s objekty v optickém oboru spektra byly detekovány tzv. optical afterglows, Optické Dosvity. Jde vlastně o opožděnou nízkoenergetickou emisi následující po vlastním jevu a dobře odpovídající všeobecně přijímanému modelu relativistické oh-

² aka prompt flashes



Obrázek 5: První průkazný detekovaný optický transient OT 990123 z ROTSE.



Obrázek 6: Snímek OT 000313 ze širokoúhlé kamery BOOTES.

nivé koule³ (Sari et al., 1998; Mészáros & Rees, 1997). Pro jevy detekované družicí BeppoSAX se optické dosvity nalézájí asi v polovině jevů a jejich jasnosti se na škále řádově hodin až dní po GRB pohybují mezi asi 18. až 24. magnitudou. Pro několik málo dosvitů existují náznaky přítomnosti světelné křivky supernovy v závěrečné fázi poklesu optického dosvitu. Dosvity se většinou nalézájí ve slabých mateřských galaxiích ve velkých vzdálenostech a zřejmě souvisejí s oblastmi tvorby hvězd.

Mezi další optické projevy gama záblesků patří rovněž teoreticky předpovězená přímá optická emise, která byla poprvé potvrzena pro GRB 990123. Přechod mezi transientem a dosvitem není spolehlivě prostudován a možná není plynulý s ohledem na odlišné fyzikální pozadí obou procesů (přímý a reverzní šok v modelu relativistické ohnivé koule, fireballu). Právě optická data typu dat z experimentu BART či BOOTES by mohla poskytnout více informací k pochopení fyzikálních procesů souvisejících s přímými transienty.

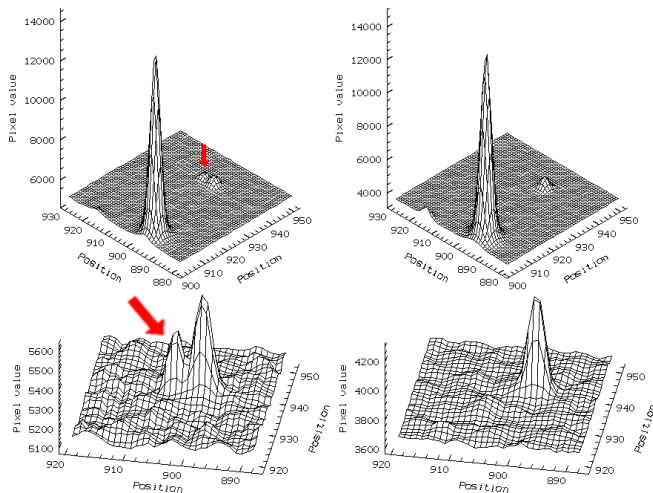
Zatímco dosvity se dnes detekují běžně velkými optickými teleskopy řádově hodiny až dny po GRB, jediný dosud prokázaný transient byl nalezen širokoúhlým alertním systémem ROTSE. Je šance, že podobné jevy nalezne též BART a BOOTES a tato data přinesou

³ relativistic fireball :)

další podstatný pokrok v chápání optických transientů, zejména odpověď na otázku, nakolik je OT GRB 000123 (Akerlof et al., 1999a) typickým transientem či nikoli.

Zajímavým problémem, který mohou CCD alertní systémy se širokým zorným polem rovněž pomoci řešit, je otázka tzv. orphan afterglows, čili optických dosvitů — sirotků. Jde o teoreticky předpovězené jevy, při nichž je úzce kolimovaná gama emise směřována mimo Zemi, zatímco méně kolimovaná optická emise již je ze Země viditelná. Jejich detekce a studium by mohlo podstatně přispět ke statistice i fyzikálnímu pochopení GRB a jejich dosvitů. Důležité je, že s ohledem na odlišnou kolimaci by se dosvitů sirotků mohlo pozorovat mnohem více než klasických dosvitů s pozorovatelnou GRB emisí.

Dnes je v provozu již několik širokoúhlých alertních systémů pro rychlou detekci optických projevů GRB, a to TAROT ve Francii, LOTIS a ROTSE v USA, a BOOTES ve Španělsku. BOOTES je přitom společný španělsko-český experiment. Později se přidal i BART v Ondřejově. Zatím detekoval ROTSE jediný definitivně prokázaný optický transient gama záblesku a BOOTES dva pravděpodobné kandidáty. Analýza dat z těchto systémů je velmi obtížná se řadou specifik, v astronomii vesměs nových, a je mj. i cílem této diplomové



Obrázek 7: 3D nákresy intenzitní matice snímku s OT 000313 vlevo snímek s OT, vpravo o 55 minut později. (obrázky Jiří Polcar, použito s laskavým svolením autora)

práce tyto problémy analyzovat a řešit.

O tom, jak je toto pro vlastní vědeckou aplikaci důležité, svědčí fakt, že většina dosud pořízených dat z uvedených CCD alertních systémů zůstává dodnes nezpracována, anebo zpracována se spornými výsledky. Typickým sporným výsledkem všech týmů je přítomnost falešných jevů imitujících reálné transienty, tedy protějšky GRB. Opět jde o specifikum dané problematiky aplikace širokoúhlých CCD systémů.

1.4.1 Přímá optická emise gama záblesku

GRB 990123 První detekovaný optický transient byl nalezen na snímcích ROTSE, jejichž expozice začala 22.18s po GRB triggeru, byl zachycen dokonce nárůst magnitudy mezi prvním a druhým snímkem (Akerlof et al., 1999b). Šest prvních snímků viz obr. 5. Viz též (Akerlof et al., 1999a).

GRB 000313 Optický transient nalezen pro slabý GRB 000313, BATSE trigger 8035, a to širokoúhlou kamerou BOOTES 1 v čase March 13.8868 UT, 4 minuty po záblesku. Jde o 5 minutovou expozici v I filtru. Objekt má 10. magnitudu a na snímku pořízeném 55 minut později již není, jeho profil odpovídá profilu ostatních hvězd podobné jasnosti a ani další analýzy neprokázaly že jde o jev pozadí. Astrometrie objektu byla pořízena s přesností na 3". Vzhledem k tomu, že byl objekt nalezen na jediném CCD snímku (BOOTES pořizoval spirálu snímků a než se znovu dostal na tuto pozici, uplynulo oněch 55 minut a objekt nebyl znovu nalezen), zůstane bohužel tato detekce nadále nejasnou. Jestli budou v budoucnu k dispozici prověřené modely optických transientů, bude ji snad možno prokázat.

Na místě tohoto kandidáta nebyl později nalezen optický dosvit ani velikými dalekohledy, těžko tím lze úplně vyloučit reálnost objevu, neboť optický dosvit delšího trvání se nedaří nalézt ani u mnohých jiných velmi dobře lokalizovaných záblesků (Castro-Tirado et al., 2002).

1.4.2 Optický dosvit

Dlouhé gama záblesky bývají provázeny opožděnou rentgenovou, optickou a rádiovou emisí. Předpokládá se, že se jedná na všech vlnových délkách o tentýž jev, vznikající jako reakce na gama záblesk

v okolním prostoru.

První dosvit gama záblesku se pozoroval u GRB 970228, který trval 80 s, byl následován rentgenovým (Costa et al., 1997) a optickým (van Paradijs et al., 1997) dosvitem. Optický dosvit se nacházel v malé vzdálené galaxii s rudým posuvem $z = 0.695$ a brzy se ukázalo, že se pro většinu pozorovaných optických dosvitů podaří nalézt takovou hostovskou galaxii. Rudý posuv optického dosvitu se v několika případech podařilo určit i přímo ze spektra dosvitu, což není vždy možné, neboť spektrum dosvitu bývá prosté jakýchkoli projevů a sleduje prostou mocninnou závislost:

$$L = \tau^{-\alpha} \nu^{-\beta}.$$

Zde je τ čas od vrcholu gamma emise, ν je frekvence, α se nazývá temporální index a β je spektrální index. Tato rovnice vystihuje *empiricky* spektrální a časové chování optického dosvitu. Chování ve vzdálené infračervené oblasti není prozkoumáno kvůli absorpci takového světla v atmosféře.

Světelná křivka záblesku ovšem nemusí být takovouto prostou mocninnou závislostí — vyskytuje se na ní obvykle několik málo zlomů. Uvedená rovnice však velmi dobře popisuje chování dosvitu mezi těmito zlomy, speciálně pak v období mezi desítkami hodin a několika dny po gama záblesku. Chování světelné křivky v období prvních desítek minut po gama záblesku není dobře prostudováno a není jasné, zda je přechod mezi přímou emisí (jako z ROTSE) a optickým dosvitem plynulý. Jsou náznaky, ukazující na silnější emisi v počátečních fázích optického dosvitu (viz diskusi GRB 020331 na str. 58). V pozdějších fázích dosvitu dochází ke zlomu mocninného poklesu a zrychlení poklesu a ještě později k pozvolnému přechodu do konstantního jasů hostovské galaxie.

II. Zpracování snímků

2.1 CCD fotometrie

Určování jasností objektů se v astronomii nazývá fotometrií. V minulosti se prováděla buď fotometry nebo proměřováním fotografického materiálu. Obě metody mají stále svůj prostor, ve kterém se využívají. Fotografie má z hlediska dnešního použití výhodu možnosti velmi širokého pole. Především však existují obrovské archivy astronomických snímků, které jsou samozřejmě fotografické. Fotografické desky se dnes často skenují a zpracovávají metodami podobnými metodám CCD fotometrie. Klasické fotometry stále nacházejí uplatnění ve spektrálních rozsazích, pro které nejsou CCD detektory k dispozici. S klasickými fotometry je také možná fotometrie s větší přesností a bez prodlevy na vyčítání detektoru. Bližší popis principu a funkce CCD čipu viz (Martinez & Klotz, 1998).

Na snímku z CCD detektoru je obraz rozložen do dvojrozměrné matice pixelů⁴. Každý pixel má svou integrální hodnotu, určenou intenzitou světla, které dopadalo na odpovídající plochu detektoru v době expozice. Závislost hodnoty pixelu (ADU) na osvětlení je v širokém rozsahu lineární.

Zpracování astronomického snímku *redukce* se obvykle dělí na dva kroky. Nejdříve se zjišťují polohy hvězd, tj. astrometrie, a teprve poté se provádí fotometrie detekovaných objektů.

2.1.1 Detekce objektů

Hvězda nebo jiný bodový zdroj se kvůli chvění atmosféry a kvůli ohybu světla na vstupní pupile dalekohledu zobrazí na detektor jako malý kroužek s intenzitou klesající od středu k okraji.

⁴ pixel=picture element, prostě kousek obrazu:)

Tento obraz nazýváme rozptylovou funkcí bodu (PSF). Tvar PSF závisí na geometrii dalekohledu a povětrnostních podmínkách. O PSF se předpokládá, že má na celém snímku stejný tvar a že se pro jednotlivé hvězdy liší jen její výška. Tedy

$$PSF = I \times PSF_0.$$

Na detekci hvězd na snímku se dá použít mnoho různých algoritmů. Odlišují se složitostí a robustností, ale někdy i jen rychlostí. Nejjednodušší metodou je *metoda konstantního prahu*, při které se stanoví určitý konstantní odstup od průměrné hodnoty pozadí a každá souvislá oblast vyčnívající nad práh se považuje za hvězdu. Za polohu objektu se považuje těžiště pixelů, které považujeme za obraz hvězdy. Přírodním vylepšením této je *metoda proměnného prahu*. Krom prahování se dá na detekci použít také několik způsobů detekce vrcholů. Za zmínku stojí zejména *metoda stékání*, která je výpočetně málo náročná a hodí se na zpracování snímků v reálném čase (Křolupper, 2001).

Tvar obrazu hvězdy daný cestou světla na CCD nazýváme rozptylovou funkcí bodu. Její závisí na geometrii dalekohledu a povětrnostních podmínkách a dalších vlivech. O PSF se předpokládá, že má na celém snímku stejný tvar a že se pro jednotlivé hvězdy liší jen její výška. Tedy

$$PSF = I \times PSF_0.$$

2.1.2 Určení přístrojové magnitudy

Aperturní fotometrie Při AF se přímo sčítají obsahy (ADU) jednotlivých pixelů obrazu hvězdy. Základní problém aperturní fotometrie je „kde přestat“, neboli jak daleko od středu objektu již můžeme považovat úroveň pixelu za úroveň pozadí a skončit sčítání pixelů. Rozumným vodítkem při tomto rozhodnutí je minimalizace poměru signál/šum:

$$SNR = \frac{N_*}{\sqrt{N_* + n(N_\beta + N_\delta + N_\rho^2)}}.$$

Zde N_* je počet fotonů spočítaných při měření hvězdy, n je počet použitých pixelů, N_β je intenzita pozadí, N_δ je temný proud a N_ρ je vyčítací šum detektoru. Cílem je vybrat takovou aperturu, pro kterou je poměr signál/šum nejmenší.

Metodu aperturní fotometrie lze vylepšit využitím subpixelového rozlišení a využitím určité znalosti PSF. K dosažení minima SNR se pak nevybírání jen nejlepší apertura, ale postupuje se po jednotlivých pixelech podle jejich klesající intenzity na modelu PSF. Na rozdíl od metody fitu se zde ale nepoužívá fitování PSF, jen její znalost, které lze dosáhnout i bez použití dále popsanych metod.

Základní nevýhodou aperturní fotometrie je její problematické použití v případě blízkých hvězd (na ploše snímku). Pokud jsou totiž PSF hvězd příliš blízko u sebe, dostává obraz první hvězdy nezanedbatelný příspěvek světla od hvězdy druhé a aperturní fotometrie poskytuje špatné výsledky.

Fit PSF Jiný přístup představuje metoda fitu PSF. Při tomto postupu se pomocí metody nejmenších čtverců hledá model rozptylové funkce. Její integrál je potom výsledkem fotometrie:

$$N_* = \int_0^\infty PSF dr$$

Možnou funkcí pro model je například dvojrozměrná Gaussova funkce $\exp(-r^2)$, vhodná je také převrácená druhá mocnina ošetřená proti nekonečnu ve středu $1/(1+r^2)$, nebo její mocnina $1/(1+r^2)^\gamma$

Aby bylo možné tyto funkce „nasadit“ na skutečné obrazy získané z CCD, je nutné je přepsat do následujících tvarů:

$$PSF = I e^{-\frac{1}{R}[(x-X_0)+(y-Y_0)]^2} + B$$

respektive

$$PSF = \frac{I}{\left(1 + \frac{(x-X_0)+(y-Y_0)^2}{R^2}\right)^\gamma} + B$$

I je zde intenzita ve vrcholu funkce, X_0 a Y_0 reprezentují polohu středu, tj. předpokládanou polohu hvězdy. B je úroveň pozadí.

R a γ jsou parametry vystihující PSF po celém snímku, konkrétně R vystihuje „šířku“ funkce. Tyto parametry je možné získat z několika vhodných hvězd na začátku zpracování. Při celkovém zpracování pak už je možné měnit polohu a intenzitu PSF. Rovněž je těchto parametrů možné použít při rozlišování hvězd od malých difúzních objektů nebo od parazitních jevů.

Metodu je možné používat při fotometrii blízkých skupin hvězd. Postup je přímočarý, stačí fitovat funkci získanou sečtením více PSF s

různými parametry středu. Také je možné ji (byť s určitou rezervou) použít k fotometrii saturovaných hvězd.

Podstatnou nevýhodou této metody je její výpočetní náročnost. Ve srovnání s aperturní fotometrií se přesnost výsledků příliš neliší. Důležité je však její použití na hustá pole nebo při fotometrii jednoho ze dvou nepříliš vzdálených objektů. Důležité je její uplatnění při posuzování charakteru objektu; zde se nemusí nutně používat jako hlavní metoda, ale jako metoda vhodná k odlišení falešných detekcí v případě sporného výsledku.

2.1.3 Atmosférická extinkce

Atmosféra země rozptyluje světlo. V astronomii se v tomto smyslu hovoří o tzv. atmosférické extinkci, která je v nejširším smyslu zeslabením intenzity záření jako výsledek absorpce a rozptylu zemskou atmosférou. Oba tyto procesy omezují tok daného paprsku světla (rozptýlí se zhruba šestina kolmo dopadajícího viditelného světla).

Atmosférická extinkce sestává z **absorpce** (při které se foton pohltí a jeho energie se předá molekule atmosféry, což může vést k pozdější emisi, případně rozbití molekuly) a z **rozptylu** (rozptyl znamená změnu směru paprsku světla jako důsledek interakce s částicemi různých rozměrů). **Rayleighův rozptyl** je rozptyl na částicích vzduchu, je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky (blízko $\lambda^{-4.1}$) a způsobuje jednak to, že je denní obloha modrá a jednak zčervenání např. Slunce nízko nad obzorem. Větší částice způsobují rozptyl prakticky nezávislý na vlnové délce, který se projevuje jako mlžný zákal.

Rozptyl tedy závisí na vlnové délce, a to především v tom smyslu, že červená strana spektra je z hlediska extinkce mnohem méně problematická než modrá. Kolem zenitu je extinkce ve vizuální oblasti přibližně 15%, směrem k modré se zesiluje a dosahuje 100% pod 290 nm. Směrem do červené oblasti se s výjimkou molekulárních pásů extinkce snižuje pod 10%.

Vzdušná hmota Pro zeslabení světla průchodem atmosférou platí *Bouguerův zákon*

$$m(\lambda, h_0) = m(\lambda, h_1) + k(\lambda)X(z) \quad (1)$$

Extinkce postihující monochromatickou magnitudu je úměrná vzdušné hmotě. $k(\lambda)$ se nazývá **koeficient extinkce** na vlnové délce λ .

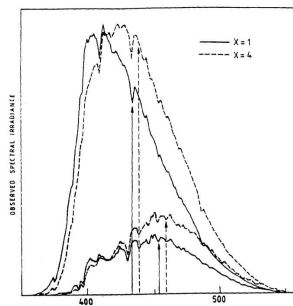
Vzdušná hmota X je definována jako poměr, kolikrát více vzduchu je vidět ve směru pozorování než v zenitu. X závisí na cestě paprsku, která je v každé výšce h určena směrem z . Lze tedy napsat, že $X = X(z_0)$, totiž, že je vzdušná hmota funkcí *zdánlivé* zenitové vzdálenosti a nadmořské výšky pozorovatele h_0 . Pro malé zenitové vzdálenosti se může atmosféra považovat za tenkou vrstvu konstantní hustoty a v tomto přiblížení je pak X jednoduše secansem zdánlivé zenitové vzdálenosti.

Ve velkých zenitových vzdálenostech komplikují přesný výpočet vzdušné hmoty zakřivení atmosféry, atmosférická refrakce a variace hustoty atmosféry s výškou.

Bemporad (Bemporad, 1904) vypočítal vzdušnou hmotu pro sférickou atmosféru; bral v úvahu ohyb refrakcí a předpokládá konstantnost koeficientu κ na jednotku hmoty. Jak jsme viděli, druhý předpoklad umožňuje definici kvantity $X(z)$ nezávislé na λ . Na základě Bemporadových tabulek byly vytvořeny interpolační rovnice, které se ve fotometrii běžně používají. Z nejdříve používaných rovnic Hardie (Hardie, 1962) uvádí následující polynom třetího řádu

$$X = \sec z - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3 \quad (2)$$

Hardie ovšem používá **skutečnou** zenitovou vzdálenost, tj. hodnotu zenitového úhlu v nepřítomnosti atmosférické refrakce, zatímco Bemporadovy tabulky používají jako argument **zdánlivou** zenitovou



Obrázek 8: Forbesův efekt Křivky spektrální odezvy v B filtru pro hvězdu třídy O a M opravené o střední monochromatickou extinkci. Plnou čarou je vyznačena odezva při vzdušné hmotě $X = 1$, čárkovaně pro $X = 4$. šipkami je označena efektivní vlnová délka filtru (Sterken & Manfroid, 1992).

vzdálenost. Tato snaha o vzdušnou hmotu s velikou přesností byla vedena nadějí, že by se mohla vrátit ve zpřesnění fotometrických výpočtů. Mnoho faktorů však přispívá k tomu, že tato naděje je marná.

Jako rovnici používající skutečnou zenitovou vzdálenost dávající uspokojivé výsledky v souhlasu s Bemporadovými výsledky pro vzdušnou hmotu do 4 zavádí (Young & Irvine, 1967)

$$X_t = \sec z_t (1 - 0.0012(\sec^2 z_t - 1)). \quad (3)$$

Barevná extinkce Spojitá část monochromatické extinkce se monotonně zvyšuje směrem k modrým a ultrafialovým částem spektra. Uvažujeme-li heterochromatickou fotometrii, jsou měření na modré straně pásma ovlivněna více než ta na straně červené. Výsledný efekt je, že když se hvězda pozoruje ve větší zenitové vzdálenosti, jeví se červenější: efektivní vlnová délka se přesouvá k červené a efektivní šířka pásma se zužuje. Jinými slovy: **velkou vzdušnou hmotou se zvyšuje monochromaticnost z důvodu progresivního odstraňování kratších vlnových délek extinkcí**. Kvůli této změně šířky pásma má každé další zvětšení vzdušné hmoty stále menší a menší příspěvek k extinkci. Tento jev, známý jako forbesův efekt ilustruje obr. 8.

Hvězdy různých barev dávají různé výsledky, modré hvězdy jsou ovlivněny více než červené. To ukazuje, že širokopásmová fotometrie je sama o sobě mnohem komplikovanější než její monochromatická kolegyně. S problémy spojenými s monochromatickou extinkcí a Forbesovým efektem se lze vypořádat několika postupy.

První metodou je se ničím hlouběji nezabývat a jednoduše používat jediný barevný index a psát

$$m(h_1) = m(h_0) - (k + \hat{k}CI)X(z) \quad (4)$$

Koeficient \hat{k} se nazývá **extinkční koeficient druhého řádu** kdežto k se nazývá **hlavní extinkční koeficient**. Tato metoda je nejstarší a nejjednodušší metodou používanou od dob fotografické fotometrie a v některých případech dodnes. Na získání přesnějších výsledků se však nehodí.

Aby byla možná přesnější korekce (tj. barevná transformace na atmosférou nemodifikovaný filtr), je zapotřebí znát u měřeného objektu spektrální profil a jeho derivace.

2.2 Přístroj bez filtru

Přístroj bez filtru se chová jako přístroj s (velmi) širokopásmovým filtrem, navíc bez možnosti jeho změny. Plyne z toho omezená možnost korigovat měření jasnosti o barevnou extinkci.

Barevná extinkce na velkých zenitových vzdálenostech za zhoršených pozorovacích podmínek může dosáhnout až několika magnitud.

Použijeme-li ke korekci pouze extraatmosférické barevné koeficienty (pomiňme teď, kde je vezmeme — třeba je od někoho dostaneme), máme metodu sice v principu nesprávnou, ale dávající rozhodně lepší výsledky, než pokud bychom se k měření chovali jako k monochromatickému.

První problém přístroje bez filtru je tedy nesamostatnost — neschopnost vytvořit si vlastní absolutní fotometrii. Na to je zapotřebí nejméně dvou, lépe však tří nebo více rozumně vzdálených filtrů.

Druhý problém spočívá v nemožnosti navázat nefiltrovaný systém na měření jinými přístroji. Vzhledem k tomu, že neznáme barevné indexy měřeného objektu, nemáme základní informace nutné ke transformaci mezi fotometrickými systémy a tedy nemůžeme srovnat svoje měření s kýmkoli jiným.

Řešení tohoto problému je částečně možné tehdy, máme-li možnost odhadnout barevný index objektu. To je případ optických protějšků záblesků gama, které mají konstantní spektrální index, a je to také případ, kdy měříme proměnnou hvězdu známého typu. Naopak se takového odhadu nemůžeme dopustit u objektů jako jsou novy, supernovy a aktivní galaxie, jejichž barevný index se nepředpověditelně vyvíjí v čase.

Zavedení magnitudy pro detektor bez filtru Předpokládá se, že se jasnost v systému přístroje dá vyjádřit jako funkce standardních jasností. Úplně jednoduše např.

$$m_p = m_A + k(m_B - m_A), \quad (5)$$

kde m_p je magnituda v barevném systému přístroje, m_A a m_B jsou magnitudy v nějakých vhodných⁵ fotometrických systémech a k je konstanta. Vztah je nejjednodušším možným případem barevné

⁵ *Vhodný* může znamenat ledacos. Míním zde např. jednoduchost vyjádření m_p či dostupnost katalogu.

transformace, obecně lze vytvořit libovolný vzorec umožňující převod mezi danými systémy.

Kalibrace fotometrie se provede tak, že se nejprve pomocí několika vybraných hvězd spektrálního typu A0 určí jasnost objektů v systému přístroje. Druhým krokem je vlastní navrzení a určení kalibrační funkce. Ta pak reprezentuje návaznost systému přístroje na obvyklé fotometrické systémy. Návaznost je, jak bylo výše řečeno, jednosměrná s výjimkou několika málo speciálních případů, kdy lze z charakteru objektu očekávat jeho barevný index.

Závěr Závěrem budiž řečeno, že CCD detektoru bez filtru se používá proto, že filtr omezuje citlivost zařízení. Používá se tehdy, je-li tato citlivost přednostnější, než přesná fotometrie ⁶. Ač by se totiž mohlo z předchozího zdát, že je i s nefiltrovaným přístrojem možno dosáhnout určitých výsledků, vycházejí tato tvrzení ze zjednodušených tvrzení o barevné extinkci a dosažitelná přesnost takovýchto měření nemůže dosahovat přesnosti lepší než řádově desetin magnitudy.

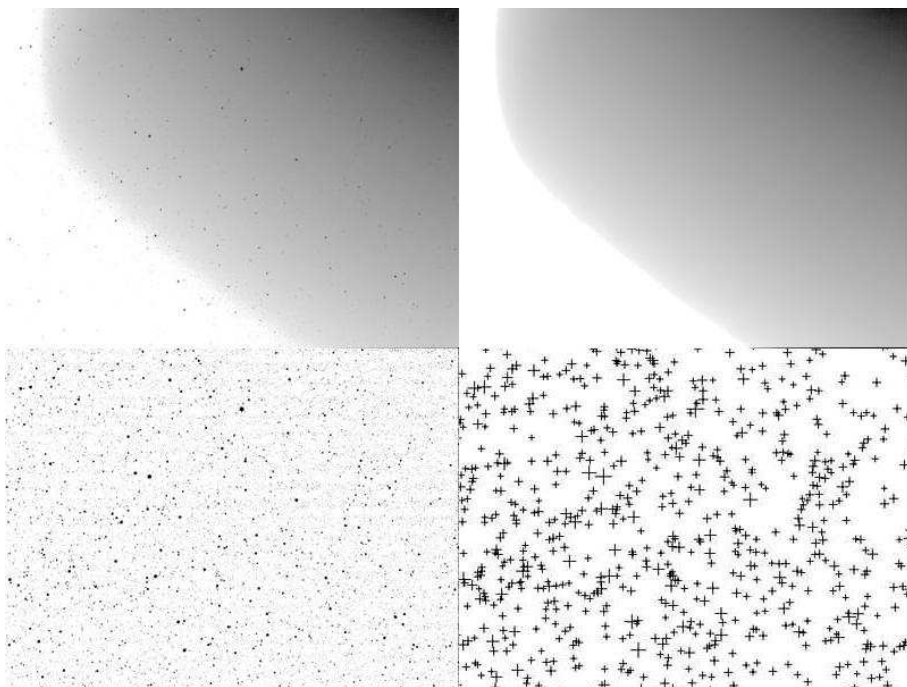
⁶ To je u alertních systémů tohoto druhu běžné, primárním cílem je detekce, pak astrometrie, fotometrie až na třetím místě a v případě *neexistence* dosvitu může znalost polohy vést k nalezení místa původu záblesku (např. mateřské galaxie) a možnosti určení vzdálenosti.

2.3 Modelování pozadí snímků

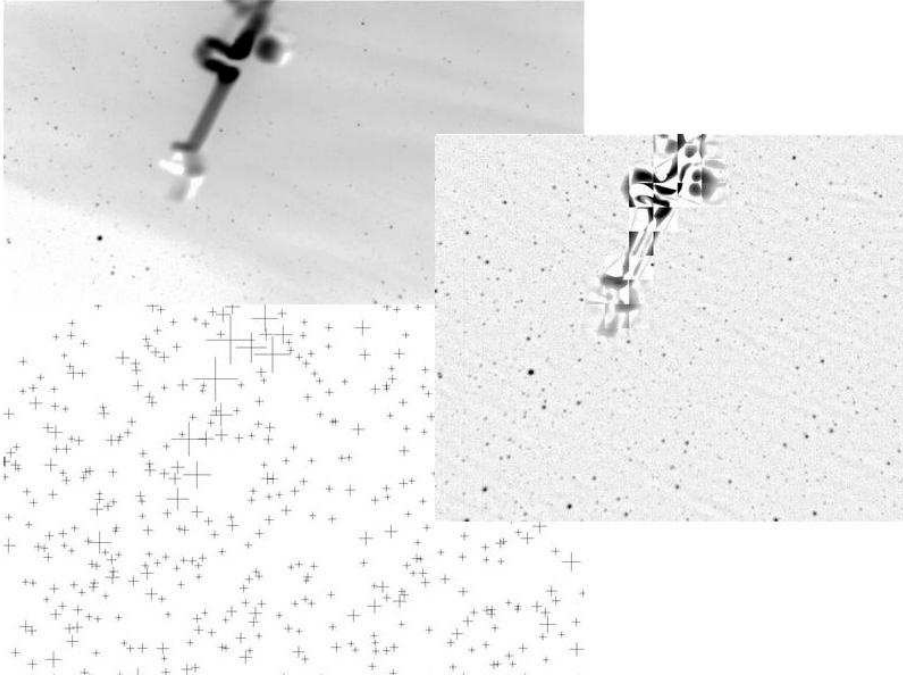
Při fotometrii „nefotometrovatelných“ snímků se často dostáváme do situace, kdy má snímek boční přísvit nebo jsou na něm mraky. Oba tyto jevy se projevují zvýšeným nerovnoměrným pozadím snímku.

Standardní fotometrie takového snímku dává špatné výsledky hned z několika důvodů. Oblačnost vede ke změně PSF a tím k velikému zesložitění metody jejího fitu, rozptylová funkce se velmi rozšíří a její nižší okraje již nejsou zanedbatelné a přispívají k intenzitě pozadí, která je proměnná, protože zpracováváme širokoúhlý snímek a máme rozdílnou vrstvu oblačnosti na různých místech snímku. Další zhoršení situace a praktické znemožnění deterministického matematického modelu způsobují okolní zdroje světla, které jsou rovněž rozptýleny na oblačnosti a které situaci ještě více komplikují.

Návrh řešení tohoto problému spočívá v modelování pozadí snímku pomocí metod nejmenších čtverců. Realizace takového modelu na celé ploše snímku současně by sice byla optimálním řešením, ale



Obrázek 9: Příklad odečtení modelu bočního přísvitu. Vlevo nahoře je původní snímek, vpravo nahoře model pozadí, vlevo dole je snímek po odečtení modelu a vpravo dole jsou vyznačeny křížky detekované hvězdy.



Obrázek 10: Příklad korekce snímku s mraky.

jeho složitost co do obtížnosti realizace a výpočetní náročnosti by byla neúnosná. Zvolil jsem proto postup, při kterém se pozadí modeluje po částech, čtvercích o definovatelné délce strany (standardně 128x128 bodů). Fitovaná funkce může být buď rovina nebo paraboloid. Modelování paraboloidu se ukázalo jako účinnější, ale také jako výpočetně náročnější. Hledaná funkce vypadá takto:

$$I_B = Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F,$$

nebo takto

$$I_B = Dx + Ey + F; A = B = C = 0.$$

Model pozadí se hledá tak, že se nejprve vytvoří model vystihující všechny body políčka, hvězdy se poznají podle toho, že jsou velmi intenzivní, a proto budou z modelu vyčnívat. Všechny body obrazu se setřídí vzestupně podle odchylky od modelu a konec tohoto seznamu se již při dalším zpracování nepoužívá. Je třeba to však dělat citlivě, aby se neodstříhl nějaký kus pozadí. Iterativně se pak pokračuje vytvořením nového modelu a zastřížením, dokud

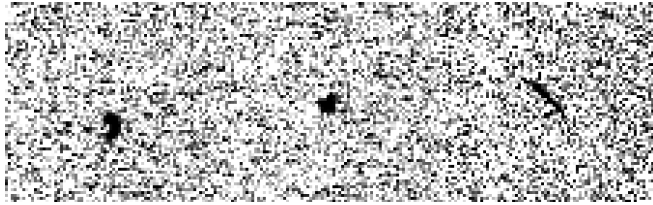
se nedosáhne uspokojivého fitu, nebo maximálního počtu iterací. Z malých kousků se poskládá celá plocha modelu.

Model pozadí se od obrazu odečte a uschová se pro pozdější použití. Detekce hvězd pak může proběhnout standardním způsobem, protože nerovnoměrnost pozadí je malá. Fotometrii je nejlepší provést aperturní, na takto postiženém snímku obvykle nebývá tak velké množství hvězd jako na snímku čistém, aby aperturní fotometrie narazila na své meze v hustých polích. Modelování PSF je v tomto okamžiku znemožněno, protože jsme ji při odečtení pozadí nejspíše zdeformovali.

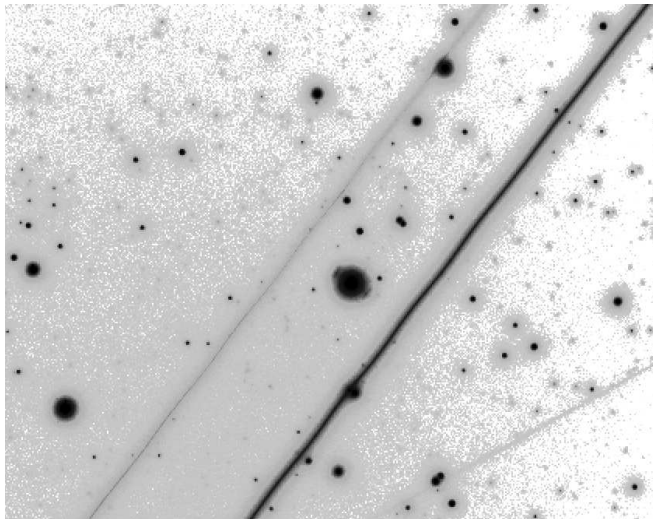
Při kalibraci fotometrie použijeme katalog. Referenční hvězdy nám poslouží při modelování průběhu odezvy na intenzitě pozadí a původní magnitudě hvězdy. Opět použijeme metodu nejmenších čtverců na fit

$$m = F(m_s, I_B)$$

závislosti reálné magnitudy hvězdy na intenzitě modelu pozadí a magnitudě určené ze snímku. Na základě tohoto fitu lze relativně spolehlivě (vzhledem k situaci) určovat jasnosti ostatních hvězd.



Obrázek 11: Příklady stop po kosmických částicích na temných snímcích z experimentu BOOTES.



Obrázek 12: Průlet letadla snímkem WF kamery teleskopu BART, objekt uprostřed je záblesk navigačního majáku. Toto letadlo je velmi nízko, pokud by bylo ve větší výšce, nebyl by jeho obraz rozeznatelný od hvězdy.

III. Pozadí CCD snímků

3.1 Rušivé jevy detekované CCD

3.1.1 Kosmické částice

CCD snímače jsou velmi citlivé na kosmické částice, zejména energetické miony, které jsou velmi pronikavé. Ty způsobují na snímcích kulaté nebo oválné (výjimečně různě zatočené) stopy, které se někdy podobají obrazu hvězdy. Snadno rozlišitelný je výskyt jejich stop na temných snímcích, kde se dá eliminovat mediánováním několika obrazů. Veliký problém naproti tomu představují kosmické částice při detekci rychle proměnných objektů, jako jsou optické protějšky gama záblesků. V mnoha případech je sice stopa rozlišitelná podle tvaru, ale v některých případech nelze jednoznačně rozhodnout, jestli se na snímku jedná o skutečně pozorovaný jev nebo o stopu kosmické částice.

Zjistit, kolik částic se přibližně zachytí na CCD detektor není ve skutečnosti nijak složité, předpokládáme-li, že je rozdíl pravděpodobnosti, že se částice dostane za závěrku kamery zanedbatelná. Zatímco totiž na snímku s hvězdami je možnost rozlišit kosmickou částici vázaná na její zjevnou asymetrii, na temném snímku můžeme předpokládat, že cokoli, co se exponuje, je kosmická částice⁷. Temné snímky lze také velice jednoduše načíst do prohlížeče a vizuálně prohledávat a hledat výskyty stop po částicích.

Toto jsme udělali se 26 darkframy ze všech tří kamer experimentu BOOTES. Celkem byly snímky exponovány 11260 sekund a podařilo se na nich nalézt 33 stop po kosmických částicích. Téměř dvě třetiny (20) mělo vzhled drobné hvězdy. Všechny tři dalekohledy používají kamery SBIG ST8 o ploše 127 mm².

⁷ Nebo jiný zjev podobného charakteru, ale v důsledku je vlastně jedno, jestli ty falešné detekce způsobí mion, nebo skřítek.:

Jednoduchým výpočtem dostaneme průměrný počet detekovatelných částic, které dopadnou na 1cm^2 kamery za minutu:

$$\eta = 0,138\text{min}^{-1}\text{cm}^{-1}.$$

Můžeme předpokládat, že přibližně polovina těchto částic bude těžko rozeznatelných od hvězd. Modelováním profilu lze sice část těchto stop odfiltrout, ale vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně malé a slabé jevy, je možná i špatná detekce. Dalším jednoduchým výpočtem získáme rámcovou představu, že průměrně vznikne na kameře ST8 jedna „star-like“ stopa každých 10 minut.

Z prohlídky temných snímků však také vyplývá značná nerovnoměrnost přítomnosti stop (v čase). Navíc nebyla provedena žádná analýza modelováním rozptylové funkce — charakter stopy se rozlišoval jen na základě vizuálního dojmu.

Tuto letnou analýzu výskytu kosmických částic lze uzavřít poznáním, že se kosmické částice na snímcích vyskytují v množství větším, než by běžná zkušenost napovídala. Je zjevné, že při obvyklé fotometrii pomocí CCD, kdy se vyhodnocuje jen několik hvězd v okolí měřené, se na kosmické částice vůbec nemusí přijít, zvláště, nevypadají-li jako hvězdy. Při automatické fotometrii se zaměřením na hledání nových objektů jsou však kosmické částice záležitostí, kterou stojí za to dále studovat.⁸

3.1.2 Meteory

Na CCD snímcích širokoúhlých kamer se občas vyskytují zaznamenané stopy meteorů. Takovéto stopy sice mohou pokazit fotometrii v místě, kde se exponovaly, ale jinak nepředstavují vážnější problém. Při detekci nových astrofyzikálních objektů se však často diskutují tzv. *stacionární meteory*, které padají přímo na pozorovatele a jejichž stopa způsobí expozici podobnou obrazu hvězdy. Jedná se o hypotetický jev, který nikdy nebyl prokázán a jeho výskyt na snímku se považuje za málo pravděpodobný. Velmi krátké stopy meteorů se na CCD velmi vzácně vyskytují a stacionární meteor je jejich limitním případem.

⁸ Za laskavou pomoc při procházení temných snímků děkuji M. Topinkovi.

3.1.3 Lidská aktivita

Krom přirozených zdrojů se na CCD snímcích vyskytují i stopy po lidské přítomnosti v pozorovaném kuželu v podobě záblesků družic a blikajících navigačních lamp letadel.

Výskyt záblesku družice je omezen na prostor, kdy by potenciální družice byla osvětlena Sluncem. Plný zemský stín má podobu kuželu dlouhého 1376000 km a jeho střed leží naproti Slunci. Varady a Hudec uskutečnili hledání takových satelitů na fotografických deskách z Ondřejova a Churáňova bez pozitivního výsledku (Varady & Hudec, 1992).

Průlet letadla snímanou oblastí v průběhu expozice může způsobit jednak světlé čáry na snímku od stálých pozičních světél, které vedou ke znehodnocení části snímku. Problematičtější však jsou blikající navigační světla, která blikají tak krátce, že jsou schopna na snímku vytvořit obraz s PSF stejnou, jakou mají hvězdy. Možnost, jak tyto falešné detekce odhalit, spočívá ve faktu, že letadlo letí snímkem konečnou rychlostí a za průlet stihne bliknout víckrát. Jedině několik nových hvězd v řadě pak prozradí průlet letadla.

Detailní rozbor problému falešných detekcí se zaměřením na fotografický materiál viz. článek (Varady & Hudec, 1992).

3.2 Šum

Šum snímku má několik složek. Je dobré vědět, zda a jak se které z nich dá vyhnout.

Některé složky totiž nejsou skutečným šumem, jelikož známe jejich podstatu, zdroj a jsme schopni do jisté míry předpovídat jejich chování. Jsou to darkframe a flatfield. Některé jeho složky nemůžeme eliminovat přímo, ale jejich vliv lze více či méně omezit.

3.2.1 Šum převodníku

Vyčítací šum vzniká při digitalizaci signálu a může být majoritním zdrojem nekorigovatelného šumu přístroje. Digitálně analogový převodník je po CCD čipu nejdůležitější částí detektoru a míra jeho šumu je výměnou za jeho rychlost a samozřejmě cenu. Šum je náhodný a v případě korekčních snímků se dá snížit opakovaným měřením a použitím průměru (nebo mediánu) jejich většího množství.

3.2.2 Darkframe

CCD kamera je citlivá v infračerveném oboru a sama sebe exponuje svým tepelným zářením. Snímače se proto chladí na co nejnižší teplotu. Temný proud se ovšem nedá eliminovat úplně. Proto se pořizuje darkframe.

Darkframe je snímek pořízený se zavřenou závěrkou se stejnou expoziční dobou a při stejné teplotě jako snímek, který koriguje. Měl by se pořádit s co nejkratším časovým odstupem. Jeho hodnoty jsou pro každý pixel součtem

$$D_i(T, t) = a_i(T)t + B_i,$$

kde D_i je intenzita pixelu i po expozici t při teplotě T , a_i je míra temného proudu a B_i je tzv. precharge, tj. hodnota, kterou má pixel okamžitě po vynulování. Tento vztah může být důležitý v případě, kdy nemáme z archivu k dispozici temný snímek pro konkrétní expoziční dobu. Důležité je však dodržení teploty.

Precharge se získává jako darkframe s minimální expoziční dobou a používá se pro korekci flatfieldu. (Který se také pořizuje s minimální expoziční dobou.)

Korekce na temný proud se provádí prostým odečtením hodnot temného proudu od datového snímku.

$$I_{s,i} = I_{raw,i} - D$$

3.2.3 Flatfield

Od výrobního procesu má každý pixel snímače jinou citlivost na světlo. Navíc se účinnost celé aparatury liší na různých místech čipu. Obojí se koriguje flatfieldem, kterým se jednak vyrovnají různé citlivosti pixelů, jednak se vyrovnají různé nerovnoměrnosti osvětlení detektoru. Korekce se realizuje dělením darkframovaného snímku na jedničku normovaným flatfieldem. Při jakékoli změně geometrie přístroje (vlastně i při sundání a vrácení CCD kamery) by se měl pořádit nový flatfield.

Korekční snímek se získává na jitřní nebo večerní obloze za svítání (soumraku) na opačné straně, než je pod obzorem Slunce. Expozice se používá minimální, aby se omezil vliv temného proudu. Okamžik pořízení snímku se volí tak, aby maximum hodnot na snímku bylo kolem poloviny saturace čipu. Při expozici je dobré dalekohledem po obloze trochu pohybovat, aby se rozmazaly případné hvězdy.

Pořízení dobrého flatfieldu není triviální a vyžaduje značný cvik a zkušenost. Flatfieldů se kolem správného okamžiku pořídí 3–7, co nejdříve se k nim pořídí několik temných snímků, které se mediánují, výsledným temným snímkem se opraví všechny flatfieldy a ty se nakonec zprůměrují.

Krom tohoto způsobu je možné vytvořit flatfield snímáním rovnoměrně nasvětlené plochy v blízkosti dalekohledu nebo mediánovat veliké množství snímků různých polí pořízených stejným přístrojem. Obě tyto metody jsou ovšem jakousi náhražkou, není-li možné snímkovat oblohu za svítání.

Někdy se zabudovává malý zdroj světla přímo do tubusu dalekohledu, aby bylo možné pořídit flatfield kdykoli. Takovýto snímek však není možné použít na korekci nerovnoměrnosti osvětlení daného geometrií teleskopu.

3.3 Pozadí

Zejména při aperturní fotometrii je důležitý správný odhad úrovně pozadí. Pozadí obrazu může být zvýšeno několika odlišnými vlivy.

Intenzita jednotlivých druhů se sčítá, ale skutečná úroveň pozadí nezávisí na intenzitě zdrojů, nýbrž na okamžité schopnosti atmosféry rozptylovat. Atmosféra rozptyluje světlo (hlavně) tím víc, čím víc obsahuje vodního aerosolu.

Výrazná nerovnoměrnost úrovně pozadí má velký vliv na přesnost fotometrie objektů. Tradičně se snímky pořízené za horších podmínek na fotometrii vůbec nepoužívají. V případě unikátních dat je ovšem zapotřebí udělat maximum pro získání co nejpřesnějších hodnot i v případě nevyhovujících podmínek. Konečná nepřesnost je sice veliká, ale alespoň částečná informace o jasnosti může být důležitá.

Postup úpravy snímku v případě velmi nerovnoměrného pozadí je popsán v části 2.3.

3.3.1 Normální pozadí

Žádný snímek nemá úplně nulové pozadí. Pokud nepůsobí žádný ze škodlivých vlivů popsaných dále, má obraz pozadí, které je dáno vlastním jasným oblohy daným rozptylem hvězdného a slunečního světla v atmosféře. Takovéto „zdravé“ pozadí se dá odhadnout snadno, protože je jeho střední hodnota téměř stejná po celé ploše obrazu a snadno ji zjistíme průměrováním nebo mediánováním hodnot

v místech, kde na snímku nejsou hvězdy.

U přístrojů s velmi velkým zorným polem nebo pokud byl snímek pořízen nízko nad obzorem je možné sledovat zvýšení intenzity pozadí směrem k obzoru.

3.3.2 Rozptýlené pozemské zdroje

Pokud se jedná o parazitní světlo z nedalekých lidských sídel a většinu ostatního světla provázejícího lidskou přítomnost v širším okolí, projevuje se zvýšením hodnoty pozadí a znatelnějším gradientem poblíž obzoru.

3.3.3 Lokalizované pozemské zdroje

Takovéto zdroje jsou nejnepříjemnějšími zdroji parazitního světla na snímku. Vzhledem k tomu, že může nabývat mnoha podob (červená výbojka na vrcholu vysílače, světlomety automobilů, reklamní poutače, blízké pouliční osvětlení), je obecně velmi složité se s jeho existencí vyrovnat.⁹

3.3.4 Měsíční světlo

Měsíční světlo vytváří silné pozadí se sklonem intenzity směrem od Měsíce. Na rozdíl od ostatních zdrojů parazitního světla se poloha (ale hlavně výskyt) Měsíce dá předpovědět.

⁹ Většina těchto zdrojů vlastně znečišťuje životní prostředí. České zákonodárce na to nedávno astronomové upozornili a ti po dlouhých tahanicích odhlasovali v novém zákoně o ochraně ovzduší také ochranu noční tmy.

IV. Robotické alertní teleskopy

4.1 GCN

Většina existujících alertních systémů spoléhá na automatizovanou distribuci informací o detekcích gama záblesků přes internet. Tato síť se jmenuje GCN a distribuuje informace o záblescích detekovaných HETE, RXTE, a meziplanetární sítí. Detekce družicí BeppoSAX s bohužel distribují manuálně přes GCN cirkuláře, což jejich automatické sledování prakticky vylučuje.

```
i:Exit -:PrevPg <Space>:NextPg v:View Attachm. d:Del r:Reply j:Next ?:Hel
Date: Tue, 3 Jul 01 03:01:03 -0400
From: vxw@capella.gsfc.nasa.gov (Bacodine)
To: +420604126214@ems.paegas.cz, +420737137396@ems.paegas.cz,
Astroklub.Kostkov@trz.cz, Hans-Juergen.Braeuer@stw.tu-ilmnau.de,
Petr.Krenzelok@trz.cz, achird@email.cz, beruna@esop.cz,
ford@asu.cas.cz, grb@aok.mk.ua, grb@skyarchive.org,
honza@physics.muni.cz, hroch@physics.muni.cz, jgutier@mizar.am.ub.es,
klet@klet.cz, mates@amu.cz, observatory.vlasim@vas.cz,
obsupice@mbx.vol.cz, ok1mh@prgata.sci.muni.cz, pazour@isdn.cz,
pk@stw.tu-ilmnau.de, pkub6315@es1000.ms.mff.cuni.cz,
polcar@physics.muni.cz, ppravc@asu.cas.cz,
pska?520@mlsda.troja.mff.cuni.cz, rhude@asu.cas.cz,
rt@lascaux.asu.cas.cz, strobl@sinrah.troja.mff.cuni.cz
Subject: GCN/HETE_POSITION

TITLE: GCN/HETE BURST POSITION NOTICE
NOTICE_DATE: Tue 03 Jul 01 06:59:08 UT
NOTICE_TYPE: HETE S/C Last
TRIGGER_NUM: 1578, Seq_Num: 8
GRB_DATE: 12093 TJD: 184 DDY: 01/07/03
GRB_TIME: 24904.71 SOD {06:55:04.71} UT
TRIGGER_SOURCE: FREGATE Trigger,
GAMMA_RATE: 243 [cnts/s] on a 0.160 [sec] timescale
XG_TRIG_TIME: 0.640 [sec]
WXM_SIG/NOISE: 3 trigger sig/noise
SC_Z_RA: 282 [deg]
SC_Z_DEC: -22 [deg]
WXM_CNTR_RA: 308.200d {+20h 32m 48s} (J2000),
308.220d {+20h 32m 53s} (current),
307.546d {+20h 30m 11s} (1950)
WXM_CNTR_DEC: -3.494d {-03d 29' 36"} (J2000),
-3.488d {-03d 29' 17"} (current),
-3.664d {-03d 39' 51"} (1950)
WXM_MAX_SIZE: 242.97 [arcmin] diameter
WXM_LOC_SN: 1 image sig/noise
SUN_POSTN: 102.42d {+06h 49m 40s} +22.95d {+22d 56' 51"}
SUN_DIST: 148.35 [deg]
MOON_POSTN: 253.51d {+16h 54m 04s} -20.65d {-20d 38' 50"}
MOON_DIST: 55.87 [deg]
MOON_ILLUM: 95 [%]
GAL_COORDS: 41.79,-24.08 [deg] lon,lat of the burst
COMMENTS: Possible GRB.
COMMENTS: Possible XRB.
COMMENTS: WXM error box is circular; not rectangular.
COMMENTS: There is no WXM or SXC position in this notice.

- 30/76: Bacodine GCN/HETE_POSITION -- (all)
```

Obrázek 13: Ukázka e-mailu z GCN. Tzv. GCN notice, který je jedním ze způsobů, jak se informuje o detekci záblesku.

Od konce roku 1995 je v provozu síť pro rychlou distribuci souřadnic záblesků. Nesla název BACODINE (BATse COordinates DIStribution NETwork) po svém prvním zdroji dat a po rozšíření na další zdroje souřadnic byla přejmenována na GCN (GRB Coordinate Network). Je schopna přijímat informace z družic, zpracovat a předat je příjemci s optickým dalekohledem během 5 sekund. Přesnost těchto souřadnic se liší podle jejich původce.

4.2 CCD alertní systémy

Snaha o co nejkratší odezvu astronomického pozorování od detekce gama záblesku iniciovaná touhou studovat optickou emisi gama záblesků co nejbližší hlavní emisi vede ke konstrukci robotických systémů se specializací na rychlost pozorování. Realizaci takových zařízení pak je možná jedině díky prudkému rozvoji výpočetních technologií v poslední době.

Robotické teleskopy však dnes nenacházejí uplatnění jen v oblasti promptní detekce rychle se měnících objektů, ale používají se i pro úkoly jiné, jako jsou různé přehlídky oblohy, pravidelný monitoring zajímavých nebo z toho podezřelých objektů, hledání nových proměnných objektů a jiné úlohy. Robotický dalekohled nemusí nutně disponovat mnohametrovým průměrem. Jeho hlavní síla tkví jednak v neúnavnosti, s jakou svůj úkol vykonává, jednak v obrovské citlivosti dnešních CCD detektorů, díky níž může i poměrně malý přístroj dosahovat výsledků v době fotografie netušených.

V následujícím výčtu se pro stručnost omezíme jen na robotické dalekohledy, jejichž hlavním určením je detekce optické emise záblesků záření gama. Rozsáhlý seznam dalších takových přístrojů lze nalézt na internetu (Hessmann, 2002);

4.2.1 ETC

Explosive Transient Camera — Nejstarší experiment tohoto druhu, funguje od roku 1991. Nepracuje s GCN nebo aspoň nepracovala, detekuje rychlé optické záblesky nezávisle na ostatních experimentech.

ETC má 8 CCD kamer s objektivy o ohnisku 24mm a světelnosti 1:1.4, CCD mají rozlišení 390x292 pixelů s 22 μ m velkými čtvercovými pixely.

Od startu CGRO se několikrát stalo, že ETC sledovala stejné místo na obloze, kde byl detekován gama záblesk. V takovýchto

případech mohly být stanoveny limity jasnosti optické emise gama záblesku. ETC byla schopna zaznamenat záblesk 10 magnitudy v délce kolem 1–10 s. (Krimm et al., 1996) (Internetová stránka projektu ETC, 2002)

ETC pracovala do roku 1996, kdy musel být její provoz pro neopravitelnou závadu zastaven.

4.2.2 BART

BART existoval od roku 1997 jako vývojová platforma pro BOOTES. Software pro BART a BOOTES byl vytvořen v Ondřejově J. Soldánem pod platformou Windows NT, odladěn a od té doby jej používá BOOTES. V Ondřejově nebyl robotický dalekohled s tímto programovým vybavením nikdy v rutinním provozu.

Od roku 2000 začal vznikat v rámci projektu studentů informatiky na MFF UK v Praze nový systém řízení dalekohledu spojující myšlenky původního software se snahou o větší univerzálnost přístroje, přibližující se svým pojetím spíše družici než průmyslovému robotu (jako BOOTES). Systém funguje pod operačním systémem Linux, v programovacím jazyce Python.

BART má dalekohled o průměru 25 cm a širokoúhlou kameru se zorným polem cca 5°.

Detailně pojednává o našem systému následující kapitola.

4.2.3 BOOTES

BOOTES (Burst Observer and Optical Transient Exploring System) je společným česko-španělským experimentem. Jeho účelem je především pozorování optických protějšků gama záblesků simultánně s jejich detekcí, nebo krátce po ní. Dále je jeho posláním detekce optických záblesků kosmického původu nezávisle na detekci GRB.

První stanice (BOOTES-1) je v provozu od června 1998 a podílela se na sledování několika desítek gama záblesků. Při sledování záblesku GRB 000313 byl na snímku exponovaném 4 minuty po detekci gama emise nalezen optický transient (Castro-Tirado et al., 2002). Dnes jsou na stanici dva teleskopy (BOOTES-1a o průměru 15 cm a BOOTES-1b o průměru 30 cm. K oběma teleskopům jsou připojeny WF kamery (stejně jako u Barta), které se používají k simultánnímu monitoringu zorného pole BeppoSAXu a HETE (BOOTES-1a) a ke každonoční přehlídce oblohy (BOOTES-1b).

Druhá stanice (BOOTES-2) pracuje od léta 2001. Od první stanice je vzdálena 250 km. Se dvěma stanicemi je BOOTES schopen snadno a spolehlivě určit vzdálenost objektu triangulací a tím vyloučit falešné blízkozemní detekce způsobené družicemi, letadly nebo meteory. BOOTES-2 disponuje 30 cm dalekohledem a jednou WF kamerou v paralelním režimu s BOOTES-1b.

Systémy BART a BOOTES mají společný původ. Koncepte systémů byla původně stejná, s vývojovým systémem v Ondřejově a produkčním v lepších pozorovacích podmínkách jižního Španělska.

4.2.4 TAROT

Primárním určením francouzského TAROTu je hledání promptních optických emisí záblesků gama. Je to autonomní 25cm dalekohled instalovaný nedaleko Nice. Měl by být schopen najet na libovolnou pozici na obloze během jedné až dvou sekund. Ovládání, plánování i zpracování dat jsou plně automatizovány, takže je přístroj celkově nezávislý. Krom tohoto automatického režimu má teleskop v rámci školního výukového programu možnost přímého dálkového ovládání. Dalekohled snímá webová kamera aby dalekohledem vrtící dítko ve škole vidělo, co vlastně působí. (Boër et al., 2001).

4.2.5 ROTSE



Obrázek 14: Optický systém ROTSE-1 (Internetová stránka projektu ROTSE, 2002)

ROTSE funguje od roku 1998, jeho primárním cílem je detekce OT, ve volném čase pořizuje přehlídky oblohy. ROTSE-I je sestava čtyř širokoúhlých CCD detektorů na společné ekvatoreální montáži. Operuje samostatně na odlehlem místě u Los Alamos v Novém Mexiku¹⁰.

ROTSE detekovalo první optický transient GRB990123 (Akerlof et al., 1999a).

Chystá se několik dalších variant systému s většími a výkonnějšími teleskopy.

V období, kdy neprobíhá sledování gama záblesku¹¹ provádí ROTSE přehlídky oblohy. Systém je natolik výkonný, že stihne za noc pokrýt celou dostupnou oblohu. Monitoruje tak (byť s relativně malým dostupem a nevýhodami nefiltrovaného přístroje) velmi hustě i objekty, které ještě nemusejí být jako zajímavé odhaleny. To se stalo v případě rentgenového transientu XTE J1118+480 — retrospektivní analýzou starých snímků se mohla prokázat prudká proměnnost nedávno objeveného rentgenového zdroje i v minulých letech (Chaty et al., 2000) a (Remillard et al., 2000).

V získaných snímcích lze vyhledávat proměnné hvězdy. Na internetové stránce ROTSE (<http://www.umich.edu/rotse/>) se tvrdí, že na 5% zpracované oblohy bylo nalezeno 1600 nových proměnných objektů do 15.5^m.

Janu Štroblvi se nedávno podařilo získat část archivu ROTSE za účelem studia proměnných hvězd, více informací viz. jeho diplomová práce (Štrobl, 2001)

4.2.6 LOTIS

Livermore Optical Transient Imaging System je systém čtyř sousých CCD kamer na stejné montáži, zorné pole těchto kamer je 8.8° × 8.8°, systém se věnuje celooblohovým přehlídkám a rychlému hledání optických protějšků GRB. Ze čtyř kamer se používají dvě bez filtru, jedna s Johnsonovým V filtrem a jedna s Johnsonovým R filtrem. (Williams et al., 2000)

¹⁰ tj. v Americe

¹¹ Jak moc mi teď chybí slovo *idle time*

4.2.7 SUPER-LOTIS

je 60cm Boller-Chivens systém se světelností 1:3.5, CCD 2048x2048 pixelů se zorným polem $51^\circ \times 51^\circ$. Teleskop je schopen reagovat do 30s od přijetí GCN zprávy a začít snímkovat určenou pozici. (Williams et al., 2000)

4.2.8 Další

Jak již bylo řečeno, tato kapitola nezmiňuje systémy, které se systematicky nezabývají detekcí optické emise GRB. Existuje celá řada do různé míry robotických dalekohledů, které se věnují fotometrii, vyhledávání planetek (LINEAR), monitorování galaxií při pátrání po nových supernovách a jiným úkolům. Odkazy na mnohé systémy lze najít na výše zmíněné hessmannově internetové stránce (Hessmann, 2002).

V. Robotický teleskop BART

5.1 Historie

Robotický dalekohled BART (Burst Alert Robotic Telescope) je v Ondřejově ve vývoji od roku 1997, ve zkušebním provozu pod systémem vytvářeným od roku 2000 v průběhu února a března 2001 s měsíčním výpadkem způsobeným rekonstrukcí pozorovací plošiny v průběhu dubna a poloexperimentálním rutinním provozu od začátku května 2001. Věnuje se monitorování protějšků vysokoenergetických zdrojů v optickém oboru a sestavování celooblohového katalogu sním-



Obrázek 15: Robotický teleskop BART na počátku zkušebního provozu v březnu 2001.



Obrázek 16: Širokoúhlá kamera robotického teleskopu.

ků pro potřeby pozdějšího srovnání. V případě detekce gama záblesku je připraven okamžitě přerušit pozorování a začít snímkovat oblast, kde by se mohl vyskytovat protějšek gama záblesku.

WF systém BARTa je identický s optickým systémem OMC připravované družice ESA INTEGRAL, snímky pořízené tímto přístrojem slouží také k testování programů a metod, které budou použity při této kosmické misi.

5.2 Cíle projektu

Detekce optických transientů systém je založen na požadavku co nejrychlejšího zpracování hlášení o detekci GRB. V řetězci zařízení zapojených do detekce je družice, GCN centrála a pozemní optický přístroj, který by nadále mohl automaticky poskytovat data dalším pozorovatelům. Hlavním detektorem je WF kamera, v případě dobře lokalizovaných zdrojů lze použít i NF kameru. V současné konfiguraci se pozoruje i mozaika NF dalekohledem v R filtru kolem středu chybového boxu detekce záblesku.

Pozorování optických dosvitů optické dosvity gama záblesků mívají obvykle magnitudu kolem 18–20. Existuje možnost tyto jevy pozorovat BARTem, nicméně je spíše tendence věřit, že se emise se zkracováním doby od záblesku může ještě zesílit. S NF dalekohledem BARTa je za dobrých podmínek a při skládání expozic možno dosáhnout téměř 20 magnitudy.

Monitorování objektů dalekohled má v současnosti, kdy se detekuje poměrně málo gama záblesků, mnoho volného času, který se využívá k fotometrii zajímavých objektů. Jedná se o nově objevené supernovy (SN2002ap, SN2002cb, ...), o kataklyzmické proměnné hvězdy (GK Per, ...) a o aktivní galaktická jádra (BL Lac, ...).

Požadavky na systém při monitorování a fotometrii takovýchto objektů jsou značně odlišné od pouhé detekce objektů bez filtrů a na jeho plné přizpůsobení tomuto režimu je zapotřebí rozsáhlejších úprav původního řídicího softwaru dalekohledu. Část změn již byla aplikována, ale některé vyžadují úpravy jádra pozorovacího systému; jejich realizace probíhá a dokončení včetně instalace se plánuje na prázdniny 2002.

5.3 Pozorovací program

Primárním cílem dalekohledu je detekce optických protějšků gama záblesků. Po přijetí souřadnic začne teleskop všemi dostupnými prostředky snímat místo, kde byl záblesk detekován.

Dalekohled provádí pozorování vybraných aktivních galaktických jader a několika proměnných hvězd ve všech dostupných filtrech (B,V,R a bez filtru) s periodou 90 minut. Používá při tom jen dalekohledu. Širokoúhlá kamera se při monitorování nepoužívá.

V současné době provádí BART přehlídku oblohy širokoúhlou kamerou, aby bylo možné porovnávat snímky, které vzniknou při detekci optického protějšku. Produktem tohoto procesu bude CCD přehlídka oblohy a katalog, které by měly sloužit samotnému dalekohledu při pointaci a identifikaci objektů.

5.4 Konstrukce

BART je postaven na automatické montáži LX200 od firmy Meade s teleskopem Schmidt-Cassegrain o průměru primárního zrcadla 25.4 cm. Na montáži jsou dvě pozice pro širokoúhlé kamery. Jednu z těchto pozic se využívá širokoúhlá kamera, druhá je volná a je v ní jen protizávaží.

Širokoúhlá kamera se skládá z objektivu Meopta o průměru 89 mm a ohniskové vzdálenosti 106 mm. Je vybavena CCD detektorem SBIG ST8 s rozlišovací schopností 1536×1024 . Zorné pole systému je $7,2^\circ \times 4,8^\circ$, světelnost 1,2.

The screenshot shows a software interface for an observation scheduler. It includes several sections:

- Observed objects table:**

id	dec	ra	target name	date	type	trigger number	priority	state	comments	airmass	altitude	exp	del
767	52:10 (9.0)	9:11:40 (9.2)	3.S.2004 010	3.S.2004 010	2	1	10	1	BART Scan, Field 767	181.99	44.90	1 EOE 3	1 DEL 3
- Observed objects in plan table:**

id	dec	ra	target name	date	type	trigger number	priority	state	comments	airmass	altitude	exp	del
4999	-8:19:56 (89.399)	0:0:0 (0.0)	3.S.2004 010	3.S.2004 010	1	1578	100	0	FAKE (check point)	180.0	-50.0	1 EOE 3	1 DEL 3
- Observations table:**

id	dec	ra	target name	date	type	trigger number	priority	state	comments	airmass	altitude	exp	del
461	-8:19:0 (8.0)	0:0:0 (0.0)	3.S.2004 010	30.8.2004 014	2	1	10	1	BART Scan, Field 001	300.93	-33.60	1 EOE 3	1 DEL 3
462	-8:19:0 (8.0)	0:0:0 (0.0)	3.S.2004 010	30.8.2004 015	2	1	10	1	BART Scan, Field 002	305.00	-32.05	1 EOE 3	1 DEL 3
463	-8:19:0 (8.0)	0:0:40 (0.4)	3.S.2004 010	30.8.2004 016	2	1	10	1	BART Scan, Field 003	302.92	-30.45	1 EOE 3	1 DEL 3
464	-8:19:0 (8.0)	0:0:50 (0.5)	3.S.2004 010	30.8.2004 017	2	1	10	1	BART Scan, Field 004	300.05	-28.01	1 EOE 3	1 DEL 3

Obrázek 17: Obrazovka plánovače pozorování ovládacího systému robotického dalekohledu. Vlevo jsou vidět základní volby, nahoře lze manuálně vložit nové pozorování (Lascaux, 2002).

Dalekohled je výše zmíněný zrcadlový systém Meade o průměru 254 mm a světelnosti 1:6,2 CCD SBIG ST9E o rozlišení 512×512 pixelů. K dispozici jsou tři filtry standardního systému BVR a možnost snímat bez filtru. Při jednodominutové expozici bez filtru je mezní hvězdná velikost kolem 17. mag.

5.5 Software

Software dalekohledu pracuje se seznamem pozorování, ze kterých podle několika kritérií vybírá následující sekvenci. Kritériem pro pozorování je především tzv. prioritizace pozorování, která určuje důležitost. V rámci jedné úrovně priority se pak vybírá na základě polohy objektu na obloze. Odpozorované sekvence se ze seznamu možných pozorování nevyhazují, jejich pozorování je jen přeplánováno na pozdější dobu. Periodická pozorování mají tuto dobu relativně krátkou — řádově hodiny.

Různé druhy pozorování vyžadují různý postup snímání oblohy (jinou expoziční dobu, jiný dalekohled). To je v systému vyřešeno pomocí tzv. skriptů, které realizují samotnou sekvenci expozic. Plánovač se tak nestará o detaily jednotlivých měření, jen rozvrhuje jejich pořadí. V současné době se používá jiný skript na monitorování galaktických jader, jiný na přehlídku oblohy a jiný v případě optického protějšku GRB.

Softwarové vybavení zajišťuje příjem zpráv z GCN, jejich zpracování, okamžité přerušování právě probíhajícího pozorování a aktivaci

skriptu pro snímání optického protějšku.

Základ softwaru vznikl jako projekt na MFF UK, běží na počítači PC s operačním systémem Linux a je napsán v jazyce Python.

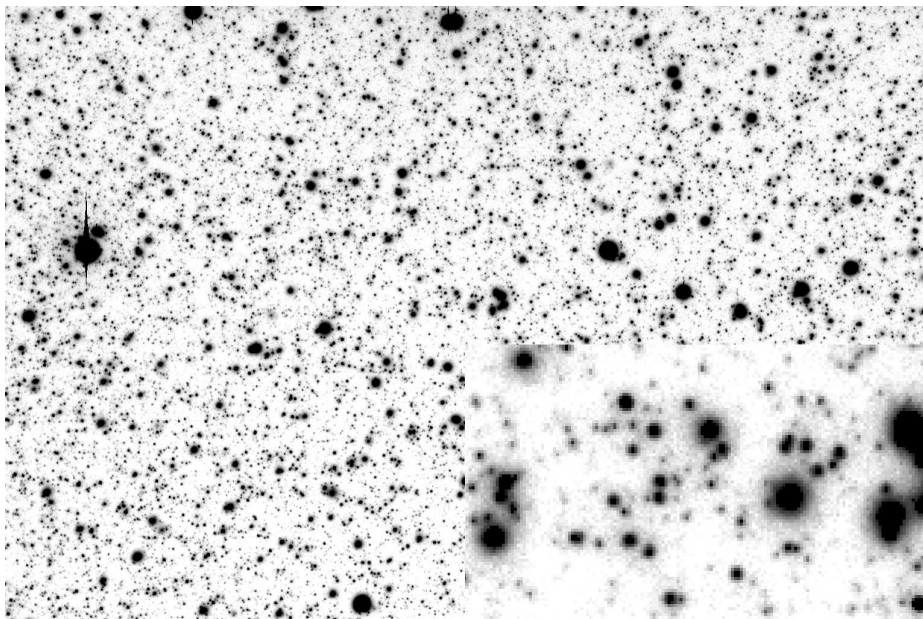
5.6 Problémy

Jako každý složitý systém, potýká se i BART s nesčetnými drobnými problémy, které provázejí jeho rutinní provoz. Jedná se zejména o postupné doladování softwaru. V průběhu experimentálního provozu se navíc odhalilo několik chyb na systému, které si vyžádaly technický zásah s přerušением provozu. Ani jedna z těchto chyb však neohrožuje provoz teleskopu.

Jeden problém se týká samotné montáže Meade, která má občasné problémy s udržením pointace. Chyba je částečně periodická a zřejmě spočívá jej hlavní část v nepřesnosti šneku. Projevuje se tím, že jsou některé ze snímků exponovaných pomocí dalekohledu rozmázlé. Expozic s širokouhlou kamerou se problém nedotýká, protože maximální výchylka chyby pointace je 32", to je méně než dva pixely na čipu širokoúhlé kamery. Analýza 56 snímků z dalekohledu ukázala, že výchylky (dispointace) větší než polovina maxima, tj. 16", se dosáhlo jen ve 20% případech, 45% snímků bylo bez posunu a zbylých 35% mělo posun do několika málo pixelů, takže jsou snímky použitelné pro fotometrii. Dalekohled sice disponuje softwarovou korekcí rychlosti chodu hodinového stroje, ale její aplikace není postačující a je nutné hledat další možnosti. Těch existuje několik, jednak je možno nakoupit adaptivní optiku, která by krom korekce hodinového stroje dokázala



Obrázek 18: Na obraze rozostřené hvězdy je vidět deformace normálně symetrického mezikruží způsobená rozosením dalekohledu. Arcturus, 6 úhlových minut od optické osy.



Obrázek 19: Ukázka snímku širokoúhlé kamery na systému BART, v pravém dolním rohu je výřez 6x zvětšený. Rozměr celého snímku je 7.2×4.8 stupně, expoziční doba 2 minuty, mezní hvězdná velikost tohoto snímku je kolem 15^m .

i trochu vylepšit obraz pokažený seeingem, další možnost je naučit náš systém automaticky pointovat dalekohled natolik dobře, aby se chyba přestala projevovat a poslední metoda spočívá ve zkrácení expozice na dobu, za kterou se snímek nerozjede. Nedávno jsme začali používat třetí postup s tím, že se snažíme vyvinout software na druhý postup, který můžeme použít u první metody, podaří-li se nám získat potřebné finanční prostředky. Nezmíněná nevýhoda zkrácení expozice a dosahování potřebné integrační doby sčítáním snímků spočívá ve ztrátě značného množství pozorovacího času vyčítáním CCD, které by jinak nebylo nutné.

Dalším nedávným problémem bylo rozcentrování optiky zrcadlového dalekohledu. Chyba způsobovala zhoršení dostupnosti dalekohledu o více než jednu magnitudu. Scentrování nám provedl dr. Polášek v jeho optické laboratoři, vyžádalo si týdenní přerušení provozu teleskopu v průběhu listopadu 2001.

Za nocí, kdy se teplota vzduchu dostane pod bod mrazu, přestává fungovat filtrové kolo, což nám znemožnilo pořizovat korektní fo-

tometrii v průběhu letošní zimy. Výrobce přístroje tvrdí, že je mu příčina problému známa a potíž by měla být v brzké době vyřešena.

5.7 Vyhlídky

Pokud se podaří srovnat pointaci teleskopu, měla by se mezní hvězdná velikost zvýšit až o jednu magnitudu bez nutnosti obětovat třetinu pozorovacího času na vyčítání krátkých expozic a nemalé množství osobního času na zlidštění takto získaných dat. Navíc takto poskládaný snímek nemá kvůli dosti hrubému samplingu našeho systému nikdy kvalitu přímo exponovaných snímků.

Meade je relativně málo světelný a v kombinaci s kamerou ST9E by bylo možné dělat několik desítek minut dlouhé expozice, na tak dlouhé expozice je však zapotřebí automatický pointační systém. Takový softwarový pointační systém bude vyžadovat určité úpravy stávajícího řídicího softwaru, ale zato umožní zvýšení citlivosti přístroje o několik magnitud.

Nejdůležitější vyhlídkou je tedy nyní očekávání letní instalace vylepšeného řídicího software, který vychází ze zkušeností, které jsme získali v průběhu ročního provozu dalekohledu a umožní nám lépe využívat robotických schopností dalekohledu.

Součástí změn je uložení celého plánovače do databáze, což značně urychlí jeho práci a umožní flexibilnější plánování pozorování, než tomu bylo doposud.

5.8 Katalog objektů

Robotické dalekohledy BART a BOOTES a i jiné jsou konstruovány s vyhlídkou na hledání nových přechodných objektů. Metody jejich detekce jsou různé, ale obecně buď málo účinné nebo příliš náročné na zpracování a tudíž nevhodné pro použití v systému, který by měl pracovat v reálném čase.

Systém, který navrhuji a začínám realizovat na robotickém teleskopu BART, spočívá jednak v postupném nasnímání celé oblohy ve 2125 částečně se překrývajících polích rozmístěných po celé obloze, jejich automatické fotometrii a uložení každého nalezeného objektu do databáze. Pro katalog lze samozřejmě používat jakékoli pořízené snímky lepší kvality.

Katalog by měl mít mezní hvězdnou velikost prakticky rovnou mezi spolehlivého rozeznání objektu na snímku. Problém falešných

detekcí se řeší vícenásobným snímáním každého pole.

Pro získání počátečních souřadnic se použije některého z dostupných fotometrických katalogů, např. Tycho.

Výhody Proces kalibrace magnitud a problémy spojené s fotometrií snímků bez filtru vyřeší na začátku při vytváření katalogu.

V katalogu budou uloženy přímo instrumentální magnitudy a tak se velmi zjednoduší proces detekce zjasnění dříve identifikovaných objektů.

Katalog vzniká postupně v průběhu provozu přístroje.

Ve srovnání s algoritmy porovnávajícími změnu intenzity všech objektů na snímku nemá problém s pomalým poklesem.

Není nutné pořizovat snímek později, aby se mohlo porovnat pole, zda na něm dříve něco nepřibylo. To je výhodné zejména, pokud by se měla informace o nově nalezeném objektu předat co nejdříve dále.

Nevýhody Problém falešných detekcí se řeší několikanásobným snímáním každého pole, nejlépe v delších časových odstupech.

Vzhledem k tomu, že vzniká postupně, není k dispozici okamžitě, ale až po určitém období provozu.

Klade poměrně vysoké nároky na úložný prostor. Celý katalog je zapotřebí mít na disku.

Na sestavení katalogu je zapotřebí spousta pozorovacího času za dobrých podmínek.

I když bude takový katalog existovat, bude trpět nepřesnostmi plynoucími z používání systému bez filtru. Řešením, byť jen částečným, je omezení zenitové vzdálenosti do katalogu zařazovaných detekcí. Opravdovým řešením tohoto problému však je jediné zavedení fotometrického filtru. Vzhledem k primárnímu určení systému k detekci je pak tato volba opravdu těžká.

Další možnosti Systém je tak, jak je navržen v předchozích odstavcích, statický. Neumožňuje dynamické přepracovávání katalogu a on-line zanášení nových redukováných dat.

Tento problém se dá řešit za cenu dalších gigabajtů úložného prostoru rozšířením systému o *velký* katalog. V tomto katalogu by byla uložena všechna pozorování tak, jak byla získána. Jednalo by se tedy o systém, ve kterém jsou uložena redukována data z celého života robotického dalekohledu.

Na jednu stranu by na takovýto katalog bylo potřeba *opravdu* hodně místa, na stranu druhou by mohl být zdrojem ohromného množství informací o vývoji jasností hvězd, který by byl k dispozici on-line.

Velký katalog by pak sloužil jako zdroj pro *provozní* katalog dalekohledu, který se vytvoří statistickým zpracováním jednotlivých detekcí z velké databáze. Tento katalog bude sloužit pro rychlé zpracování snímků pořízených dalekohledem.

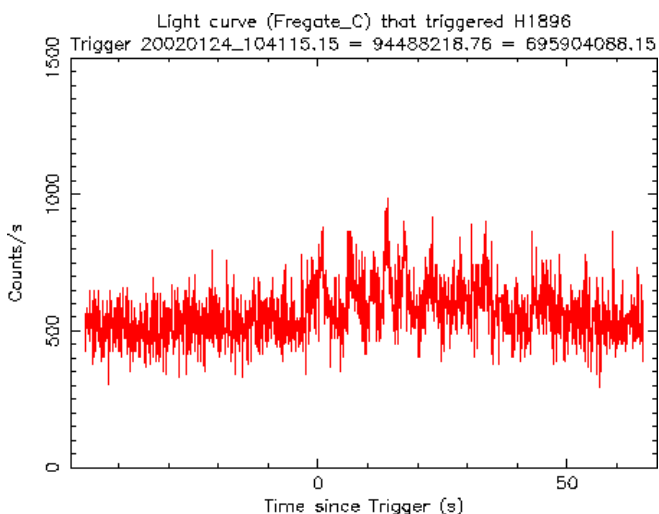
5.9 Follow-up pozorování GRB

Z následujícího by čtenář mohl nabýt dojmu, že přestože autor tvrdí, že dalekohled je v provozu od května 2001, asi nebylo něco v pořádku, když se až do začátku roku 2002 nepodařilo pozorovat pozici gama záblesku. Přestože jsme na dalekohledu za tu dobu udělali mnoho práce a upravili jsme spoustu věcí jak v softwaru tak hardwaru teleskopu, systém jako celek byl pořád schopen takového pozorování, jaké prováděl v průběhu letoška už několikrát; za celý rok ale nebyla příležitost prověřit, že aparatura funguje jak má. Absolvovali jsme sice několik testovacích poplachů, ale první skutečný alert za hezkého počasí přišel opravdu až 24.1.2002.¹²

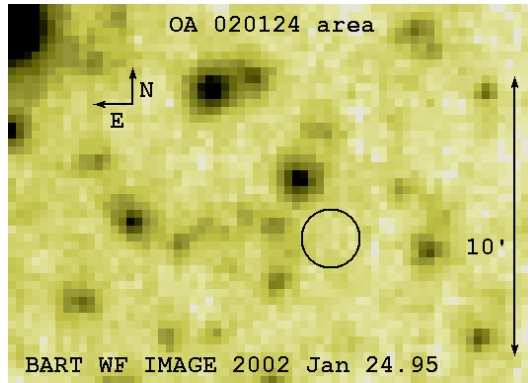
5.9.1 GRB 020124

Gama záblesk byl detekován družicemi HETE (trigger 1896) (Ricker et al., 2002a) a Ulysses (IPN triangulace viz. Hurley et al. (2002)) v 10:41:15 UT. Jednalo se o poměrně dlouhý (cca 70s), měkký záblesk. Špičkový tok přesáhl 3 Crab. Detekce byla během 11 sekund distri-

¹² Důvody toho ležely daleko mimo systém BART na oběžné dráze Země v problémech družice HETE. To způsobilo, že množství lokalizovaných γ záblesků bylo opravdu malé.



Obrázek 20: Temporální profil gama emise GRB020124 z HETE (HETE burst page, 2002)



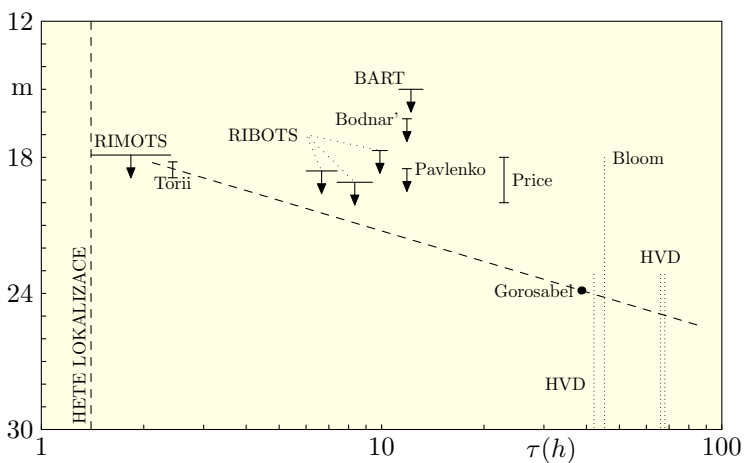
Obrázek 21: WF snímek errorboxu GRB 020124 z BARTa

buována sítí GCN, avšak první hlášení neobsahovalo souřadnice. Ty byly rozeslány až po 1.4 h. Prvotní lokalizace měla střed

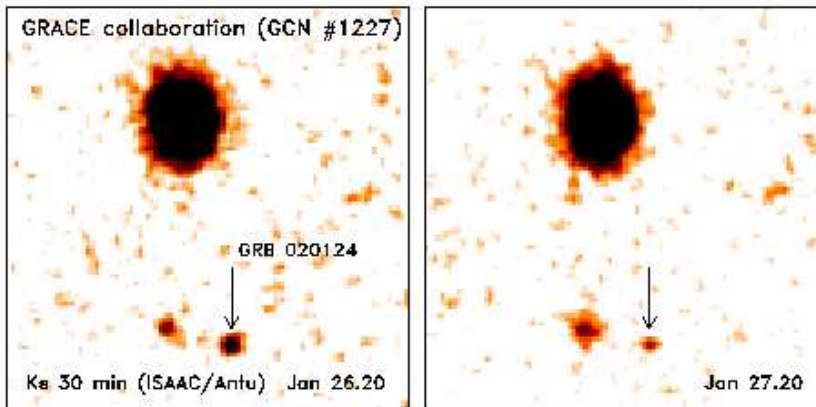
$$\alpha = 9^{\text{h}}32^{\text{m}}49^{\text{s}} \quad \delta = -11^{\circ}27'35'' \quad (J2000)$$

a tvar čtverce o hraně přibližně 0.5° .

BART začal pozorovat 11.5 hodiny po záblesku, pořídil WF kamerou 38 snímků s dvouminutovou expoziční dobou s limitní magnitudou přibližně 14.0 jednotlivě a 15.0 po kombinaci 24 vybraných snímků (některé byly kontaminovány oblačností). Pozorovací podmínky byly špatné, bylo nutné čekat nejen na soumrak, ale i na



Obrázek 22: Světelná křivka optického dosvitu GRB 020124



Obrázek 23: Optický dosvit GRB 020124 na snímku VLT — Hjorth et al. (Hjorth et al., 2002)

protrhání oblačnosti. Časový odstup prvního snímku od záblesku je 11.5 hodiny, posledního 13.5 hodiny; v pozorování nebylo možné pokračovat, jelikož se později zase zatáhlo. Časový odstup nedával příliš šancí na nalezení nějakého protějšku — a ten jsme také nenalezli. Význam pozorování spočíval především v tom, že se konečně prokázalo, že je BART schopen reagovat bez lidského zásahu (jediná asistence byly standardní úkony jako otevření střechy a ustavení dalekohledu). Výsledkem našeho pozorování je horní limit jasnosti optického protějšku v období 11.5 - 13.5 hodiny přibližně 15 mag.

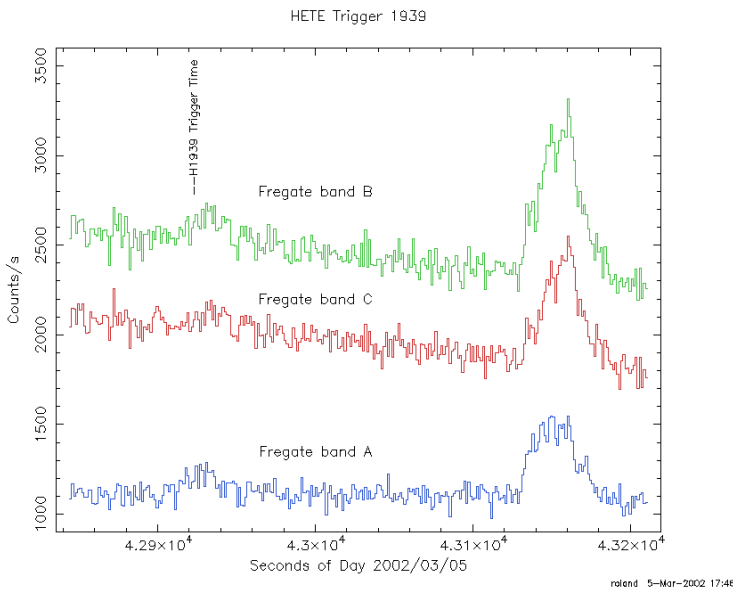
Kawai et al. (2002a) uvádí limity jasnosti optického protějšku v počátečních obdobích po záblesku kolem 18 v R, jejich první snímky jsou pořízeny 1.4 hodiny po jevu, poslední cca 9 hodin. 2.4 hodiny po záblesku pozorovali Torii et al. (2002), na později ohlášené pozici našli objekt 18.5 magnitudy. 11.24 hodiny po záblesku pozoruje BART (Jelinek et al., 2002b) s limitem 15. Bondar et al. (2002) 11.87 hodin post uvádí limit 16.3. Pavlenko & Rumyantsev (2002) pozorovali polohu ve stejnou dobu jako Bondar et al. a uvádějí limitní magnitudu 18.5 v R. Price et al. (2002a) ohlásil nález kandidáta na optický dosvit na souřadnicích

$$\alpha = 9^h 32^m 50.8^s \quad \delta = -11^\circ 31' 11'' \quad (J2000),$$

uvádí odhad jasnosti 18.5 v R filtru 22.9 hodin po záblesku. Gorosabel et al. (2002) změřil mag 23.84 v R 38.65 hodin po jevu,

Bloom (2002) potvrzuje existenci slabého zdroje na pozici, kterou ohlásil Price et al.. VLT (Hjorth et al., 2002) pozoroval optický dosvit několikrát (po 42.1, 66.1 a 68 hodinách) a potvrdil jeho povahu.

Existence a povaha optického dosvitu GRB 020124 byla zřejmě potvrzena. Jeho vlastnosti odpovídají jiným podobným detekcím z dřívější doby.



Obrázek 24: Časový průběh gama emise záblesku 020305 ve třech energetických úrovních. (HETE burst page, 2002)

5.9.2 GRB 020305

Záblesk detekovala družice HETE 5.4.2002 v 11:55:25.05 UT zařízeními WXV a FREGATE. Záblesk byl sice rychle ohlášen přes GCN notice, ale lokalizace trvala téměř 10 hodin. Jednalo se o 252s dlouhý, měkký gama záblesk s špičkovým tokem cca 2.5 Crab. (Ricker et al., 2002c)

BART začal polohu gama záblesku pozorovat velmi brzy, necelých 30 minut po obdržení zprávy z GCN a byl první, kdo pozoroval. Třicetiminutové zpoždění způsobila organizační chyba obsluhy, ne software. Zhoršené pozorovací podmínky způsobily limitní magnitudu 14.3 na jednotlivých snímcích WF kamery (maximum je přes 15). NF (dalekohled) má limitní magnitudu 17 na jednotlivém snímku a 18.5 na snímcích kombinovaných. NF pokrývá jen část — cca 40% — HETE errorboxu. Bohužel jinou, než kde byl později nalezen optický protějšek. (Jelinek et al., 2002a)

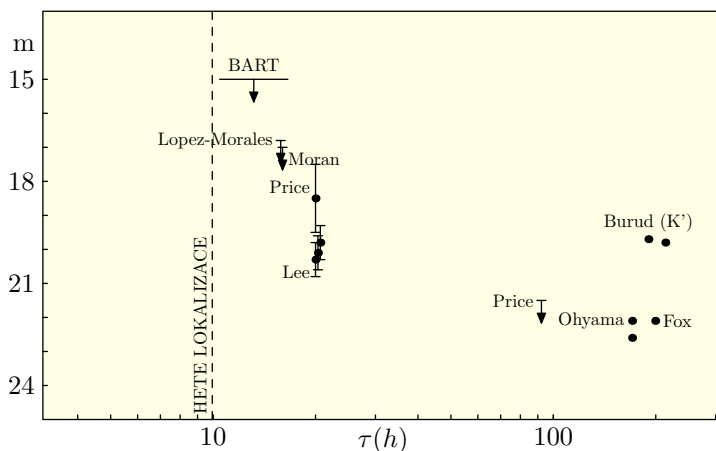
Pozorování pozice GRB s negativním výsledkem ohlásili krom nás rovněž Lopez-Morales a Moran. Optický protějšek byl později identifikován na snímcích pořízených 20 hodin po jevu Pricem (Price & Fox, 2002). Poloha:

$$\alpha = 12^h 42^m 27.94^s \quad \delta = -14^\circ 18' 11.8'' \quad (J2000)$$

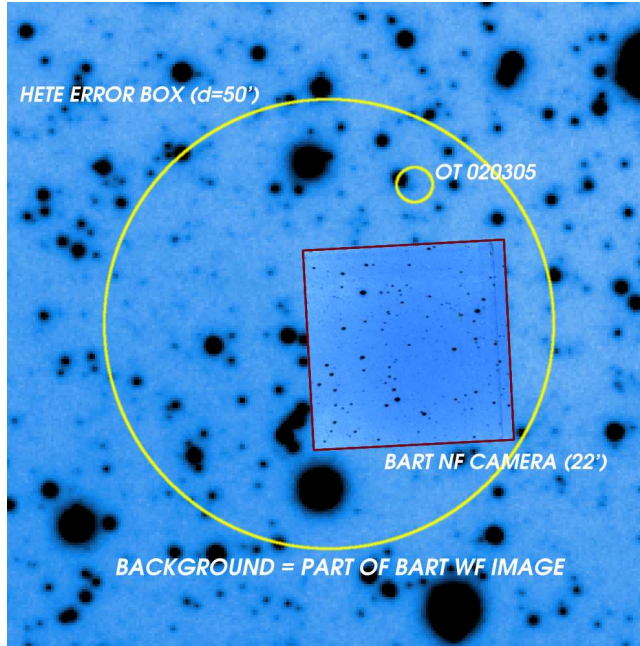
Pozorování optického dosvitu jsou shrnuta v tabulce 2 a na obr. 25.

Hodnotami z tabulky lze s úspěchem proložit poklesovou křivku

$$L = \tau^{-\alpha} \nu^{-\beta}$$



Obrázek 25: Světelná křivka optického dosvitu GRB 020305



Obrázek 26: Na pozadí snímku WF kamery BARTa je vyznačena poloha HETE errorboxu, záběru NF kamery a poloha optického transientu GRB 020305

s časovým indexem $\alpha \simeq 1.075$ a spektrálním $\beta \simeq 2.5$. Tyto hodnoty odpovídají hodnotám běžným pro optické dosvity záblesků gama.

τ	magnitudy	odkazy
10.45–16 h	$m > 16$ (část. $m_R > 18$)	(Jelinek et al., 2002a)
15.8 h	$m_I > 17$	(Lopez-Morales et al., 2002)
16 h	$m_R > 18, m_V > 17$	(Moran et al., 2002)
20 h	$m_R \simeq 18.5$	(P.Price, soukr.)
20 h	$m_g = 20.3, m_r = 20.1, m_i = 19.8$	(Lee et al., 2002)
7.1 d	$m_R = 22.6, m_I = 22.1$	(Ohyama et al., 2002)
7.9 d	$m_{K'} = 19.7$	(Burud et al., 2002)
8.3 d	$m_R = 22.1$	(Fox et al., 2002a)
8.9 d	$m_{K'} = 19.8$	(Burud et al., 2002)

Tabulka 2: Pozorování OA GRB 020305

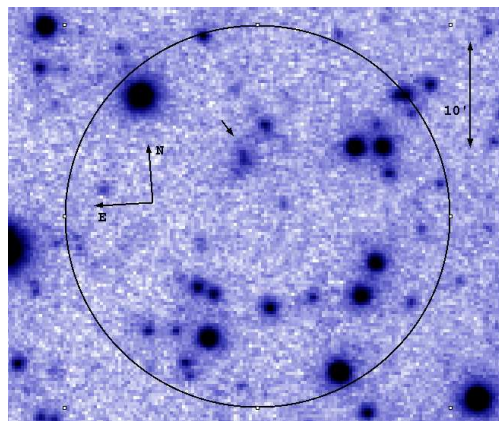
5.9.3 GRB 020317

Gama záblesk ze 17. března 2002 je prvním a zatím jediným zábleskem, na který BART mohl reagovat v reálném čase: zpráva o jevu přišla v noci, BART byl v provozu a ačkoli počasí nestálo za mnoho, podařilo se získat pozorování z celé noci po záblesku, tj. téměř 9 hodin pozorování. Pozorovací podmínky se postupně během noci trochu zlepšily, ale k ránu začalo být oblačno a přestože pozorování pokračovalo až do rozbřesku, snímky z poslední hodiny jsou velmi špatné (Jelinek et al., 2002c).

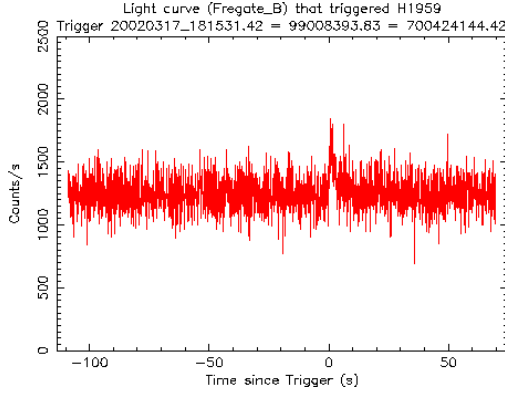
HETE trigger 1959 byl detekován přístroji WXM a FREGATE na HETE. Jeho zachycení bylo ohlášeno během 34 sekund, ale zvláštní spektrální vlastnosti záblesku zmátly palubní elektroniku, připravenou na „normální“ gama záblesky, takže byla pro zjištění pozice nutná pozemní analýza. Předběžná lokalizace záblesku byla k dispozici 53 minut po záblesku, zpřesnění pozice byla pak k dispozici po 6 a 9 hodinách. Pozemní analýza nakonec vyústila v chybový kruh o průměru 18' a spolehlivosti 90% se středem na

$$\alpha = 10^h 23^m 21^s \quad \delta = +12^\circ 44' 38'' \quad (J2000)$$

Záblesk H1959 byl kratší než 10 sekund s většinou detekce nastávající v počátečním tvrdém vrcholu o délce ~ 2 s. Průběh gama emise záblesku viz. obr. 28 (Ricker et al., 2002d).



Obrázek 27: Finální errorbox HETE na pozadí snímku BART WF. Prezentovaný snímek je kombinací 11 snímků ze začátku pozorování. Šipkou je označen kandidát na optický protějšek, který však nebyl prokázán.



Obrázek 28: Průběh intenzity gama emise GRB 020317 (HETE burst page, 2002)

Tabulka 3 ukazuje sled akcí souvisejících s přijetím zprávy a natočením teleskopu na pozici záblesku. BART byl tedy první, kdo pozoroval. Na součtu prvních 10 snímků byl přes silný šum nalezen nenápadný nový objekt, který jsme ohlásili v GCN reportu. Nebyl potvrzen. Nalezeno a vyvráceno bylo takových detekcí několik, skutečný protějšek nebyl nalezen. To může být zaviněno tím, že všechny observatoře s velkými dalekohledy měly tou dobou špatné počasí, ale také to může být tím, že GRB 020317 žádný dosvit neměl. Rozhodně však tento záblesk znamenal velký krok pro robotický teleskop BART.

Data z tohoto záblesku budou ještě později detailněji vyhodnocena. Krom snímků z BARTa máme k dispozici snímky z nového jednometrového dalekohledu na Kletci a máme rovněž přislíbeny snímky z dánského 1.54m na La Silla v Chile.

Čas UT	s UT	$t - t_N$	$\tau (= t - t_T)$	AKCE
18:15:31.42	65731.42	-	0	Trigger
19:11:50	69110	0	56.3 m	Začátek přen. zprávy
19:11:54	69114	4 s	56.4 m	Konec přen. zprávy
19:13:06	69186	76 s	57.6 m	Spuštění skriptu
19:13:07	69187	77 s		Začátek přesunu dal.
19:13:19	69199	89 s		Konec přesunu dal.
19:13:20	69200	90 s	57.8 m	Začátek první exp.

Tabulka 3: Časová posloupnost akcí na počátku sledování GRB 020317. t_N je okamžik začátku přenosu zprávy, t_T okamžik triggeru.

5.9.4 GRB 020331

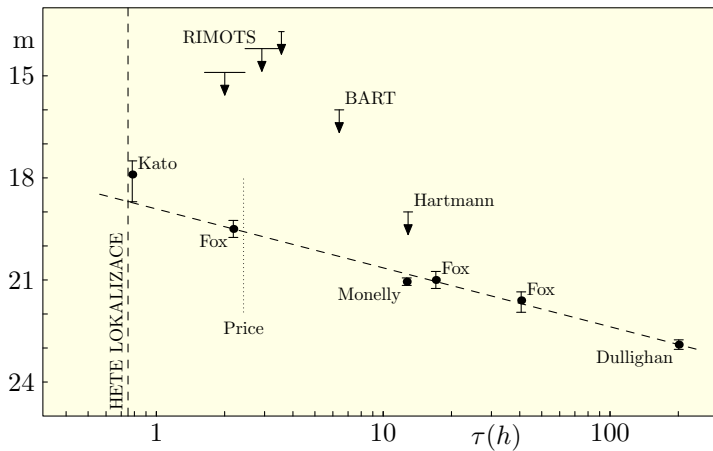
31.3.2002 detekovala HETE zařízeními FREGATE a WXM gama záblesk dlouhý přibližně 50 sekund. Předběžná lokalizace (s přesností 20') byla k dispozici během 40 minut, pozemní analýza pak zpřesnila polohu záblesku na kruh s 90% spolehlivostí o průměru 8 minut. Střed lokalizace byl na (Ricker et al., 2002b)

$$\alpha = 13^h 16^m 22.7^s \quad - 17^\circ 55' 23'' \quad (J2000).$$

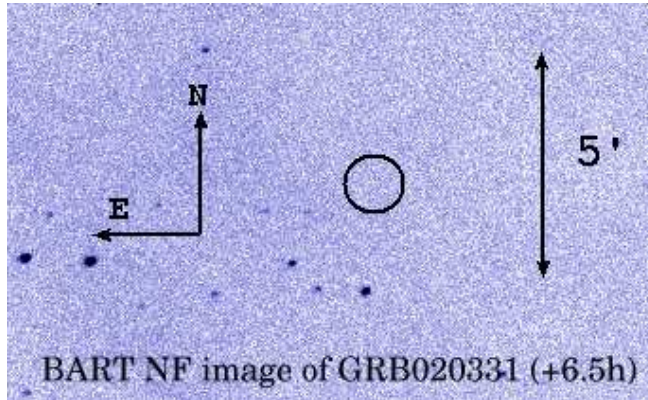
BART pozoroval polohu NF kamerou s časovým odstupem 6.4 hodiny. Snímek s expoziční dobou 120s pořízený ve 22:57 UT je ovšem citelně poznamenán malou výškou nad obzorem a znatelnou oblačností, která se sice protrhala do té míry, že bylo možno chvíli pozorovat, ale podmínky byly rozhodně nevalné. Limit snímku je cca 16mag na detekci objektu (15.6 je 3-sigma limit).

Pozorování dosvitu nalezeného Pricem jsou uvedena v tabulce, zvláštní pozornost si zaslouží pozorování Kato et al. (Kato et al., 2002), kteří pozorovali s prakticky nulovým zpožděním po HETE lokalizaci a jejich měření naznačuje, že by obvykle pozorovaný mocninný pokles mohl mít na počátku vývoje světelné křivky ještě jeden zlom. Poloha (Fox et al., 2002b):

$$\alpha = 13^h 16^m 09.54^s \quad - 17^\circ 55' 15.9'' \quad (J2000).$$



Obrázek 29: Světelná křivka optického dosvitu GRB 020331



Obrázek 30: Snímek pozice GRB 020331 pořízený BART NF.

5.9.5 XRB 020406

Tento záblesk je zde spíše pro úplnost. Už v době pozorování jsme věděli, že asi neuvidíme žádný optický protějšek, ale především z důvodu testu nového GRB skriptu jsem nechal teleskop pozorovat i další noc.¹³

Záblesk detekovala a lokalizovala družice RXTE (Smith & Levine,

¹³ Úvahu na téma humor v astronomii viz. část 9.

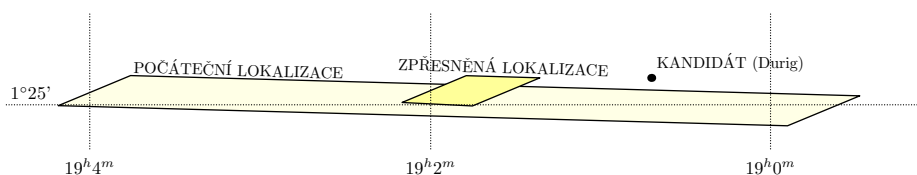
Pozorovatel	τ	pozorování
Kato et al. (2002)	47 m	$m_I = 17.9_{+0.8}^{-0.4}$
Kawai et al. (2002b)	1.6 h–3.66 h	$m > 14.9$, později slabší limit
Fox et al. (2002b)	2.184 h	$m_R \simeq 19.5$
Price et al. (2002b)	2.424 h	„weakly detected“
BART	6.4 h	$m_R > 16$
Fox et al. (2002b)	17.064 h	$m_R = 21$
Fox et al. (2002b)	40.585 h	$m_R \simeq 21.6$
Fox et al. (2002b)	? h	K_S band: detected
Hartmann (2002)	12.875 h	R, I - nic do ~ 19
Dullighan et al. (2002)	201 h	$m_R = 22.9 \pm 0.14$
Monnelly et al. (2002)	12.7 h	$m_R \simeq 21.05 \pm 0.11$

Tabulka 4: Pozorování OA GRB 020331

2002; Smith & Remillard, 2002) 6.4.2002 v 18:18:15 na

$$\alpha = 19^h 01^m 45.95^s \quad \delta = +01^\circ 26' 15.7'' \quad (J2000).$$

RXTE je rentgenová družice a záblesk detekovala v rentgenovém oboru, ale na základě jeho charakteristik — krátký, tvrdý a velmi jasný — podobných jiným detekcím záblesků gama byl zařazen do GCN mezi gama záblesky a dostal označení GRB 020406. Počáteční lokalizace měla podobu obdélníku o rozměru $1,1^\circ$ podél rovníku a $5'$ v deklinaci, zpřesnění pak tvar zkrátilo v rektascenzi na cca $15'$ viz. obr. 31.



Obrázek 31: Errorbox GRB 020406 z ASM/RXTE. Podle (Smith & Levine, 2002; Smith & Remillard, 2002; Durig & McDermott, 2002).

Doba detekce by byla velmi výhodná pro BARTa, ale lokalizace na letní obloze činí záblesk pozorovatelným počínaje přibližně jednou hodinou po půlnoci místního času s postupným zlepšováním podmínek k ránu. Navíc na Ondřejově sněžilo, takže bylo možno pozorovat až následující noc.

Kandidáta na optický protějšek našel D. Durig (Durig & McDermott, 2002) na nefiltrovaném snímku pořízeném dalekohledem velmi podobným NF dalekohledu BARTa. Jeho kandidát má mag 18.9 a nalézá se na

$$\alpha = 19^h 00^m 42.10^s \quad \delta = +01^\circ 27' 22.4'' \quad (J2000).$$

Po zpřesnění lokalizace záblesku družicí (Smith & Remillard, 2002), se však tento kandidát ocitl daleko za hranicí errorboxu. Další měření provedená Durigem, McDermottem a Garym 10.4. ukázala neproměnnost kandidáta z prvních pozorování a udala limitní magnitudu na optický protějšek jevu na nejméně 17.5^m . (March 7.5 UT) a 20^m 10.4 (Durig et al., 2002).

Vzhledem k tomu, že se tento záblesk nalézá nedaleko galaktického rovníku, je značně pravděpodobné, že se v případě optického kandidáta jedná o neznámou dlouhoperiodickou proměnnou hvězdu,

naopak u skutečného dosvitu, pokud existuje, bude zřejmě světlo ztlumeno mezihvězdnou extinkcí, která se dá zde v okolí galaktického rovníku čekat poměrně velká.

17.4.2002, po detailní analýze jevu vzkázal tým RXTE, že se nejednalo o gama záblesk, ale o rychlý rentgenový záblesk, na jehož pozici byl podobný jev pozorován už jednou 21.6.1997 (HETE burst page, 2002).

BART pozoroval error box tohoto jevu až následující den, optický protějšek jevu nebyl nalezen.

5.9.6 Shrnutí

Výsledky alertních pozorování BARTa jsou povzbudivé. Z pěti uvedených případů se jednou 17.3.2002, stalo, že GCN notice přišel v průběhu pozorování, tehdy byla reakční doba systému 90 sekund. Ve dvou případech byl BART nejrychlejší na světě a stal uznávanou součástí celosvětového GRB alertního systému.

Výsledky pozorování shrnuje tabulka 5.

Jev	τ_{MIN}	$\Delta\tau$	WF	NF	dosvit
GRB 020124	11.5 h	10 h	>14 (15)	-	Price et al.
GRB 020305	10.45 h	30 m	>14.3 (16)	17(18.5)	Price et al.
GRB 020317	57.8 m	90 s	>13 (14.5)	-	ne
GRB 020331	5.54 h	4.8 h	12.5	16	Price et al.
XRB 020406	29 h	24.5 h	~ 14	-	ne

Tabulka 5: Shrnutí alertních pozorování uskutečněných BARTem: τ_{min} je odstup prvního snímku od GRB triggeru, $\Delta\tau$ je doba mezi obdržením GCN notice BARTem a začátkem prvního snímku.

5.10 Monitoring

Z počtu pozorovaných záblesků jasně plyne, že většina času robotického dalekohledu je volná. Tento čas se využívá k fotometrickému monitorování vybraných objektů. Jedná se o aktivní galaktická jádra, eruptivní dvojhvězdy a několik supernov. Většina monitorovaných objektů (s výjimkou supernov) byla vybrána s ohledem na jejich budoucí zařazení do pozorovacího plánu družice INTEGRAL. Seznam těchto objektů je v tabulce 6. Fotometrické zpracování těchto měření není součástí tématu této diplomové práce a bude publikováno v samostatných pracích souvisejících s konkrétními objekty.

Eruptivní hvězdy	
GK Per	DX And
nova Cyg 8/2001	V838 Mon
Aktivní galaxie	
3C66.0B	NGC 185
MARK 1073	NGC 1275
NGC 3031	Mkn 198
UGC 2724	NGC 5194
Mkn 266 SW	NGC 6217
NGC 6926	UGC 11630
Mkn 896	UGC 11763
Mkn 313	MCG -03.58.007
Blazary	
BL Lac	RXS J12211+4742
Supernovy	
sn2001ib	sn2002ap
sn2002cb	

Tabulka 6: Seznam monitorovaných objektů.

VI. Diskuse

Hlavním cílem této diplomové práce bylo diskutovat, analyzovat a prověřit metodiku širokoúhlých CCD alertních systémů a zpracování a interpretaci získaných dat se zaměřením na systémy provozované skupinou astrofyziky vysokých energií na ASÚ AV ČR v Ondřejově v zahraniční spolupráci, tedy BART a BOOTES. Získané poznatky však mohou mít význam i pro analogické experimenty provozované dalšími skupinami.

Analýza dat a jejich vědecká interpretace není v případě těchto zařízení triviální a vyžaduje řešení řady specifických problémů. Typický stav před touto DP byl, že většina získaných snímků nebyla spolehlivě zpracována a interpretována, a to platilo pro všechny analogické světové experimenty. Hlavním důvodem bylo, že nebylo možné na širokoúhlá data spolehlivě a jednoduše použít postupy běžné při zpracování úzkoúhlých CCD snímků.

Za zkušebního provozu pod mým vedením bylo zařízením BART na ASÚ AV ČR v Ondřejově dosud získáno přes 4 000 CCD snímků WF a kolem 500 testovacích snímků NF CCD kamerou. Podařilo se tak získat velké množství cenných informací nezbytných pro diskusi a ověření řady postupů a metod zmiňovaných v této práci. Systém je dnes po období testů, jejich vyhodnocení a aplikovaných úpravách v operativním provozu. Hlavní vědecké aspekty byly diskutovány v předchozích kapitolách. Jde o následná optická pozorování míst gama záblesků a o automatické pozorování a fotometrii zadaných objektů.

Data získaná pro jiné objekty než GRB ukazují, že BART a podobné systémy lze s výhodou použít k automatickému monitorování zadaných objektů. To je cenné, jelikož získání adekvátního pozorovacího času na velkých CCD teleskopech je obtížné a vizuální data nemají požadovanou přesnost. Současná verze plánovače přístroje BART umožňuje automatické monitorování a fotometrii vybraných zadaných objektů v libovolné časové škále včetně pravidelných a následných pozorování. O tuto možnost je velký zájem např. ze

strany čerenkovských astrofyziků, kteří potřebují srovnávací optická data pro svá měření.

Podíl BARTa na dlouhodobém optickém pozorování vybraných objektů obsažených v galaktických scanech přístrojů na družici INTEGRAL a tím na jejich komplexní vědecké analýze byl vysoce hodnocen i členy konzorcia INTEGRAL ISDC.

Práce probíhala v mezinárodní spolupráci a o její výsledky je zájem v zahraničí zejména proto, že i zahraniční týmy řeší podobné problémy. Navíc existují další tři zahraniční týmy vyvíjející zařízení analogické BART, a to rovněž na základě teleskopu a montáže Meade a kamer STx SBIG. Jejich zájem o výsledky této práce je značný. Existují reálné plány na duplikaci zejména vyvinutých metod a postupů i programového vybavení pro další observační místa. Výsledkem by mohl být vznik světové sítě analogických navzájem kompatibilních systémů.

V závěrečné fázi DP BART pořídil optická data pro 5 GRB jako odezvu na hlášení z družic, zejména z HETE2. Ve dvou případech patřila optická data našeho přístroje k prvním pozorováním příslušných gama záblesků ve světovém měřítku. Tato pozorování prokázala správnost nastoupené cesty i koncepce experimentu. Potvrdilo se, že i robotický přístroj lokalizovaný v horších klimatických podmínkách má značný význam, zejména proto, že v oblasti střední Evropy jiná podobná zařízení pro výzkum GRB nejsou. Navíc se potvrdila i funkčnost vyvinutých programů. Vědecká sdělení o těchto provedených pozorováních jsme zveřejnili v mezinárodních cirkulářích GCN (které jsou obsaženy i v soustavě ADS) a uvažujeme o větší vědecké publikaci získaných dat v kombinaci s daty získanými ve spolupráci s většími teleskopy (KLENOT na Kleti, Danish 1.35m at La Silla).

Tato data a s tím spojené vědecké analýzy patří k mým původním výsledkům. Diskutované analýzy probíhaly často v mezinárodní spolupráci spočívající ve vzájemné výměně nepublikovaných výsledků a vzájemném srovnání a korelaci výsledků měření. U nás se do těchto analýz zapojila observatoř na kleti.

Tato data poskytla cenné limity pro optickou emisi příslušných gama záblesků. To, že nebyl nalezen optický protějšek, nesnižuje dle mého názoru nikterak vědecký význam těchto studií. Jednak proto, že pro problémy s družicí HETE2 byl počet lokalizovaných GRB nalezených touto družicí mnohem nižší než se původně předpokládalo (tento počet však již v nejbližší budoucnosti naroste s novými družicemi INTEGRAL, později Swift a další), dále proto, že chybové

plochy zdrojů byly vesměs větší a odezva mezi detekcí na družici a rozeslání zprávy pozemním pozorovatelům delší než se původně předpokládalo, a konečně proto, že s odhlédnutím na opožděnou optickou emisi dosvitů byl zatím pozorován jen jediný přímý optický záblesk gama záblesku (990123). To dokumentuje nejen velkou náročnost detekcí těchto jevů, ale také jejich velký význam. Je nepochybné, že druhý prokázaný a studovaný případ by byl z vědeckého hlediska extrémně cenný.

Důležitou částí mojí práce je získaná statistika výskytu pozadí, zejména kosmických částic v pořízených datech a analýza a diskuse jejich zobrazení. pozad'ové jevy totiž mohou snadno imitovat reálné optické transienty a pro širokouhlé experimenty — v případě ne zcela přesné znalosti pozice objektu — je to obtížný problém. Jedním z důvodů proč řada dat z podobných zahraničních experimentů dosud není spolehlivě zpracována je totiž i fakt, že na snímcích se běžně vyskytují pozad'ové jevy imitující reálné astrofyzikální dosvity a jejich vyloučení není snadné. Závěry mých studií jsou zahrnuty do vědecké publikace mezinárodního týmu autorů (jehož jsem členem) zasláné do redakce časopisu Science.

Robotický teleskop BART je rovněž součástí pozemního segmentu mezinárodní vědecké družice pro astrofyziku vysokých energií ESA INTEGRAL která startuje 17.10.2002. Metody a procedury diskutované v této DP budou proto z velké části aplikovatelné i pro podporu vědeckých výzkumů v rámci tohoto projektu. Kromě alertních pozorování a analýz pozic GRB detekovaných přístroji družice - předpokládá se asi 25 objektů ročně - půjde i o monitorování objektů studovaných družicí a také o sledování zorného pole přístrojů na palubě simultánně ze zemského povrchu. Očekáváme, že i tato data přispějí ke zdaru multispektrálních a komplexních vědeckých analýz v rámci projektu INTEGRAL.

WF kamera na přístroji BART je současně technologickou kamerou (OMC TD) palubního přístroje OMC - Optical Monitoring Camera - družice INTEGRAL. Mnou pořízená data posloužila po vhodné úpravě a zaostření k testům různých programů souvisejících s tímto experimentem. Na WF kameře BART = OMC TD byly také ověřeny některé postupy které budou použitelné i pro data z OMC.

Práce probíhala ve spolupráci se španělskými týmy v LAEFF INTA Madrid a IAA Granada.

VII. Závěr

Závěrem lze říci, že analýza několika tisíc CCD snímků z experimentů BART a BOOTES, která byla předmětem této práce, prokázala význam alertních širokoúhlých CCD systémů, a to především k řešení specifických úkolů nedostupných pro normální CCD teleskopy, jako je pravidelné monitorování zadaných objektů a snímání oblastí míst gama záblesků s následným vyhledáváním proměnných a nových objektů.

Byly navrženy, diskutovány a testovány metody a postupy hledání nových objektů na datech pořízených uvedenými experimenty. Navrhl jsem a vypracoval i vlastní program pro identifikaci objektů na širokoúhlých CCD snímcích.

Zde navržený alternativní postup spočívá v sejmutí celé oblohy na hard disk počítače a následné použití této databáze pro rychlé vyhledávání optických transientů, a to srovnáním s archivovanými daty pořízenými tímž přístrojem. Tento postup má některé výhody, například může proběhnout v reálném čase, což by mohlo mít za následek možnost rychlého poskytnutí pozice transientu větším teleskopům pro další podrobné analýzy. Jinou alternativou je srovnávání snímků pořízených za sebou v jedné noci (ale již s určitou časovou ztrátou a nemožností nalézt pomalu klesající objekt), případně srovnávání s katalogem, nebo se snímkem pořízeným druhou noc (velká časová ztráta).

Analýza snímků v celém rozsahu zůstává po vyhodnocení závěrů i nadále značným problémem v případě, že je transienty třeba hledat bez znalosti přesnější pozice. Tak tomu bylo pro data související s experimentem BATSE na družici CGRO — chybová plocha až 10 stupňů — a je tomu tak i pro část rychlých dat z družice HETE, kde jsou první informace většinou zatíženy nepřesností v pozici o velikosti 2 až 3 stupňů. Snímky jsou pořizovány často za neideálních podmínek, při absenci lidské kontroly a plné automatizaci se ukládají často i snímky s různou deviací, přičemž jediná metoda nedokáže v

plné šíři postihnout celé jejich spektrum. Zatím se jako ideální jeví metoda aplikace softwarového vyhledávání, srovnání s katalogem a identifikace v kombinaci s lidským činitelem.

Objekt OT GRB000313 nalezený ve snímcích experimentu BOOTES zůstává i po podrobné analýze založené na studiu profilu, PSF a srovnáním s okolními hvězdami podobné magnitudy druhým známým kandidátem na přímou optickou emisi gama záblesku (článek s mým spoluautorstvím je ve stádiu dokončování).

Rozbory uvedené v diplomové práci ukazují programovou i koncepční správnost řešení přístroje BART a jeho význam při rychlých pozorováních míst záblesků gama. Tato pozorování potom přímo souvisejí se studiem fyzikálních procesů ve zdrojích záblesků gama a jejich nejbližším okolí včetně ověření či vyvrácení stávajících teoretických modelů.

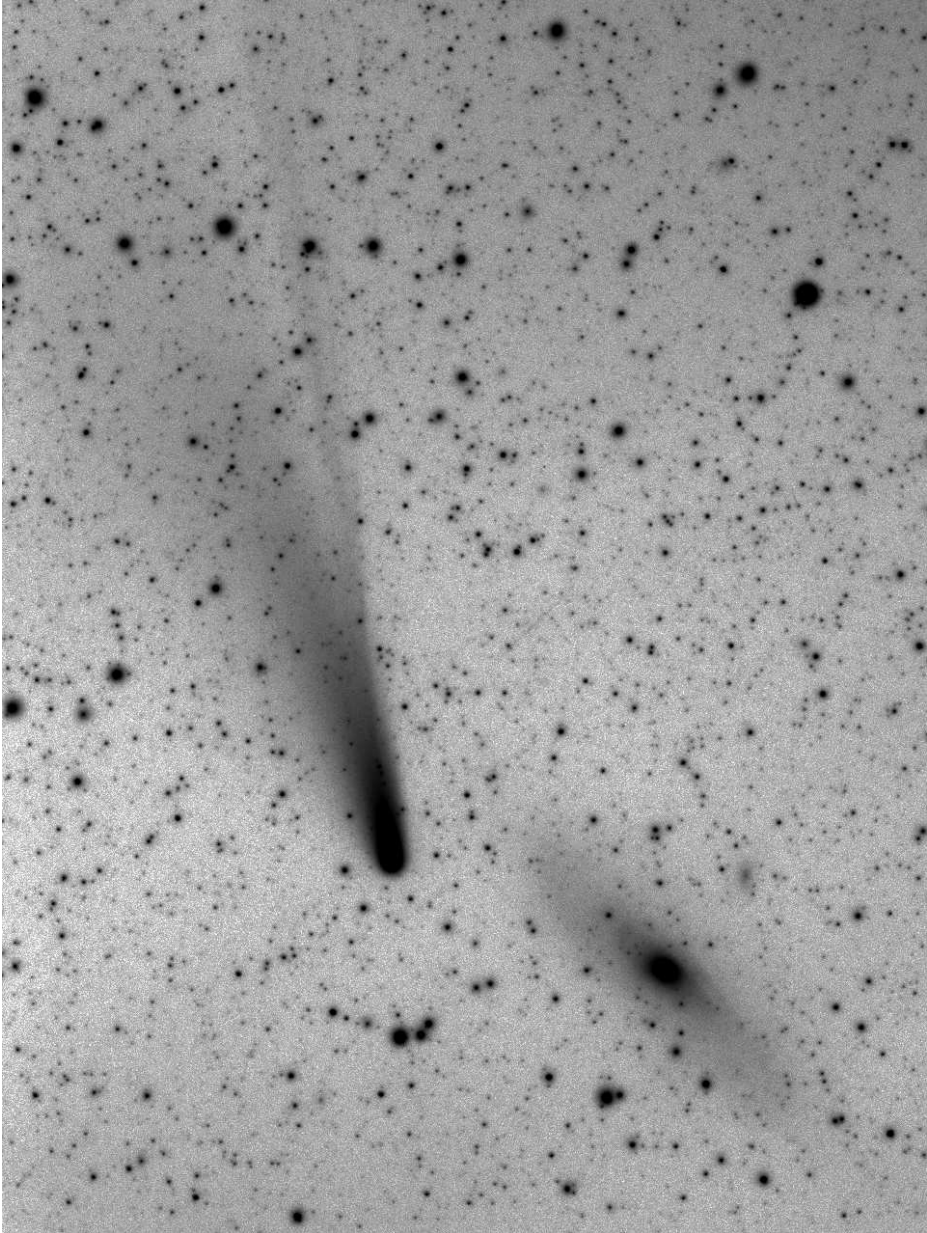
Časově korelovalo řešení DP s výpadkem v počtu detekova(tel)-ných gama záblesků, neboť CGRO poskytovala lokalizace jen do května 2000 a HETE, která ji měla zastoupit měla na počátku svého působení určité technické problémy. V následujícím období lze očekávat větší počet detekovaných a lokalizovaných gama záblesků a tím i větší počet pozorování a odpovídajících fyzikálních analýz. Přístroj se pak stane ideálním pozemním doplňkem družic Swift a INTEGRAL.

Reference

- Akerlof, C., Balsano, R., Barthelmy, S., et al. 1999a, *Nature*, 398, 400
- Akerlof, C. W., McKay, T. A., Zhu, J., Chen, J. S., & Zhang, H. T. 1999b, *IAU Circ.*, 7100
- Bemporad, A. 1904, *Grossh. Sternwarte Heidelberg*
- Bloom, J. S. 2002, *GCN Circ*, 1225
- Boër, M., Thiébaud, C., Klotz, A., et al. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 238, *Astronomical Data Analysis Software and Systems X*, ed. F. R. Harnden, Jr., F. A. Primini, & H. E. Payne, 111
- Bondar, S., Pozanenko, A., & Rumyantsev, V. 2002, *GCN Circ*, 1228
- Burud, I., Rhoads, J., Fruchter, A., & Griep, D. 2002, *GCN Circ*, 1283
- Castro-Tirado, A. J., Castro Cerón, J. M., Gorosabel, J., et al. 2002, *A&A*, 393, L55
- Chaty, S., Haswell, C. A., Smith, G. P., Smail, I., & Hynes, R. I. 2000, *IAU Circ.*, 7394
- Costa, E., Frontera, F., Heise, J., et al. 1997, *Nature*, 387, 783
- Dullighan, A., Monnelly, G., Butler, N., Vanderspek, R., & Ricker, G. 2002, *GCN Circ*, 1346
- Durig, D. & McDermott, A. 2002, *GCN Circ*, 1338
- Durig, D., McDermott, A., & Gary, B. 2002, *GCN Circ*, 1351
- Fishman, G. J. & Meegan, C. A. 1995, *ARAA*, 33, 415
- Fox, D. W., Price, P. A., & Darling, J. 2002a, *GCN Circ*, 1270
- Fox, D. W., Price, P. A., Yost, S. A., et al. 2002b, *GCN Circ*, 1334
- Gorosabel, J., Hjorth, J., Pursimo, T., et al. 2002, *GCN Circ*, 1224
- Greiner, J. 2002, <http://www.aip.de/~jcg/grbgen.html>
- Hardie, R. 1962, *Stars and Stellar Systems*, (W.A. Hiltner, Ed.), University of Chicago Press, Chicago, 178
- Hartmann, D. H. 2002, *GCN Circ*, 1318
- Hessmann, F. 2002, <http://www.uni-sw.gwdg.de/~hessman/MONET/links.html>
- HETE burst page. 2002, <http://space.mit.edu/HETE/Bursts>
- Hjorth, J., Gorosabel, J., & Fynbo, J. 2002, *GCN Circ*, 1227
- Hurley, K., Cline, T., Ricker, G., et al. 2002, *GCN Circ*, 1223
- Internetová stránka projektu ETC. 2002, <http://space.mit.edu/ETC>
- Internetová stránka projektu ROTSE. 2002, <http://www.umich.edu/~rotse/>
- Jelinek, M., Kubanek, P., Nekola, M., & Hudec, R. 2002a, *GCN Circ*, 1265
- Jelinek, M., Kubanek, P., Sveda, L., Hudec, R., & Nekola, M. 2002b, *GCN Circ*, 1236
- Jelinek, M., Nekola, M., Kubanek, P., Stoklasova, I., & Hudec, R. 2002c, *GCN Circ*, 1278
- Kato, T., Yamaoka, H., Ishioka, R., & Uemura, M. 2002, *GCN Circ*, 1363
- Kawai, N., Urata, Y., Kohama, M., et al. 2002a, *GCN Circ*, 1343
- Kawai, N., Urata, Y., Kohama, M., et al. 2002b, *GCN Circ*, 1344
- Krimm, H. A., Vanderspek, R. K., & Ricker, G. R. 1996, *A&AS*, 120, 251
- Řrolupper, F. 2001, *Diplomová práce MFF UK*
- Lascaux, W. 2002, <http://lascaux.asu.cas.cz/>
- Lee, B. C., Lamb, D. Q., Tucker, D. L., et al. 2002, *GCN Circ*, 1275
- Lopez-Morales, M., Clemens, J. C., & Reichart, D. E. 2002, *GCN Circ*, 1279

- Martinez, P. & Klotz, A. 1998, *A Practical Guide to CCD Astronomy* (Cambridge University Press)
- Mészáros, P. & Rees, M. J. 1997, *ApJ*, 476, 232
- Monnelly, G., Dullighan, A., Butler, N., Vanderspek, R., & Ricker, G. 2002, *GCN Circ*, 1339
- Moran, J., Nysewander, M., Shella, K., et al. 2002, *GCN Circ*, 1264
- Ohyama, Y., Yoshida, M., Kawabata, K. S., et al. 2002, *GCN Circ*, 1271
- Pavlenko, E. & Rumyantsev, V. 2002, *GCN Circ*, 1226
- Price, P. A. & Fox, D. W. 2002, *GCN Circ*, 1267
- Price, P. A., Fox, D. W., Yost, S. A., et al. 2002a, *GCN Circ*, 1221
- Price, P. A., Tinney, C. G., & Schmidt, B. P. 2002b, *GCN Circ*, 1322
- Remillard, R., Morgan, E., Smith, D., & Smith, E. 2000, *IAU Circ.*, 7389
- Ricker, G., Atteia, J.-L., Kawai, N., et al. 2002a, *GCN Circ*, 1220
- Ricker, G., Atteia, J.-L., Kawai, N., et al. 2002b, *GCN Circ*, 1315
- Ricker, G., Atteia, J.-L., Kawai, N., et al. 2002c, *GCN Circ*, 1262
- Ricker, G., Atteia, J.-L., Kawai, N., et al. 2002d, *GCN Circ*, 1280
- Salomonson, A. 1998, *fixme*
- Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, *ApJ*, 497, L17+
- Smith, D. A. & Levine, A. M. 2002, *GCN Circ*, 1332
- Smith, D. A. & Remillard, R. 2002, *GCN Circ*, 1341
- Sterken, C. & Manfroid, J., eds. 1992, *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 175, *Astronomical Photometry, A Guide*, 288
- Štrobl, J. 2001, *Diplomová práce MFF UK*
- Torii, K., Kato, T., Yamaoka, H., & Yoshida, A. 2002, *GCN Circ*, 1378
- van Paradijs, J., Groot, P. J., Galama, T., et al. 1997, *Nature*, 386, 686
- Varady, M. & Hudec, R. 1992, *A&A*, 261, 365
- Williams, G. G., Hartmann, D. H., Park, H. S., et al. 2000, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 526, *Gamma-ray Bursts*, 5th Huntsville Symposium, ed. R. M. Kippen, R. S. Mallozzi, & G. J. Fishman, 250–254
- Young, A. T. & Irvine, W. M. 1967, *AJ*, 72, 945

VIII. Obrazové přílohy



Obrázek 33: Kometa Ikeya-Zhang na snímku BART WF ze 4.4.2002. Galaxie je Velká galaxie M31 v Andromedě, kratší hrana snímku měří 4.8° .

Druhé vydání
Počet kopií: 4
Praha, březen 2018