

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2013

JÁN OPAVSKÝ



MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



Svetelné krivky kompaktných objektů

Bakalářská práce

Ján Opavský

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

Bibliografický záznam

Autor:	Ján Opavský Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Název práce:	Svetelné krivky kompaktných objektov
Studijní program:	Fyzika
Studijní obor:	Astrofyzika
Vedoucí práce:	Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
Akademický rok:	2012/2013
Počet stran:	ix + 24
Klíčová slova:	neutónová hviezda; magnetar; Swift; BAT; burst; metóda najmenších štvorcov

Bibliographic Entry

Author: Ján Opavský
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: Light curves of compact objects

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2012/2013

Number of Pages: ix + 24

Keywords: neutron star; magnetar; Swift; BAT; burst; least squares method

Abstrakt

V této bakalářské práci se věnujeme zkoumání světelných křivek neutronových hvězd s extrémně silnými magnetickými poli, magnetarů. Jejich magnetická pole deformují obal hvězd, čímž dochází k nárůstu intenzity vyzařování, pozorovaných jako záblesky. Popis mechanismu vzniku těchto záblesků a matematický popis jejich tvaru jsou problémem, který není zcela vyřešený. Zkoumané světelné křivky se záblesky byly pořízeny vesmírnou sondou Swift, konkrétně jejím modulem BAT. Tyto záblesky v práci fitujeme matematickým modelem navrhnutým Gavriilem, Kaspi a Woodsem. Kromě tohoto modelu jsme ještě využili jeho modifikaci, kterou jsme sami navrhli jako alternativní řešení. V závěru práce oba modely srovnáváme a diskutujeme výsledky jimi pořízené.

Abstract

In this thesis we study the light curves of neutron stars with extremely strong magnetic fields, magnetars. These magnetic fields deform the crusts of the stars which leads to growth of their luminous intensity observed as flashes. Describing the mechanism of generation of these flashes and mathematical description of their shapes is still just a partly solved problem. Studied light curves were obtained by space telescope's Swift module, BAT. Later in thesis we fit these flashes by mathematical model function designed by Gavriil, Kaspi and Woods. Then we use an alternative solution, our own modification of this model. In the end of the thesis we compare the models and discuss the results.



Masarykova univerzita

Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Ján Opavský
Studijní program : Aplikovaná fyzika
Studijní obor : Astrofyzika

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

Světelné křivky kompaktních objektů

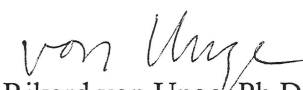
Light Curves of compact objects

Zásady pro vypracování:

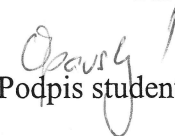
Mezi kompaktní objekty zahrnujeme širokou skupinu systémů jako jsou černé díry, bílí trpaslíci nebo neutronové hvězdy. Všechny tyto objekty vykazují řadu zajímavých projevů své aktivity, které se díky jejich velikostem často projevují ve vysokoenergetické části spektra. Zároveň není dosud podrobně osvětlena fyzikální podstata a mechanismy vyzařování těchto objektů. Cílem této práce je studium světelných křivek vhodně vybraných kandidátů za pomoci dostupných dat z kosmických sond, optických dalekohledů a radioteleskopů. Pro úspěšné vypracování se předpokládá znalost základů astronomické fotometrie a spektroskopie a to nejen v optickém oboru, dále pak hromadného zpracování dat a počítačových systémů. Práce bude vypracována ve slovenštině.

Vedoucí bakalářské práce : Mgr. Filip Hroch, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce : září 2011
Datum odevzdání bakalářské práce : dle harmonogramu ak. roku 2011/2012

V Brně dne 13. 12. 2011


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

Zadání bakalářské práce převzal dne: 14.2.2012


Podpis studenta

Poděkování

Chcel by som poďakovať hlavne svojmu vedúcemu práce, ktorého cenné rady viedli k vzniku tejto práce a svojej spolužiačke Kačenke za plodné debaty.

Prohlášení

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

Brno 13. března 2013

.....
Ján Opavský

Obsah

Úvod	ix
Kapitola 1. Teoretická časť	1
1.1 Neutrónové hviezdy	1
1.1.1 História objavu	1
1.2 Pulzary	2
1.3 Magnetary	2
1.3.1 Vznik burstov	3
1.3.2 Morfológia burstov	4
1.4 Swift	5
1.4.1 BAT	5
1.4.2 BAT operácie	7
Kapitola 2. Získavanie a redukcia pozorovaní	8
2.1 Katalógy pozorovaní	8
2.2 Sťahovanie a redukcia dát	9
2.2.1 batgrbproduct	10
2.3 Detekcia burstov	10
Kapitola 3. Fitovanie burstov	12
3.1 Matematický model	12
3.1.1 Model č.1 – po častiach spojitý	12
3.1.2 Model č.2 – spojitá funkcia	12
3.2 Počiatočný odhad parametrov	13
3.3 Implementácia modelov	14
Kapitola 4. Výsledky	15
Výsledky	15
4.1 SGR1900+14	15
4.1.1 ID 203127	15
4.1.2 ID 240801	17
4.2 SGR1806+20	18
4.2.1 ID 291587	18

Záver	22
Zoznam použitej literatúry	24

Úvod

Hviezdy, tak ako ľudia, prechádzajú rôznymi fázami svojho „života“, od ich zrodu až po zánik. Niektoré po spálení jadrového paliva explodujú a ostane po nich zvyšok, hviezda tvorená z neutrónov. Tieto objekty s rozmermi o veľkosti mesta, sú však schopné vyžarovať elektromagnetické vlny tak intenzívne, že ich môžeme pozorovať aj napriek ich vzdialenosti, niekoľko tisíc svetelných rokov, zo Zeme a vesmírnych sond. Jedným z najexotickejších objektov tohto druhu, magnetary, sa vyznačujú magnetickými poľami s extrémnymi hodnotami. V súčasnosti sú to najsilnejšie magnetické polia, aké človek kedy pozoroval.

Napriek tomu, že magnetary sú známe už 20 rokov, stále nevieme ich správanie presne popísať. Magnetické pole tieto hviezdy deformuje a tým je vyžarované enormné množstvo žiarenia, ktoré pozorujeme ako záblesky – bursty. Napriek tomu, že tieto záblesky sú také intenzívne, voľným okom ich pozorovať nie je možné. Nachádzajú sa vo vysokých energetických pásmach a sú pozorovateľné len špeciálnymi prístrojmi z vesmíru. V našej práci sme sa zaoberali práve takýmito zábleskami, ktoré boli zachytené v posledných rokoch modulom BAT vesmírnej sondy Swift. Ten je určený práve na detekciu čo najväčšieho počtu zábleskov gama žiarenia na oblohe, z ktorej veľkú časť dokáže naraz zachytiť. Pokúsili sme sa jednotlivé záblesky identifikovať a pomocou matematického modelu popísať ich tvar. Použili sme pri tom dve modelové funkcie, jedna pochádzala z článku, ktorý sa podobnou problematikou zaoberal. Druhá bola jej úpravou, ktorú sme sami navrhli.

Práca si dáva za cieľ overenie funkcionality prebratého modelu a komparáciu výsledkov s vlastným návrhom riešenia problému. V závere práce diskutujeme výsledky a porovnávame ich z hľadiska kvality.

Kapitola 1

Teoretická časť

1.1 Neutrónové hviezdy

Neutrónové hviezdy sú extrémne husté a pomerne malé hviezdy, ktoré tvoria predovšetkým neutróny. Sú to takzvané kompaktné objekty a sú jedným zo záverečných štádií života hviezd; ďalšími sú napríklad biele trpaslíky a čierne diery.

Ak po kolapse jadra hviezdy, ktorá už vyčerpala svoje zásoby paliva pre termojadrové procesy, nastáva výbuch supernovy, môže vzniknúť rýchlo rotujúca neutrónová hviezda s polomerom rádovo v kilometroch a hmotnosťou približne 1,5 až 3,2 $M_{\odot}$.^[1]

1.1.1 História objavu

V roku 1934 Baade a Zwicky navrhli myšlienku neutrónových hviezd, ktoré by mali mať veľmi veľkú hustotu a malý polomer a mali by byť oveľa silnejšie gravitačne viazané ako obyčajné hviezdy. Taktiež vyslovili pozoruhodne predvídavý návrh, že by mali byť vytvorené počas explózie supernov.

Baade and Zwicky (1934): „With all reserve we advance the view that supernovae represent the transitions from ordinary stars into neutron stars, which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons.“

Prvé modely neutrónových hviezd vypočítali Oppenheimer a Volkoff (1939), ktorí predpokladali hmotu zloženú z ideálneho plynu s vysokou hustotou zloženého z voľných neutrónov. Práca ohľadom neutrónových hviezd sa v tomto čase sústreďovala hlavne na myšlienku, že neutrónové jadrá v masívnych normálnych hviezdach môžu byť zdrojmi energie hviezd. Táto motivácia vymizla, keď boli pochopené detaily termojadrovej fúzie, a neutrónové hviezdy tak boli astronomickou spoločnosťou všeobecne ignorované nasledujúcich 30 rokov.

Častým dôvodom zanedbania myšlienky neutrónových hviezd bol fakt, že kvôli ich malému rozmeru by bolo ich zvyškové tepelné žiarenie príliš slabé na pozorovanie optickými teleskopmi. Avšak objavenie kozmických neslnečných röntgenových zdrojov Giacconim (et al. — Gursky, Paolini a Rossi) v roku 1962 vyvolalo náhly vzostup záujmu o neutrónové hviezdy. Značné množstvo teoretikov nezávisle špekulovali o tom, že röntgenový teleskop pozoroval mladú, horúcu neutrónovú hviezdu a horúčkovo začali počítať chladnutie neutrónových hviezd. Toto bádanie vyústilo do objavu pulzarov koncom roka 1967

(Hewish, Bell, Pilkington, Scott a Collins). Neskôr Gold (1968) navrhol model rotujúcej neutrónovej hviezdy, ktorý je doteraz všeobecne uznávaný.

Od roku 1968 vzniklo veľa teoretických prác ohľadom vlastností neutrónových hviezd, ktoré ďalej podporil aj objav pulzujúcich kompaktných röntgenových zdrojov (x-ray pulsars) satelitom UHURU v roku 1971. Tie sú považované za neutrónové hviezdy v tesných binárnych systémoch naberaajúcich plyn z ich normálneho hviezdneho spoločníka.

Takmer súčasný objav pulzarov v súhvezdí Kraba a Plachiet na jeseň roku 1968 (Vela: Large, Vaughan a Mills (1968), Crab: Staelin a Reitenstein (1968) a Richards a Cornella (1969) (rádiové pulzy) a Cocke, Disney a Taylor (1969) (optické pulzy)), ktoré sa oba nachádzajú v pozostatkoch supernovy, poskytli dôkaz o tom, že neutrónové hviezdy vznikajú pri výbuchoch supernov. Napríklad Krabia hmlovina je pozostatkom supernovy, ktorej výbuch pozorovali čínski astronómovia v roku 1054.

Optické a röntgenové pozorovania binárnych röntgenových zdrojov umožnili určiť hmotnosti neutrónových hviezd v niektorých týchto systémoch. Objav prvého binárneho pulzaru Hulseom a Taylorom (1975) taktiež poskytol možnosť zmerať hmotnosť neutrónovej hviezdy a overiť emisiu gravitačného žiarenia.

Táto časť bola spracovaná na základe [2, 9]

1.2 Pulzary

Pulzary sú rýchlo rotujúce neutrónové hviezdy emitujúce elektromagnetické žiarenie. Táto rotácia sa prejavuje periodickou zmenou intenzity signálu, ktorý z nich pozorujeme. Delia sa do troch hlavných skupín[2]:

- rotačne poháňané pulzary, ktoré získavajú energiu žiarenia z rotačnej energie. Vysielajú väčšinou rádiové impulzy zo svojich magnetických pólov.
- röntgenové pulzary poháňané akréciou materiálu (potenciálnou energiou dopadajúceho materiálu) od svojho blízkeho hviezdneho spoločníka na akréčny disk, na ktorom vznikajú horúce škvŕny žiariace v röntgenovej oblasti.
- magnetary, ktoré zahŕňajú SGR (Soft Gamma Ray Repeater) a AXP (Anomalous X-Ray Pulsars). Tieto hviezdy získavajú energiu z rozpadu obrovského magnetického poľa a emitujú hlavne röntgenové a gama žiarenie.

1.3 Magnetary

Magnetary (AXP a SGR) sú exotické neutrónové hviezdy emitujúce žiarenie s vysokou energiou (1–10 keV a vyššie) a najsilnejším magnetickým poľom, aké bolo doteraz vo vesmíre zistené. Hodnoty indukcie magnetického poľa na povrchu magnetaru dosahujú rádovo až 10^{14} G¹. Tieto hviezdy sa ďalej vyznačujú periódou rotácie v úzkom intervale hodnôt približne do 12 sekúnd, typickým trvalým žiarivým výkonom $10^{27} - 10^{29}$ W, žiadnym

¹Jednotka Gauss je odvodená z jednotky Tesla, pričom medzi nimi platí vzťah: $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$. Pre lepšiu predstavu čitateľa, magnetické pole Zeme sa pohybuje od 0,3 do 0,6 G.[8]

dôkazom Dopplerovského posunu v svetelnej krivke a spomaľovaním rotácie v rozsahu $10^{-13} - 10^{-10}$ s/s.

Koncom 70. rokov vedci pozorovali na tú dobu neobvyklé záklesky gamma žiarenia. Dovtedy známe GRB (Gamma-ray Burst) sú typické svojím unikátnym výskytom - nikdy neprichádzajú z rovnakého miesta viackrát. Nový typ zákleskov však prichádzal často z rovnakého zdroja a pretože tieto záblesky mali dlhšie vlnové dĺžky ako gamma záblesky, dostali pomenovanie „Soft Gamma Ray Bursts“². [9]

Existencia magnetarov bola prvýkrát navrhnutá na začiatku 90. rokov Duncanom a Thompsonom (1992). Tí predpokladali, že čoskoro po kolapse jadra a následnej explózii supernovy môžu konvektívne pohyby vo vnútri novej hviezdy a jej rotácia výrazne zosilniť magnetické pole pomocou pôsobenia tzv. procesu „dynamo action“. Pre vytvorenie poľa tak silného, ako majú magnetary, je nutné, aby hviezda tesne po vzniku rotovala dostatočne rýchlo. Napríklad neutrónová hviezda v Krabej hmlovine mala po vzniku periódu 20 ms, čo však nebolo dostatočne rýchle, aby mohol vzniknúť magnetar. Model magnetarov, pôvodne vyvinutý na popis fenoménu SGR, v súčasnej dobe však rovnako úspešne popisuje vlastnosti ďalšej triedy zvláštnych neutrónových hviezd, AXP - anomálnych röntgenových pulzarov. [4]

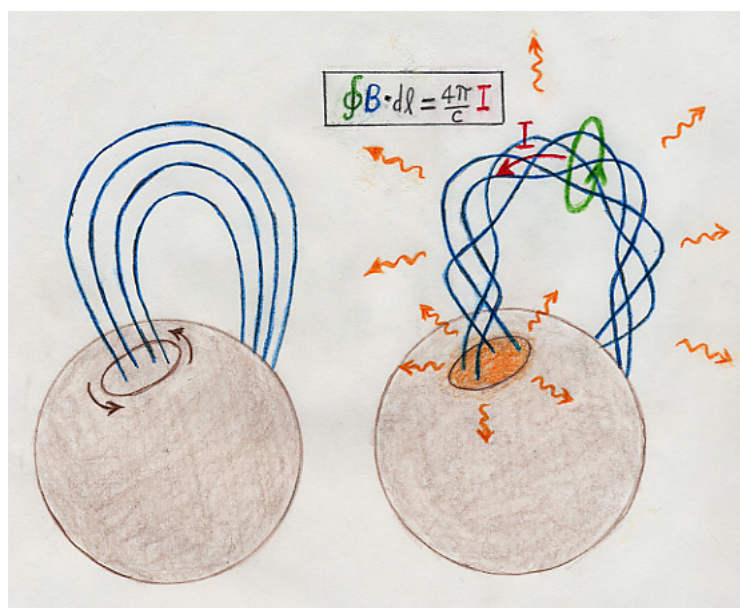
Aj keď sú magnetické polia magnetarov veľmi silné, nie sú tým najsilnejším možným poľom, ktoré by v prírode mohlo teoreticky existovať. Pole silnejšie než $10^{45} - 10^{49}$ T by doslova rozložilo vákuum kvantovo-mechanickým procesom vytvorenia magnetického monopólu („via the quantum mechanical process of magnetic monopole creation“). Avšak neexistuje žiadny známy spôsob, ako by tak silné polia mohli byť vygenerované. Magnetary sú tak doteraz najsilnejšie známe zmagnetizované objekty vo vesmíre. [9]

1.3.1 Vznik burstov

Neutrónové hviezdy sú pokryté extrémne hustou kôrou s hrúbkou $\approx 1 - 2$ km. Jej vlastnosti ako jeden z prých skúmal Malvin Ruderman. Kôra je tvorená na povrchu železom a hlbšie sa jej materiál stáva hustejším. Je tu možná prítomnosť voľných neutrónov a elektrónov. „Klasické“ neutrónové hviezdy majú túto kôru stabilnú. Stabilitou v tomto prípade myslíme jej nestlačiteľnosť vo vertikálnom smere. Tá je zabezpečená kvantovo-mechanickou nestlačiteľnosťou neutrónovo-elektrónového materiálu vo vnútri hviezdy. Gravitačné a tlakové sily sa takto dostávajú do rovnováhy, ktorú je takmer nemožné narušiť. Naopak elastické vlastnosti kôry sú dané slabšími Coulombovskými silami a preto je v horizontálnom smere ľahšie deformovateľná. Nestabilnou sa ale v tomto zmysle stáva až pri magnetických poliach rádovo 10^{14} G, čo je prípad magnetarov. [4]

Na obrázku 1.1 je nakreslený mechanizmus vzniku burstu. Na ľavej časti obrázku magnetické pole B (modrá farba) prechádza kôrou hviezdy a hviezda je stabilná. Ak je pole dostatočne silné, postupne začne deformovať kôru. Tá je, ako sme uviedli, v horizontálnom smere ťažko deformovateľná a preto ju začne pole stáčať. Pretože kôra a pole sú na seba naviazané, začnú sa stáčať aj siločiar magnetického poľa - pravá časť obrázku. Podľa Ampérovho zákona sa začne stáčaním siločiar indukovať elektrický prúd I . Nabité častice (oranžová farba) sa pohybujú pozdĺž siločiar magnetického poľa. Po uvoľnení z neho

²Presnejšie pomenovanie by bolo Hard X—Ray Bursts, pretože maximum intenzity zábleskov sa nachádza v oblasti röntgenovej oblasti spektra.



Obr. 1.1: vznik burstu [9]

protóny a ťažšie ióny dopadajú na povrch hviezdy, kde pri interakcii s kôrou vzniká mäkké röntgenové žiarenie. Elektróny sa pohybujú smerom od hviezdy. Keďže sú ľahšie ako protóny a ióny, majú oveľa vyššiu rýchlosť. Po zrážke z röntgenovým žiarením z interakcie ťažších častíc toto žiarenie prechádza k vyšším energiám (až do gama spektra).[9]

Takto popísaný mechanizmus vzniku burstov zodpovedá aj ich reálnym spektrálnym charakteristikám. Ide o zjednodušený model, ktorý však cieľu našej práce postačuje.

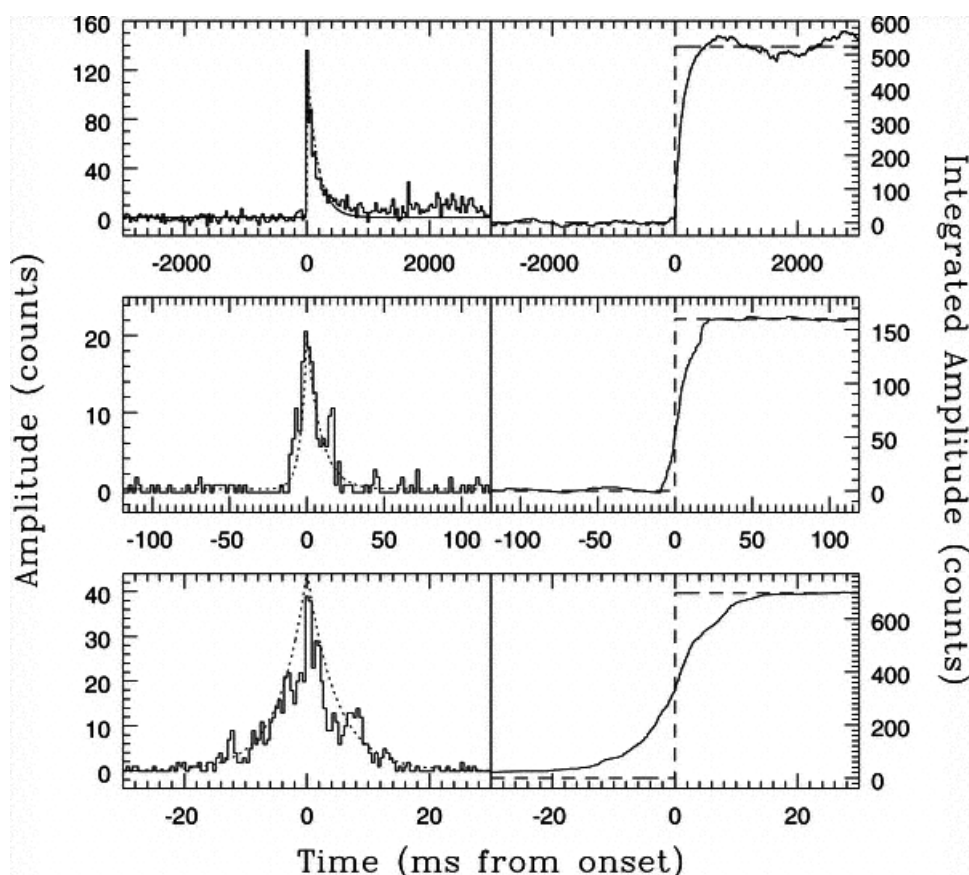
1.3.2 Morfológia burstov

Jednotlivé bursty sa od seba neodlišujú len svojou intenzitou a trvaním, ale aj tvarom. Ten býva zpravidla[6]:

- rýchly lineárny nárast a exponenciálny pokles – *lin-exp* model
- takmer symetrický, pri ktorom je rýchlejší
 - nárast
 - pokles
- symetrický (v extrémnom prípade)

V tejto práci sa zaoberáme posledným typom, ktorý je dosť spoľahlivo popísateľný matematickým modelom.

Rôzne tvary burstov sú ukázané na obrázku 1.2. Prvý má tvar *lin-exp* modelu, druhý má nárast rýchlejší ako pokles a u tretieho je pokles rýchlejší ako nárast. Na pravej strane sú grafy kumulovaných countov očistených o pozadie.



Obr. 1.2: Rôzne tvary burstov objektu 1E 2259+586 [6]

1.4 Swift

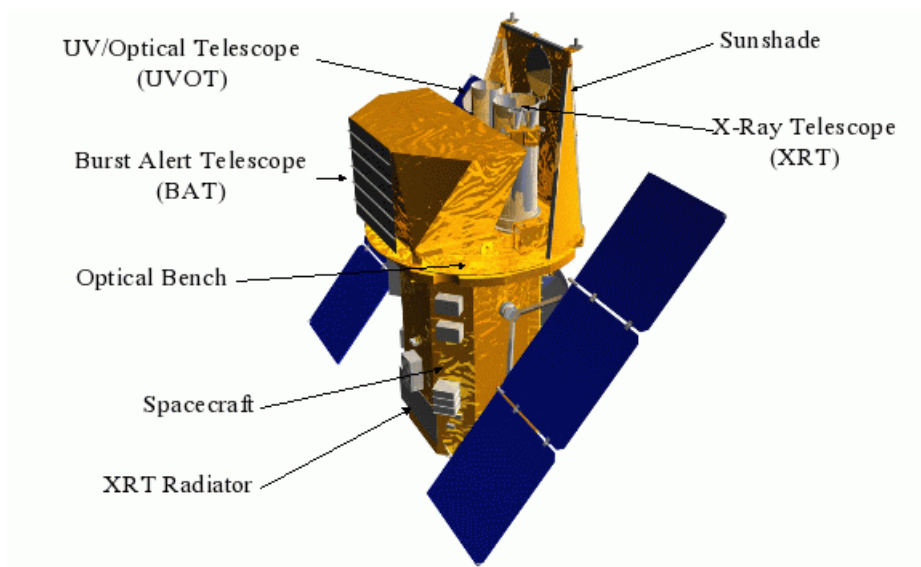
Podkapitola je spracovaná z materiálov o sonde Swift a module BAT [10, 11, 12].

Swift je vesmírna sonda vypustená na obežnú dráhu 20. novembra 2004 americkou NASA. pracujúca na viacerých vlnových dĺžkach, určená na štúdium GRB (gamma-ray burst). Pozostáva z troch prístrojov, ktoré spolu pozorujú záblesky a ich dosvitmi v gama, röntgenovej, ultrafialovej a optickej oblasti. Jeho schéma je znázornená na obrázku 1.3. Hlavnými cieľmi Swiftu sú: určenie pôvodu GRB, triedenie GRB a hľadanie nových typov, určenie vývoja GRB a interakcie s okolím a štúdium raného vesmíru pomocou GRB.

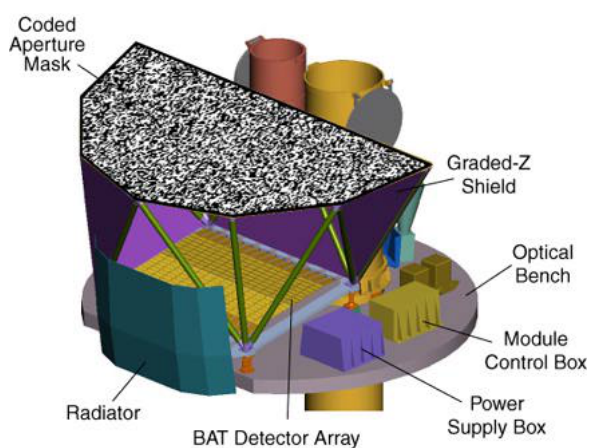
Sonda pozostáva z niekoľkých modulov. Prístroj BAT – Burst Alert Telescope (15 – 150 keV) monitoruje oblohu, detekuje záblesky a presne určí ich polohu na oblohe. Následne Swift automaticky namieri citlivé úzkospektrálne teleskopy XRT – X-ray Telescope (0.3 – 10 keV) a UVOT – Ultraviolet and Optical Telescope (170 – 600 nm) na zdroj zábleskov, aby mohli pozorovať dosvity. Swift poskytuje okrem presnej polohy zdrojov zábleskov aj svetelné krivky na viacerých vlnových dĺžkach a röntgenové spektrá.

1.4.1 BAT

BAT je veľmi citlivý nástroj so širokým zorným poľom, ktorého úlohou je zachytiť GRB a určiť ich pozíciu. Jedná sa o zobrazovací inštrument s kódovou maskou a s pomerne



Obr. 1.3: sonda Swift [13]



Obr. 1.4: prístroj BAT [13]

veľkým polokódovaným zorným poľom 1,4 steradián s rozsahom energií 15 – 150 keV. Počas niekoľkých sekúnd detekcie výbuchu BAT vypočítava počiatočnú pozíciu zdroja a stočí celý Swift ku zdroju záblesku. Schéma prístroja BAT je na obrázku 1.4. Má veľký dynamický rozsah a citlivé spúšťacie schopnosti, aby mohol študovať záblesky s rôznymi intenzitami a trvaniami.

Detektor tvorí 32768 kusov CdZnTe (CZT) buniek s rozmermi $4 \times 4 \times 2$ mm s celkovým rozmerom $1,2 \times 0,6$ m. Skupiny 128 prvkov detektora sú zostavené do 8×16 polí, z ktorých je každý pripojený na 128-kanálový výstup Application Specific Integrated Circuits (ASIC). Moduly Detektorov obsahujúce po dve také polia sú ďalej rozdelené po ôsmich do blokov. Táto hierarchická štruktúra spolu s technikou kódovanej apertúry umožňuje to, že BAT môže tolerovať stratu jednotlivých pixelov, jednotlivých modulov detektora a dokonca aj celých blokov bez toho, aby stratil schopnosť detekovať výbuchy a určiť polohu zdroja. CZT pole má nominálnu prevádzkovú teplotou 20°C a teplotné

gradienty (časový a priestorový) sú obmedzené na ± 1 °C. Časové údaje udalostí v rámci BATu majú relatívnu presnosť na 100 mikrosekúnd a absolútnu presnosť hodín kozmickej lode, ~ 200 mikrosekúnd.

Kódová apertúrna maska BATu má tvar písmena D, tvorí ju približne 54000 olovených doštičiek ($5 \times 5 \times 1$ mm) nainštalovaných na 5 cm hrubom kompozitnom paneli so štruktúrou včelieho plástu a je pripevnená jeden meter nad rovinou detektora podperami z kompozitného vlákna. Maska má plochu $2,7 \text{ m}^2$ s polokódovaným zorným poľom $100^\circ \times 60^\circ$, alebo 1,4 steradian. Stupňovitý okraj štítu do tvaru písmena Z, ktorý sa nachádza pod rovinou detektora a obklopuje masku a rovinu detektora, znižuje pozadie izotropického kozmického difúzneho toku a anizotropného toku zemského albeda o približne 95%. Štít sa skladá z vrstiev Pb, Ta, Sn a Cu, ktoré sú najhrubšie v miestach najbližšie rovine detektora a tenšie pri maske.

1.4.2 BAT operácie

BAT pracuje v dvoch režimoch: burst režim, ktorý poskytuje pozície burstov a režim prieskumu, ktorý poskytuje dáta v tvrdom röntgene. V režime prieskumu prístroj zbiera dáta s päťminútovým binom pre 80 energetických kanálov. Pri výbuchu sa prepne na režim počítania fotónov s kruhovým zásobníkom pre uloženie informácie pred burstom.

Prieskumu tvrdého röntgenu

Pri hľadaní burstu robí BAT prieskum celej oblohy v oblasti tvrdého röntgenového žiarenia a monitoruje prechodné zdroje tvrdého röntgenu. BAT hromadí mapy z detektora každých päť minút, ktoré sú následne preskúmané, či obsahujú zaujímavé zdroje žiarenia. Pre oblasť zorného poľa BATu, kde je neustále veľa silných zdrojov (napríklad galaktické jadro), je citlivosť asi o 50% väčšia.

Objavenie záblesku

Algoritmus detekcie burstov hľadá prebytok countov nad ich očakávaný počet z pozadia či stálych zdrojov. Je založený na algoritme vyvinutom pre satelit HETE-2 (tiež GRB observatórium) a vylepšený podľa na skúsenosti z HETE-2. Algoritmus stále uplatňuje veľké množstvo kritérií, ktoré určujú intervaly pozadí pred burstom, poradie extrapolácii pomeru pozadí, dobu trvania intervalu skúšky emisií burstu, oblasť osvetlenej roviny detektora a rozsah energií. BAT procesor neustále sleduje stovky týchto súborov kritérií súčasne. Prah detekcie burstu je možné nastaviť v rozmedzí 4 až 11 sigma nad šumom pozadia s typickou hodnotu 8 sigma.

Hlavným rysom BAT nástroj pre detekciu výbuchu je jeho zobrazovacie schopnosti. Keď počet countov v celej rovine detektora významne prevyšuje, rýchlym (ale s nízkym rozlíšením) algoritmom odčítania pozadia v jednotlivých detektoroch je spracovávaný a vyprodukovaný obraz celého zorného poľa. Oblasť najjasnejšieho zdroja na tomto obraze je vybraná pre detailné zobrazenie. Toto zobrazovanie s vysokým rozlíšením používa algoritmus, ktorý je pomalší, ale presnejší než algoritmus pre celé zorné pole. Výsledný obraz poskytuje presné umiestnenie GRB.

Kapitola 2

Získavanie a redukcia pozorovaní

Prvým krokom pre spracovanie meraní z vesmírnych sond je ich získanie. Pre sondu Swift, tak ako aj pre väčšinu iných sond, je možné pozorovania stiahnuť z archívov, ktoré sú verejne dostupné. Ako základný nástroj v našom prípade je možné použiť webovú aplikáciu priamo na stránkach HEASARC <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/swift.pl>, ktorá je však pre sťahovanie väčšieho počtu pozorovaní naraz ťažkopádna a pomalá. My sme v našej práci zvolili sťahovanie priamo z ftp servera, kde sú pozorovania uložené.

2.1 Katalógy pozorovaní

Na vyššie uvedenom odkaze je možné stiahnuť skript napísaný v jazyku Perl¹, ktorý dokáže komunikovať so serverom a získa katalóg pozorovaní pre zvolené objekty. Jeho použitie je rýchlejšie ako manuálne vyhľadávanie na stránkach a obsahuje veľké množstvo pridaných možností. Skript umožňuje výstup vo viacerých formátoch vrátane VTable alebo ASCII tabuľky. My sme zvolili textovú tabuľku, ktorá je po odstránení záhlavia a zápatia utilitou sed, čitateľná skriptami priamo pomocou utility awk.

Všetky tieto kroky automaticky vykoná skript `get_obs_list.pl`, ktorý zároveň vytvorí nový adresár, do ktorého sa uložia samotné pozorovania. Používa dva vstupné argumenty a to názov objektu a jeho súradnice. Tie sú zapísané ako samotné čísla bez označenia minút, stupňov, atď. Príklad spustenia pre magnetar SGR0501+4516 so súradnicami $\alpha = 05^h01^m06,76^s$, $\delta = 45^\circ16'33,92''$:

```
$ ./get_obs_list.sh 'SGR0501+4516' '05 01 06.76 +45 16 33.92'
```

Skript `get_obs_list.sh`

```
1 #!/bin/sh
2 mkdir ./obs/$1
3 perl browse_extract_wget.pl table=swifttdrss position="$2" radius=20 outfile=
  out_tmp.txt format=ascii
4 sed '1,3d' out_tmp.txt | sed '$d' | tr -d ' ' > ./obs/$1/obs.txt
5 rm out_tmp.txt
```

¹http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/heasarc/software/web_batch/browse_extract_wget.pl

Výstup zo súboru:

```
|321481|050104.88|451640.9|2008-08-23T04:48|10200|1849.0000|24.4000|Y|0.3497|
|321583|050104.60|451638.0|2008-08-23T17:35|119|1549.0000|24.5100|Y|0.3856|
...
|321574|050058.13|451430.3|2008-08-23T16:31|10209|35.0000|6.8100|Y|2.5597|
```

Z tohto výstupu sú dôležité prvý stĺpec, v ktorom sú ID (identifikačné čísla) pozorovaní, a štvrtý, v ktorom sú dátumi archivácie pozorovaní.

2.2 Sťahovanie a redukcia dát

Jednotlivé pozorovania sú uložené na ftp serveri do adresárov vo formáte: [ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/swift/data/obs/\[rok\]_\[mesiac\]/000\[ID\]00](ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/swift/data/obs/[rok]_[mesiac]/000[ID]00). O vytvorenie adresy v takomto formáte sa stará skript `get_obs.pl`. Ten zo súboru s katalógom pozorovaní pre daný magnetar vyberie potrebné údaje a usporiada ich do požadovaného formátu. Túto adresu potom predáva ako parameter skriptu `process_data.sh`, ktorý stiahne pozorovanie a spustí procedúry na jeho úpravu.

Kvôli lepšej orientácii v pozorovaniach je skriptom `process_data.sh` vytváraná adresárová štruktúra, do ktorej sú pozorovania ukladané: `./obs/[názov objektu]/[ID pozorovania]`. Adresár `obs` je vytvorený v adresári so skriptami pre sťahovanie. Po vytvorení adresára skript stiahne pozorovanie príkazom `wget`. Stiahnuté pozorovania je pred ďalším spracovávaním nutné ešte zredukovať na relevantné údaje, ktoré sú očistené o nežiaduce vplyvy a informácie, ktoré sú pre naše ďalšie spracovanie zbytočné. Zo „surových“ dát vytára tzv. produkty aplikácia `batgrbproduct`, ktorá je súčasťou balíku HEASOFT². Ten slúži na spracovávanie dát z rôznych vesmírnych sond vrátane Swiftu. Aplikácia potrebuje len dva vstupné parametre a to cestu k adresáru so stiahnutými pozorovaniami a výstupný adresár, v našom prípade sú výstupné adresáre pomenované `[ID]-products`. Ďalšia aplikácia zo sady HEASOFT, `batbinevt`, zo zredukovaných dát vyberie svetelnú krivku s binom 4 ms, v ktorej sú zahrnuté len fotóny s energiami 15 – 30 keV. Výber týchto konkrétnych hodnôt súvisel so zdrojom, z ktorého sme vychádzali pri spracovaní pozorovaní. Spustenie `process_data.sh`:

```
$ ./process_data.sh [názov objektu] [ID] [adresa pozorovania]
```

Skript `process_data.sh`

```
1 #!/bin/sh
2 cd ./obs/$1
3 wget -r -q -nH --cut-dirs=5 -P $2 $3
4 batgrbproduct indir=./$2" outdir=./$2"-products
5 batbinevt infile=./$2-products/events/sw00"$2"000b_all.evt outfile=./$2.lc"
   outtype=LC timedel=0.004 timebinalg=u energybins=15-30 detmask=./$2-products/
   auxil/sw00"$2"000b_qmap.fits ecol=ENERGY weighted=YES outunits='COUNTS'
6 cd ../../
```

²heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/

Výstupom je svetelná krivka – závislosť intenzity signálu v čase. Intenzita signálu hviezdy je udávaná v jednotkách counts, ďalej v texte county, ktorá vyjadruje počet detekcií fotónov. Číselná hodnota reálneho počtu detekcií a udávaných countov sa líši, pretože do countov je započítané aj váženie počtu detekcií podľa spoľahlivosti jednotlivých detektorov v danom čase a rôzne iné korekcie.

2.2.1 batgrbproduct

Táto súčasť balíku HEASOFT je určená na spracovanie GRB, ktoré zachytí BAT. Spustenie vyžaduje iba dva spomínané parametre a to preto, že vo svojej podstate iba volá všetky súčasti HEASOFTu, ktoré sú potrebné pre redukciu dát. Podrobný popis všetkých krokov je možné nájsť v dokumentácii k spracovaniu pozorovaní zo sondy BAT[10]. My uvádzame iba krátke zhrnutie a dôvody prečo je nutné ešte pozorovania upravovať.

V spektrálnom pásme, v ktorom pracuje BAT je pozadie oveľa silnejšie ako samotný signál z objektu. Pre porovnanie, najsilnejšie bursty s ktorými sme pracovali nemali rádovo viac ako $\approx 10^3$ countov v jednom bine po odstránení pozadia, to sa ale pohybovalo na úrovni rádovo $\approx 10^5 - 10^6$ countov v bine. Očistenie dát o pozadie je pomerne presné, o čom svedčí aj fakt, že šum je podľa príručky možné považovať za gaussovský. Aj po odstránení týchto vplyvov je nutné identifikovať pixely na detektore, ktoré zaznamenali problémy – boli nefunkčné alebo príliš zašumené. Preto batgrbproduct volá procedúry, ktoré eliminujú negatívny dopad na objektivitu meraní.

Ďalšie nežiaduce vplyvy sú spôsobené charakterom zachytenia burstu. Po jeho detekcii sa sonda natočí tak, aby ho vedela čo najlepšie pozorovať. Kým sa tak stane je pozorovanie premenlivej kvality, pretože aj napriek tomu, že BAT pozoruje veľkú časť oblohy, sú jeho detektory najcitlivejšie a najpresnejšie v strede a smerom ku krajom masky tieto kvality klesajú. Okrem toho je potrebné pozorovania očistiť o vplyvy vyplývajúce z aktuálnej polohy sondy – poloha Slnka, Zeme, atď.

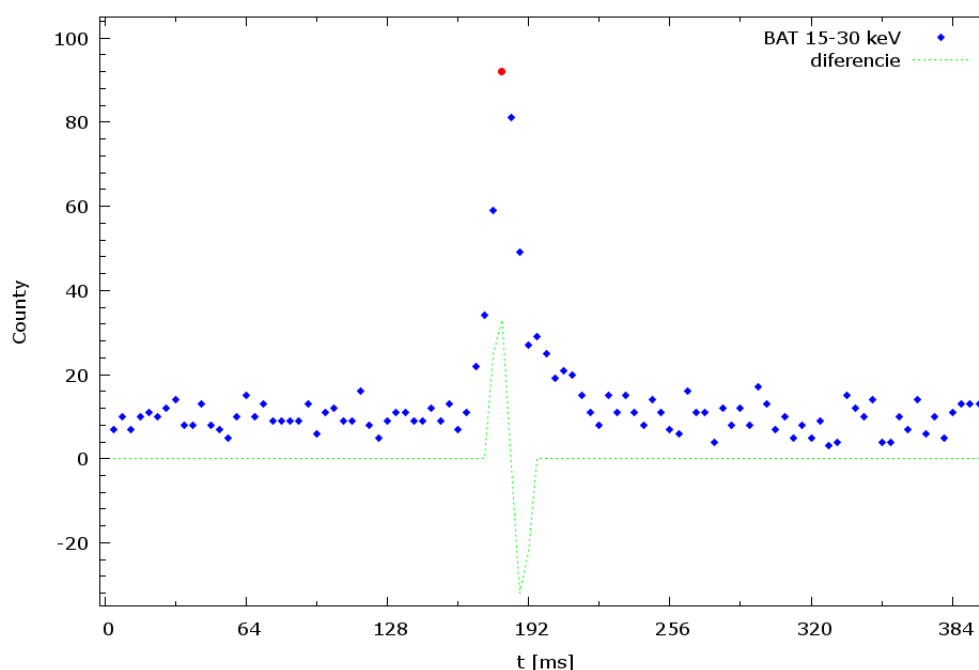
2.3 Detekcia burstov

Na detekciu burstov v svetelných krivkách existuje niekoľko algoritmov. Vzhľadom na malé množstvo fitovaných burstov sme zvolili vlastnú metódu, ktorej aplikácia nám umožňovala pomerne presnú detekciu a možnosť individuálneho výberu burstov, ktoré sme sa rozhodli použiť. Bursty sme vyberali podľa ich tvaru, aby sme na ne mohli aplikovať model popísaný v 3. kapitole. Algoritmus je aplikovaný v skripte `burst_find.m`.

Prvým krokom pri výbere burstov bolo spočítanie intenzity pozadia (vlastný signál hviezdy a šum) danej svetelnej krivky. Pri jeho výpočte sme vždy zo svetelnej krivky vybrali interval, na ktorom sa evidentne nenachádzal žiadny burst, o dĺžke $\approx 1 - 5$ s, v závislosti na charaktere a možnostiach svetelnej krivky. Z tohto intervalu sme určili strednú hodnotu ako medián, ktorý nie je natoľko citlivý na prípadné vybočujúce hodnoty ako aritmetický priemer.

Odchýlku pozadia σ_b sme určili:

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (p_i - p_b)^2}, \quad (2.1)$$



Obr. 2.1: Graf burstu z magnetaru SGR1900+14. Zelenou sú „filtrované“ diferencie countov, modrou pozorované počty countov. Červenou farbou je vyznačený vrchol burstu, ktorý algoritmus detekoval.

kde p_i je počet countov v i -tom bine, p_b je hodnota pozadia a n počet binov, z ktorých bolo pozadie spočítané.

Pri hľadaní burstu sa náš algoritmus spolieha na charakteristický tvar burstu na grafe diferencií počtu countov. Z diferencií pozadia sme určili ich odchýlku a všetkým diferenciám, ktorých absolútna hodnota bola menšia ako trojnásobok tejto hodnoty, sme priradili nulu. Takto vznikne graf, na ktorom sú jasne viditeľné iba väčšie fluktuácie v signále. Pri detekcii fluktuácie skript nájde predpokladaný vrchol burstu a pýta sa užívateľa či ide o burst, ktorý chce vybrať. Ak užívateľ rozhodne kladne, skript začne hľadať začiatok a koniec burstu. Odhad vrcholu zo svetelnej krivky je miesto, kde je diferenciacia v bine pred ním kladná a za ním záporná. Pri komplexných burstoch táto metóda zlyháva, ale pri krátkych burstoch, ktoré majú tvar *lin-exp* modelu je takto určený vrchol väčšinou jednoznačný. Ukážka detekcie je na obrázku 2.1.

Začiatok burstu sme určili ako prvý bin, v ktorom je počet countov menší ako $p_b + 8\sigma_b$. Táto hodnota súvisí so spomínanou hranicou detekcie prístroja BAT. Koniec burstu sme určili ako bin, v ktorom platí, že aritmetický priemer jeho okolia dvoch binov je menší ako σ_b . Takáto nízka hodnota zaručuje väčší počet dát pre fitovanie, ale vylučuje z hľadania prípadný ďalší burst. Chvost, pokiaľ neobsahuje žiadne iné bursty, môže byť teoreticky ľubovoľne dlhý, pretože oba modely (viď kapitola 3) predpokladajú konvergenciu funkcie k hodnote p_b . Ako sa ukázalo neskôr, niekedy je príliš dlhý chvost burstu dôvodom deformácie výsledkov fitovania.

Kapitola 3

Fitovanie burstov

3.1 Matematický model

Vzhľadom na rôzne morfológie burstov a ich problematický matematický popis, sme sa zamerali na *lin-exp* model, ktorý je ľahko aplikovateľný. Tento model vychádza z článku [5]. Oproti pôvodnému postupu sme sa odchýlili v niekoľkých krokoch. Dôvodom bolo použitie dát z inej sondy, iný dostupný energetický rozsah a aj charakter dát. V publikácií model fitovali metódou najväčšej dôveryhodnosti. Svetelné krivky, ktoré sme použili, malidost' veľký počet countov v bina na to, aby sme mohli použiť metódou najmenších štvorcov. Zároveň má BAT šum gaussovského charakteru. V článku použili svetelné krivky, ktoré nemali fixný bin. Swift takého dáta neposkytuje¹ preto sme zvolili čo najmenšiu hodnotu binu. V článku bol použitý matematický model, ktorý je popísaný rovnicou (3.1). My sme okrem toho ešte skúsili jeho modifikáciu – rovnica (3.2).

3.1.1 Model č.1 – po častiach spojitý

V tomto modeli fitujeme obe časti burstu (nábeh² a chvost³) zvlášť a nepredpokladáme, že výsledná funkcia musí byť vo vrchole spojitá. Zároveň je však podmienkou aby jednotlivé časti boli fitované spojitými funkciami.

Ak je poloha vrcholu burstu v čase t_P , platí:

$$f(t) = \begin{cases} A_1(t - t_P) + C_1 & \text{pre } t \leq t_P; \\ A_2 e^{k(t - t_P)} + C_2 & \text{pre } t > t_P. \end{cases} \quad (3.1)$$

3.1.2 Model č.2 – spojitá funkcia

Ako alternatívny postup sme navrhli fitováciu funkciu, ktorá bude celá spojitá. Rozdiel oproti modelu (3.1) je hlavne v podmienke fyzikálnej spojitosti, pretože bode $t = t_P$ sa musia funkčné hodnoty rovnať. Tým je možné nájsť vzťah medzi parametrom C_1 a

¹Výnimkou je možnosť veľkosti binu, kde má každý bin takú dĺžku, aby v ňom bol konštantný pomer signál/šum. Takéto krivky však nezachovávajú charakteristický tvar burstu.

²z ang. rise

³z ang. tail

ostatnými parametrami:

$$C_1 = A_2 + C_2$$

Po následnej úprave:

$$f(t) = \begin{cases} A_1(t - t_P) + A_2 + C_2 & \text{pre } t \leq t_P; \\ A_2 e^{k(t - t_P)} + C_2 & \text{pre } t > t_P. \end{cases} \quad (3.2)$$

Takáto úprava zníži počet voľných parametrov na štyri.

3.2 Počiatočný odhad parametrov

Pri fitovaní metódou najmenších štvorcov sme použili Levenberg — Marquardtov algoritmus, ktorý je v Octave⁴. Implementovaný funkciou `leasqr`⁵. Keďže hľadanie minima v prípade zložitých funkcií môže konvergovať k lokálnemu minimu je potrebné fitovacej procedúre zadať približné odhady výsledných hodnôt parametrov. Tieto odhady sú pre oba modely zhodné, pri ich výpočte nepredpokladáme spojitosť funkcie.

Vrchol burstu

Ako prvú odhadujeme polohu vrcholu burstu. Aby sme odstránili prípadné štatistické nepresnosti, ktoré vznikajú veľkosťou binu, tak sme túto hodnotu spočítali ako ťažisko niekoľkých po sebe nasledujúcich binov, kde ako váhy slúžili county, očistené o hodnotu pozadia. Veľkosť intervalu sme volili manuálne pre každý fitovaný burst zvlášť, na jeho určenie postačil hrubý odhad.

Ak bude maximum signálu v čase t_k a počet binov, z ktorých počítame odhad polohy vrcholu $2n$:

$$t_P^{(0)} = \frac{\sum_{i=k-n}^{k+n} x_i y_i}{\sum_{i=k-n}^{k+n} y_i}, \quad (3.3)$$

kde $y_i = p_i - p_b$, počet countov v čase t_i po odčítaní pozadia p_b .

Ostatné parametre

Pri lineárnej časti (A_1 a C_1) sme využili funkciu Octavu `polyfit`⁶. Po odčítaní vlastného signálu magnetaru môžeme predpokladať $C_2 \approx 0$. Preto A_2 a k odhadujeme z funkcie:

$$g(t) = A_2^{(0)} e^{k^{(0)}(t - t_k)}.$$

Takéto jednoduché rovnice je možné fitovať v Octave funkciou `expfit`⁷. To, že ide len o odhady je vidieť na ich výsledkoch, kedy napriek hore uvedeným predpokladom neplatí rovnosť $A_2 = C_1$.

⁴<http://octave.sourceforge.net/optim/function/leasqr.html>

⁵<http://www.gnu.org/software/octave/>

⁶<http://octave.sourceforge.net/octave/function/polyfit.html>

⁷<http://octave.sourceforge.net/optim/function/expfit.html>

3.3 Implementácia modelov

Pri fitovaní je dôležité, aby bol model navrhnutý tak, že jednotlivé parametre na sebe nie sú závislé. Túto podmienku sa nám nepodarilo dokonale splniť ani pri jednom z modelov a ďalšia redukcia voľných parametrov už nebola možná. V prípade prvého modelu nie je možné fitovať hodnotu t_P a tá preto ostáva konštantná od jej odhadu. Fitovanie sme realizovali už spomínanou funkciou `leasqr`. Svetelné krivky obsahujú aj chyby jednotlivých binov a tie sme použili ako váhy $w_i = 1/\sigma_i$. Fitovali sme dáta očistené o pozadie a preto sa mohli v niektorých binoch vyskytnúť záporné počty countov. Týmto binom sme automaticky priradili nulovú váhu. Derivácie fitovacích funkcií sme ponechali na predvolené nastavenie – numerické, ktoré si počíta `leasqr` samo. Fitovanie je implementované v skripte `burst_fit_pw.m`.

Fitovanie v skripte `burst_fit_pw.m`

```

1 w = 1./(err.^2) #vahy
2 w(find(y<=0)) = 0 #zporne county -> w=0
3
4 pin1 = [A1,C1] #odhad parametrov - lin. cast
5 pin2 = [A2,k,0] #odhad parametrov - exp. cast
6
7 N = length(x)
8 i = find(round(x*1e3)/1e3<=ceil(xP*1e3)/1e3) #bin, ktory je najblizsie k vrcholu
9 i = max(i)
10
11 [f1,p1,cvg,iter,corp1,covp1] = leasqr(x(1:i),y(1:i),pin1,'model_pwlin
    ',0.001,5000,w(1:i)) #fit lin. casti
12 [f2,p2,cvg,iter,corp2,covp2] = leasqr(x(i+1:N),y(i+1:N),pin2,'model_pwexp
    ',0.001,5000,w(i+1:N)) #fit exp. casti

```

Funkcie `model*.m` obsahujú vyjadrenie matematického popisu modelu.

Pri druhom modeli je možné parameter t_P nechať voľný a tým výpočet spresniť. Ponechanie tohto parametru fitovacej funkcií v niektorých prípadoch viedlo ku konvergencii k zjavne nezmyselným hodnotám, preto sme jeho výpočet robili Newtonovou metódou. V prvej časti rovnice 3.2 zavedieme substitúciu:

$$h(t_P) = -A_1 t_P + A_2 + C_2$$

Pri daných odhadoch parametrov je možné spresniť i -ty odhad t_P spočítaním:

$$t_P^{(i)} = t_P^{(i-1)} - \frac{h(t_P^{(i-1)})}{h'(t_P^{(i-1)})} \quad (3.4)$$

Po niekoľkých prepočtoch by mala ostať hodnota nového odhadu rovnaká, prípadne sa bude meniť iba o veľmi malú hodnotu. Tento postup sme aplikovali pri každom odhade parametrov. Funkcia `leasqr` dosadzuje do fitovacej funkcie rôzne hodnoty a hľadá tú najlepšiu kombináciu parametrov. Do súboru s touto fitovacou funkciou (`model_cont.m`) sme pridali výpočet t_P s danými testovanými parametrami. Poloha vrcholu sa tak prepočíta pri každom pokuse a až takto prepočítaná vstupuje do fitovacej funkcie. Postup funguje veľmi spoľahlivo, aj pri výraznom vychýlení počiatočného odhadu t_P sme vždy dospeli k rovnakým výsledkom.

Kapitola 4

Výsledky

V tejto kapitole postupne uvedieme všetky bursty, ktorými sme sa hlbšie zaoberali aj s informáciami, k svetelným krivkám, z ktorých boli vybrané a magnetarom, z ktorých svetelné krivky pochádzajú. Kvalita fitovania sa líšila a preto sme sa snažili vybrať fity rôznej kvality, aby sme poukázali na výhody aj nevýhody matematických modelov. Súradnice pozorovaných objektov su prebraté z databázy Simbad¹.

Podnadvisy vždy obsahujú ID pozorovania v databáze Swiftu, z ktorého pochádza svetelná krivka. Referenčný čas t_0 udáva kedy nastal burst v modifikovanom juliánskom dátume (MJD). Na zvislej ose grafu sú uvedené county, ktoré majú hodnoty už očistené o pozadie p_b , pretože aj pri fitovaní sme najskôr od nameraných countov túto hodnotu odčítali. Ku každému fitovanému burstu je uvedená tabuľka s výsledkami a graf. V tabuľkách sú uvedené výsledné hodnoty fitovacích parametrov aj s ich smerodatnými odchýlkami.

4.1 SGR1900+14

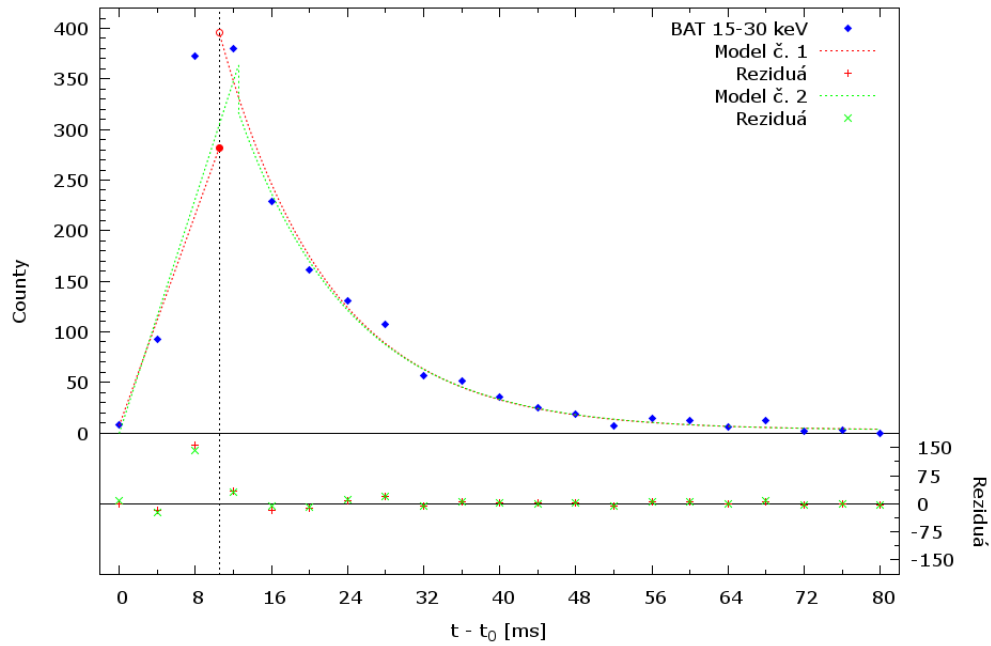
Tento magnetar, ktorý bol prvý krát pozorovaný v roku 1979 ako jeden z prvých. Vtedy boli detekované tri bursty, v tej dobre považované za GRB, a magnetar ostal neaktívny až do 90. rokov. Silná aktivita bola pozorovaná v roku 1998 a pokračovala s prestávkami najbližšie roky. Nachádza sa v súhvezdí Orla a je od nás vzdialený približne 6,1 kpc.[9] Magnetar rotuje s periódou $\approx 5,2$ s, so spomalením $9,2 \times 10^{-11}$ s/s. Indukcia jeho magnetického poľa je 7×10^{14} G.[15]

Súradnice (ICRS): $\alpha = 19^{\text{h}}03^{\text{m}}32,80^{\text{s}}$, $\delta = -13^{\circ}57'56,30''$

4.1.1 ID 203127

Toto pozorovanie bolo realizované v marci 2006. Doba expozície bola približne 50 s a počas nej nastalo niekoľko burstov. Väčšina z nich na seba naväzovala a nasledovali krátko po sebe. Burst mal v pomere k ostatným zo svetelnej krivky pomerne rýchly priebeh. Jeho maximum v použitom spektrálnom obore dosahovalo takmer 400 countov, čo je dosť vysoká hodnota pri burtoch typu, ktorý sme fitovali.

¹<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>



Obr. 4.1: Burst zo svetelnej krivky 203127

Začiatok pozorovania: 53823,1200231481 (MJD,UT)

$t_0 = 53823,1206192592$ (MJD,UT)

Pozadie svetelnej krivky: $p_b = (11,0 \pm 3,5)$ countov

Model		Parametre				
		A_1 (s^{-1})	C_1	A_2	k (s^{-1})	C_2
č.1	σ	$2,61 \times 10^4$	$2,69 \times 10^2$	$4,10 \times 10^2$	$-8,72 \times 10^1$	2,78
		$\pm 0,99 \times 10^4$	$\pm 0,97 \times 10^2$	$\pm 0,48 \times 10^2$	$\pm 0,69 \times 10^1$	$\pm 1,61$
č.2	σ	$2,90 \times 10^4$		$3,37 \times 10^2$	$-8,48 \times 10^1$	2,48
		$\pm 0,38 \times 10^4$		$\pm 0,36 \times 10^2$	$\pm 1,02 \times 10^1$	$\pm 2,23$

$$t_P^{(0)} = 10,02 \text{ ms}$$

$$t_P = 11,71 \text{ ms}$$

Tabuľka 4.1: Výsledné hodnoty parametrov burstu zo svetelnej krivky 203127

Diskusia

Model č. 1 vytvára výrazný rozdiel vo vrchole burstu. Model č. 2 nefituje úplne podľa pôvodných predpokladov spojitkej funkcie a vo vrchole vzniká pomerne výrazná nespojitosť. Oba fity dávajú veľmi dobré výsledky v exponenciálnej časti. Lineárna časť vychádza

horšie, čo je dôsledkom malého počtu bodov v nej a zjavnej zmeny trendu v druhom bine. Vypustením prvého binu by ale nebolo možné fitovať lineárnu časť. Tento problém sa vyskytuje pri väčšine burstov. Napriek tomu celkový fit dáva uspokojivé výsledky. Chyby parametrov sa pohybujú v rozpätí jedného rádu, problémový je však parameter C_2 . Ten má mierne menšiu odchýlku v prvom modeli, čo sa prejavuje na väčších odchýlkach ostatných parametrov.

4.1.2 ID 240801

Pozorovanie pochádza z konca novembra 2006. Na rozdiel od predošlého, bol zaznamenaný iba jeden výrazný burst. Ak sa vo svetelnej krivke nachádzali aj iné, neboli sme ich schopný našou metódou detekovať. Tesne po ňom nasleduje zvýšenie hodnoty vlastného pozadia magnetaru. Pred burtsom je hodnota pozadia veľmi podobná tej z predchádzajúceho burstu. Burst nebol až taký výrazný, vo svojom maxime dosahoval takmer 150 countov v bine.

Začiatok pozorovania: 54065,5501041667 (MJD,UT))

$t_0 = 54065,5528730324$ (MJD,UT)

Pozadie svetelnej krivky: $p_b = (10, 0 \pm 3, 1)$ countov

Model		Parametre				
		A_1 (s^{-1})	C_1	A_2	k (s^{-1})	C_2
č.1	σ	$7,99 \times 10^3$	$1,20 \times 10^2$	$2,91 \times 10^2$	$-3,95 \times 10^2$	5,74
		$\pm 0,92 \times 10^2$	$\pm 0,12 \times 10^2$	$\pm 0,88 \times 10^2$	$\pm 0,88 \times 10^2$	$\pm 2,04$
č.2	σ	$8,94 \times 10^3$		$1,55 \times 10^2$	$-7,00 \times 10^2$	6.63
		$\pm 1,02 \times 10^3$		$\pm 0,22 \times 10^2$	$\pm 6,06 \times 10^2$	± 1.93

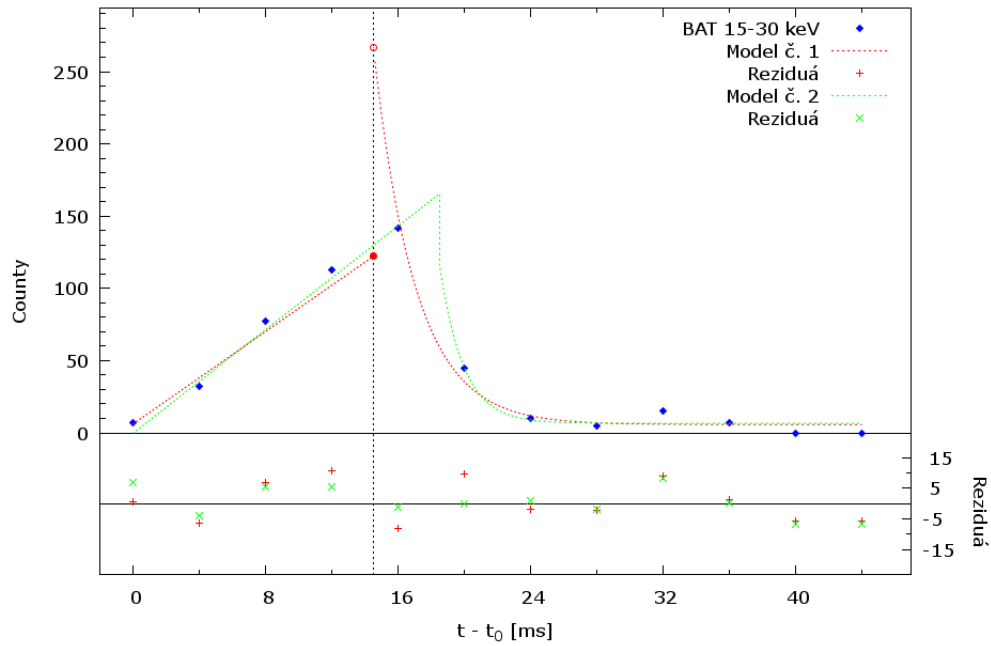
$$t_p^{(0)} = 14,23 \text{ ms}$$

$$t_p = 18,02 \text{ ms}$$

Tabuľka 4.2: Výsledné hodnoty parametrov burstu zo svetelnej krivky 240801

Diskusia

Model č. 1 vykazuje v tomto prípade ešte markantnejší rozdiel medzi lineárnou a exponenciálnou časťou vo vrchole. Teno efekt je spôsobený nadhodnotením parametru A_2 , ktorý má aj vysokú odchýlku v porovnaní s jeho zmeranou hodnotou. Z ostatných odchýlok parametrov je vidieť, že model lepšie popisuje lineárnu časť ako exponenciálnu a to pomerne výrazne. Napriek tomu sú reziduá malé v porovnaní s funkčnými hodnotami. V modeli č. 2 znovu vzniká diskontinuita v bode vrcholu. Navyše má vysokú odchýlku parametru k . Oba modely majú výrazne odlišný odhad polohy vrcholu, čo sa prejavilo v ich rozdielnych tvaroch v exponenciálnej časti. Naopak lineárne časti sú takmer identické. Celkovo tento fit považujeme ako menej uspokojivý oproti predošlému.



Obr. 4.2: Burst zo svetelnej krivky 240801

4.2 SGR1806+20

Vôbec prvý človekom pozorovaný SGR burst pochádza z tohto magnetaru z roku 1979. Magnetar bol aktívny v 80. rokoch a neskôr táto aktivita oslabla. Posledné roky znovu pozorujeme bursty, ktoré pochádzajú z tohto objektu. Jeho poloha na oblohe je v súhvezdí Strelca, blízko polohy galaktického centra. Jeho presná vzdialenosť nie je presne známa, vedci sa na nej nedokázali zhodnúť. [9] Magnetar rotuje s periódou $\approx 7,6$ s, so spomalením 75×10^{-11} s/s. Indukcia jeho magnetického poľa je 24×10^{14} G. [15]

Súradnice (ICRS): $\alpha = 18^{\text{h}}08^{\text{m}}39,32^{\text{s}}$, $\delta = -20^{\circ}24'39,50''$

4.2.1 ID 291587

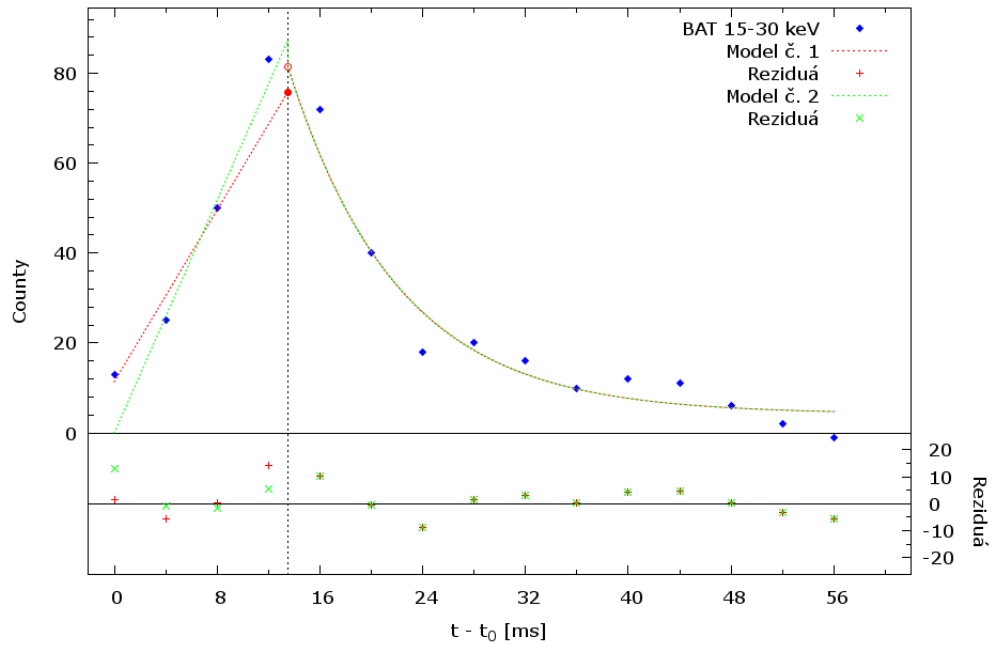
Táto svetelná krivka, ktorá bola pozorovaná v septembri 2007, obsahovala niekoľko burstov. Celkovo má magnetar SGR1806+20 silné a výrazné bursty komplexných tvarov. Na niekoľkých svetelných krivkách sme pozorovali aj bursty, ktoré zodpovedajú *lin-exp* modelu, ale boli natolko silné a dlhé, že exponenciálna časť menila svoj tvar. Z tohto pozorovania sme vybrali dva bursty, ktoré sú v maxime menšie ako predchádzajúce dva, ale tvarom zodpovedajú *lin-exp* modelu.

Začiatok pozorovania: 54382,7502777778 (MJD,UT)

Burst č. 1: $t_0 = 54382,7504324537$ (MJD,UT)

Burst č. 2: $t_0 = 54382,7504559722$ (MJD,UT)

Pozadie svetelnej krivky: $p_b = 9,0 \pm 3,0$ (countov)



Obr. 4.3: Burst č. 1 zo svetelnej krivky 291587

		Parameter				
Model		A_1 (s^{-1})	C_1	A_2	k (s^{-1})	C_2
č.1		$4,77 \times 10^3$	$7,39 \times 10^1$	$8,11 \times 10^1$	$-1,17 \times 10^2$	4,22
	σ	$\pm 0,92 \times 10^3$	$\pm 1,04 \times 10^1$	$\pm 1,95 \times 10^1$	$\pm 0,30 \times 10^2$	$\pm 2,11$
č.2		$6,47 \times 10^3$		$8,07 \times 10^1$	$-1,17 \times 10^2$	4,21
	σ	$\pm 1,09 \times 10^3$		$\pm 1,27 \times 10^1$	$\pm 0,39 \times 10^2$	$\pm 2,70$

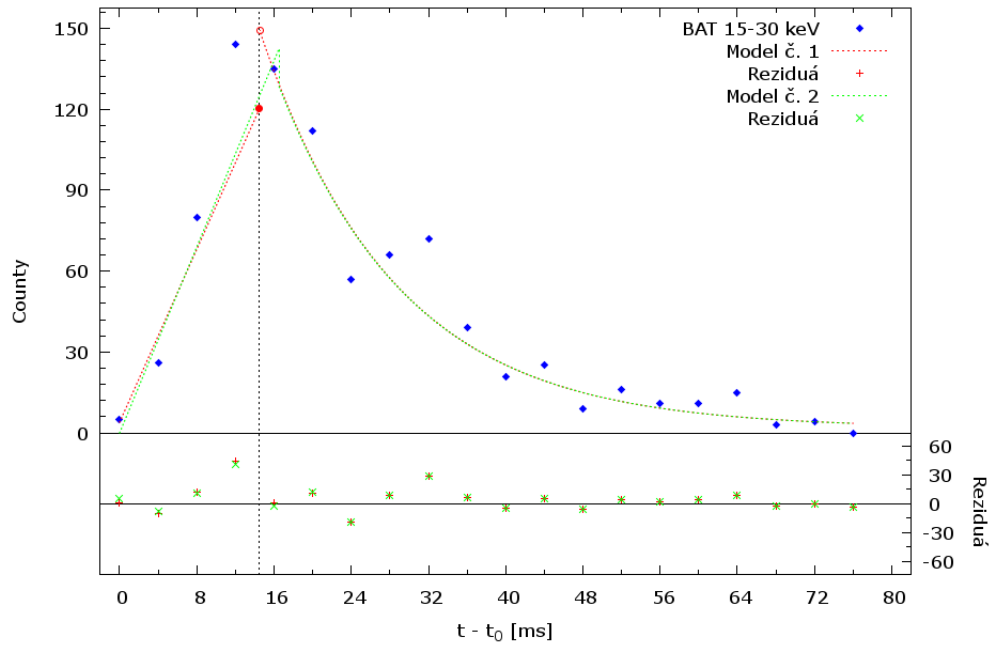
$$t_p^{(0)} = 13,10 \text{ ms}$$

$$t_p = 13,13 \text{ ms}$$

Tabuľka 4.3: Výsledné hodnoty parametrov burstu č. 1 zo svetelnej krivky 291587

Diskusia (burst č. 1)

Oba modely fitovali s takmer rovnakými výsledkami. Rozdiely možno pozorovať v lineárnej časti, exponenciálne časti sú takmer totožné – reziduá na grafe splývajú. Takisto polohy vrcholu sú takmer identické. Prvý model vykazuje nezanedbateľne vyššiu odchýlku pri parametri A_2 , druhý zase pri parametri C_2 . Domnievame sa, že tieto odchýlky sú spôsobené zvýšenou aktivitou v chvoste burstu, kde sú pozorovateľné dva nízke píky.



Obr. 4.4: Burst č. 2 zo svetelnej krivky 291587

Model		Parameter				
		A_1 (s^{-1})	C_1	A_2	k (s^{-1})	C_2
č.1		$8,02 \times 10^3$	$1,20 \times 10^2$	$1,48 \times 10^2$	$-7,23 \times 10^1$	1,83
	σ	$\pm 2,02 \times 10^3$	$\pm 0,28 \times 10^1$	$\pm 0,25 \times 10^2$	$\pm 1,26 \times 10^1$	$\pm 2,93$
č.2		$8,62 \times 10^3$		$1,34 \times 10^2$	$-7,19 \times 10^1$	1,78
	σ	$\pm 1,21 \times 10^3$		$\pm 0,17 \times 10^2$	$\pm 1,66 \times 10^1$	$\pm 3,38$

$$t_p^{(0)} = 14,43 \text{ ms}$$

$$t_p = 15,74 \text{ ms}$$

Tabuľka 4.4: Výsledné hodnoty parametrov burstu č. 2 zo svetelnej krivky 291587

Diskusia (burst č. 2)

Napriek tomu, že fit vyzerá vizuálne v poriadku, odchýlky niektorých parametrov vychádzali príliš vysoké. Pri fitovaní sme museli zmeniť aj kritérium detekcie burstu. Burst vykazoval dlhý chvost, ktorý deformoval výsledky. Preto sme pre koniec burstu zvolili kritérium $1,5\sigma_b$, ktoré ho výrazne skrátilo, čím sme získali hodnovernejšie hodnoty parametrov.

Parameter C_2 vykazuje odchýlky približne dvojnásobku jeho hodnoty. Takýto výsledok nie je možné považovať za hodnoverný. Fitovacia funkcia napriek tomu v oboch prípadoch dobre popisuje tvar pozorovaných hodnôt. Usudzujeme, že odchýlky (parametrov aj tvaru lineárnej časti) vznikli prvým binom v lineárnej časti, ktorý zjavne vybočuje z lineárneho

trendu. Tento bod sme však nemohli svojvoľne odstrániť, keďže vyhovoval kritériu, ktoré berie do úvahy iba výrazné nárasty v signále. Jednoznačne patrí do burstu.

V oboch burstoch boli pozorované narušenia spojitosti druhého modelu vo vrchole. Boli však výrazne menšie ako v prípade burstov z SGR1900+14, v poslednom burste je nespojitosť takmer zanedbateľná.

Záver

Pri explózii supernovy za vysokej teploty a tlaku môže vzniknúť malý a extrémne hustý objekt — neutrónová hviezda. Je tvorená zmesou voľných neutrónov a elektrónov. Hmotnosti týchto objektov sa pohybujú medzi 1,5 až 3,2 $M_{\odot}$ a ich rozmery sú rádovo v km. Napriek tomu je ich žiarenie dostatočne silné na to, aby sme ich mohli detekovať. Zvonku sú pokryté kôrou, ktorá na povrchu obsahuje hlavne železo a postupne prechádza do materiálu, ktorý je podobný vnútru hviezdy. Napriek tomu je ich žiarenie dostatočne silné na to, aby sme ich mohli detekovať.

Ak je pri vniku tohto objektu dostatočne vysoká rýchlosť jej rotácie okolo vlastnej osi, vo hviezde a jej okolí vznikne extrémne silné magnetické pole, ktoré dosahuje indukciu rádovo až 10^{14} G. Kôra je horizontálne takmer nedeformovateľná vďaka vlastnostiam materiálu vo vnútri, pôsobia tu hlavne sily kvantovo-mechanického charakteru. Elastické vlastnosti kôry sú dané slabšou, Coulombovskou, silou. Preto je vo vertikálnom smere kôra ľahšie deformovateľná. Magnetické pole s indukciou, akú majú práve magnetary, začne kôru postupne deformovať, v zjednodušenom modeli stáčať. Pretože kôra a pole sú na seba naviazané, začne sa stáčať aj samotné pole. Ampérov zákon hovorí, že pri zmene magnetického poľa sa indukuje elektrický prúd. Z miesta indukcie sú emitované nabitý častice, protóny a ióny dopadajú na povrch hviezdy, čím sa emituje mäkké röntgenové žiarenie. Elektróny sa pohybujú smerom od hviezdy s vysokou rýchlosťou, kde sa zrážajú röntgenovým žiarením a to prechádza do vyšších energií. Emitované žiarenie niekoľkonásobne prevyšuje intenzitou bežné vyžarovanie objektu. Tento jav sa na grafe intenzity žiarenia z hviezdy v čase javí ako silný záblesk – burst.

Predmetom našej práce bola analýza spomínaných burstov a ich matematický popis. Pozorovania sme získavali z archívu vesmírnej sondy Swift, konkrétne z jej modulu BAT. Tento modul sleduje veľkú časť oblohy a slúži na detekciu gamma zábleskov. Stiahnuté pozorovania sme zredukovali pomocou softvéru HEASOFT. Bolo ich potrebné očistiť o kozmické pozadie v danom spektre, chyby detektorov a iné vplyvy, ktoré negatívne vplyvajú na objektivitu dát. Zo svetelných kriviek sme vyberali energetické pásmo 15-30 keV, v ktorom je možné bursty dobre pozorovať.

Výber burstov zo svetelných kriviek sme robili vlastným algoritmom, ktorý detekuje výrazné fluktuácie vo vlastnom signále hviezdy. Pri spracovaní sme sa sústredili na bursty, ktoré majú charakteristický tvar – lineárny nárast a exponenciálny pokles. Fitovali sme ich metódou najmenších štvorcov s dvoma modifikáciami modelu. Prvou bola po častiach spojitá funkcia, ktorá sa skladala z priamky po vrchol burstu a z exponenciály od vrcholu po koniec. Druhou bola naša vlastná modifikácia tohto modelu. Funkcia bola zložená z rovnakých častí, ale pridali sme k nej fyzikálnu podmienku spojitosti vo vrchole burstu.

Diskusia výsledkov

V práci sme uviedli štyri nafitované bursty z dvoch objektov, SGR1900+14 a SGR1806+20. Pochádzali z troch rôznych pozorovaní. Kvalitu modelov sme posudzovali podľa smerodatných odchýlok fitovacích parametrov a podľa vizuálnej stránky fitu.

Medzi fitovacími parametrami sa ako najproblematickejší ukázal konštantný člen v exponenciálnej časti krivky. Odchýlky boli výnimočne vyššie aj ako dvojnásobok samotnej hodnoty parametru. Napriek tomu krivky prechádzali nameranými hodnotami. Ostatné parametre mali odchýlky vo väčšine prípadov do 30 % nameranej hodnoty.

Druhý model nezachovával predpokladanú spojitosť vo vrchole a to aj napriek tomu, že bol navrhnutý tak aj jeho matematický zápis. Rozdiel medzi lineárnou a exponenciálnou funkčnou hodnotou vo vrchole však nedosahoval také rozdiely ako pri modele s po častiach spojitými funkciami.

Fitovacie funkcie sa najviac vymykajú pozorovaným hodnotám v okolí vrcholu. Domnievame sa, že je to spôsobené malým počtom pozorovaní v lineárnej časti, ktorá má pri tomto type burstov veľmi rýchly priebeh. Tiež treba brať v úvahu, že ide len o aproximatívny model. Bursty majú v skutočnosti oveľa zložitejšiu morfológiu, ale ak je priebeh dostatočne rýchly a intenzívny, tak tvar konverguje k lineárne – exponenciálnemu modelu. Z meraní tiež usudzujeme, že podmienka spojitosti je porušená v menšej miere pri burstoch, ktoré majú svoje maximum v nižších hodnotách.

Uvedomujeme si, že použité modely sú len aproximatívnym riešením oveľa komplexnejších tvarov svetelných kriviek. Napriek tomu je matematický popis tvaru burstov jednou z ciest k lepšiemu pochopeniu ich vzniku a mechanizmu ich správania a tým celkovo k presnejším popisom mechanizmu správania týchto exotických objektov, ktoré aj roky po svojom objavení ostávajú pomerne málo poznané.

Zoznam použitej literatúry

- [1] B. Kiziltan, A. Kottas, S. E. Thorsett, *The Neutron Star Mass Distribution*, arXiv:1011.4291 [astro-ph.GA].
<http://arxiv.org/pdf/1011.4291v1.pdf>
- [2] S. L. Shapiro, S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars. The Physics of Compact Objects*, John Wiley & Sons, 2008. ISBN 9783527617678.
- [3] Nobili L., Turolla R., Zane S., *X-ray spectra from magnetar candidates. I. Monte Carlo simulations in the non-relativistic regime*, Mon. Not. R. Astron. Soc. **386** (2008). 1527-1542.
- [4] Duncan, R. C., Thompson, C., *Formation of very strongly magnetized neutron stars - Implications for gamma-ray bursts*, Astrophys. J. vol. **392** (1992). L9–L13.
- [5] Gavriil F. P., Kaspi V. M., Woods P. M., *Magnetar-like X-ray bursts from an anomalous X-ray pulsar*, Nature **419** (2002). 142.
- [6] F. P. Gavriil, V. M. Kaspi and P. M. Woods, *A comprehensive study of the x-ray bursts from the magnetar candidate 1e 2259+586*, Astrophys. J. vol. **607** (2004). 959.
- [7] P. M. Woods, C. Kouveliotou, F. P. Gavriil, V. M. Kaspi, M. S. E. Roberts, A. Ibrahim, C. B. Markwardt, J. H. Swank *et al.*, *X-ray bursts from the transient magnetar candidate XTE J1810-197*, Astrophys. J. vol. **629** (2005). 985-997.
- [8] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/%E2%80%8Chbase/magnetic/magearth.html>
- [9] <http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html>
- [10] http://heasarc.nasa.gov/docs/swift/analysis/bat_swguide_v6_3.pdf
- [11] <http://www.swift.ac.uk/index.php>
- [12] http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/about_swift/bat_desc.html
- [13] <http://www.swift.ac.uk/about/instruments.php>
- [14] <http://astronomyonline.org/Stars/Pulsars.asp?Cate=Stars&SubCate=OG04&SubCate2=Pulsars>
- [15] <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>

