

MASARYKOVA UNIVERZITA

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



**ŠTÚDIUM KOMPAKTNÝCH OBJEKTŮ
VO VYSOKOENERGETICKEJ ČASTI SPEKTRA**

Bakalárska práca

KATARÍNA SKOČOVSKÁ

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

Brno 2013

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁZNAM

Autorka: Katarína Skočovská
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Název práce: Studium kompaktních objektů
ve vysoko-energetické části spektra

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astrofyzika

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

Akademický rok: 2012/2013

Počet stran: 37

Klíčová slova: Neutronová hvězda; Magnetar; SGR; AXP

BIBLIOGRAPHIC ENTRY

Author: Katarína Skočovská
Faculty of Science, Masaryk University
Department of Theoretical Physics and Astrophysics

Title of Thesis: High-energy study of compact objects

Degree Programme: Physics

Field of Study: Astrophysics

Supervisor: Mgr. Filip Hroch, Ph.D.

Academic Year: 2012/2013

Number of Pages: 37

Keywords: Neutron star; Magnetar; SGR; AXP

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce zkoumá kompaktní objekty, mezi kterými je zahrnuta široká skupina 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. Tato bakalářská práce se zabývá jedním konkrétním druhem neutronových hvězd, magnetary. Jedna z klíčových vlastností kompaktních objektů a zejména magnetarů je jejich magnetické pole, jehož vliv může být sledován během jejich náhlých zjasnění. Cílem této práce je studium observačních projevů vhodně zvolených kandidátů s pomocí dostupných dat z kosmických sond a následné zjištění zajímavých vlastností daných magnetarů, jako rychlost rotace, perioda rotace a v neposlední řadě velikost magnetického pole.

ABSTRACT

This paper studies compact objects, which involves a broad group of systems, such as black holes, white dwarfs or neutron stars. All these objects show several interesting evidences of their activity, which are due to their sizes often shown in the high-energy part of the spectrum. This thesis deals with a particular type of neutron star, the magnetars. One of the key properties of compact objects as well as magnetars is the magnetic field, which impact can be watched during their sudden outburst. The aim of this work is to study observational tokens of appropriately selected candidates using available data from the spacecraft and the subsequent discovery of interesting properties of the magnetars, such as rotational speed, rotational period, and last but not least the size of the magnetic field.



Masarykova univerzita
Přírodovědecká fakulta



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student : Katarína Skočovská
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:

Studium kompaktních objektů ve vysoko-energetické části spektra

High-energy study 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. Jedna z klíčových vlastností kompaktních objektů je jejich magnetické pole, jehož vliv můžeme sledovat během jejich náhlých zjasnění. Cílem této práce je studium observačních projevů vhodně vybraných kandidátů za pomoci dostupných dat z kosmických sond. Pro úspěšné vypracování se předpokládá znalost základů astronomické fotometrie a spektroskopie a příslušných fyzikálních partií. Práce bude vypracována ve slovenštině.

Doporučená literatura

Shapiro, Stuart L. - Teukolsky, Saul A. Black holes, white dwarfs and neutron stars :the physics of compact objects. Weinheim : Wiley-Vch, 2004. 645 s. ISBN 0-471-87316-0.

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

Skočovská

PODĚKOVÁNÍ

Ďakujem svojmu vedúcemu, vždy pripravenému reagovať na moje otázky. Ďalej ďakujem ochotnému spolužiakovi a kamarátovi Žonymu za neoceniteľnú pomoc pri kódení.

PROHLÁŠENÍ

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

Brno, 14. března 2013

Katarína Skočovská

Obsah

1	Úvod	8
2	Kompaktné objekty	9
2.1	Čo sú kompaktné objekty?	9
2.2	Neutrónové hviezdy	10
2.3	Štruktúra neutrónových hviezd	11
2.4	Pulzary	12
2.5	Magnetary: AXP a SGR	12
2.6	Magnetické pole magnetarov	14
3	Získavanie a spracovanie dát	17
3.1	Swift: XRT	17
3.2	Získavanie dát	18
4	Svetelné krivky magnetarov	21
4.1	Spracovanie svetelných kriviek	21
4.2	Výsledky spracovania dát	26
5	Záver	34
	Literatúra	36

Kapitola 1

Úvod

Bude to práve 40 rokov, kedy astronómovia odhalili existenciu exotického druhu hviezd, takzvaných magnetarov. Sú to síce rozmermi nepatrné kompaktné objekty, no svojimi prejavmi, prudkými zjasneniami vo vysokoenergetickej časti spektra, prekonávajú aj tie najväčšie hviezdy. Magnetary sú istým druhom neutrónových hviezd na sklonku svojho života. Ich výnimočnosť spočíva v tom, že veľkosť ich magnetického poľa presahuje akékoľvek dovtedy pozorované magnetické pole v celom vesmíre.

Cieľom tejto práce je práve štúdium magnetarov. Objektmi skúmania sú hviezdy pozorované kozmickým observatóriom Swift. Výsledkom bude stanovenie vlastností magnetarov, ako je perióda rotácie, rýchlosť rotácie a nakoniec magnetické pole.

Prehľad použitých skratiek a pojmov

- SGR** – objekt s opakovanými vzplanutiami v mäkkom röntgenovom žiarení
Soft Gamma Repeaters
- AXP** – anomálne pulzary nepravidelne emitujúce röntgenové žiarenie
Anomalous X-ray Pulsars
- SNR** – pozostatok po výbuchu supernovy
supernova remnant

Kapitola 2

Kompaktné objekty

Druhá kapitola charakterizuje kompaktné objekty, konkrétne bielych trpaslíkov, neutrónové hviezdy a čierne diery. Druhá podkapitola bližšie určuje vlastnosti neutrónových hviezd a ich štruktúru popisuje tretia podkapitola. Ďalšie dve časti sa venujú pulzarom a konečne samotným magnetarom, ktoré sú podrobnejšie popísané v poslednej podkapitole.

2.1 Čo sú kompaktné objekty?

Kompaktné objekty je súhrnný názov pre biele trpaslíky, neutrónové hviezdy a čierne diery, či iné exotické, veľmi husté, tzv. degenerované hviezdy. Tieto objekty sa zrodia z umierajúcich normálnych hviezd, keď sa spotrebuje väčšina ich jadrového paliva. Predstavujú poslednú fázu hviezdneho vývoja. Za primárny faktor, ktorý určuje, či hviezda skončí ako biely trpaslík, neutrónová hviezda alebo čierna diera, sa považuje hmotnosť hviezdy.

Pôvodcami bielych trpaslíkov sú ľahké hviezdy s hmotnosťami $M \leq 4 M_{\odot}$. Maximálna možná hmotnosť bielych trpaslíkov je okolo $1,4 M_{\odot}$.¹ Tieto pôvodné hviezdy na konci svojej evolučnej cesty, skôr ako sa stanú bielymi trpaslíkmi, odvrhnú časť svojej obálky, ktorá neskôr vytvorí planetárnu hmlovinu.

Neutrónové hviezdy a čierne diery pochádzajú z hmotnejších hviezd. Avšak deliaca hranica medzi hviezdami, z ktorých sa vytvoria neutrónové hviezdy, a tými, čo vytvoria čierne diery, je veľmi neurčitá, pretože konečné štádium evolúcie hmotných hviezd nie je do detailov pochopené. Aj neutrónové hviezdy majú svoj limit maximálnej hmotnosti, ten je v rozsahu $1,4 - 3 M_{\odot}$. Výpočty, ktoré sa zaoberajú trvalou stratou hmoty hviezdy alebo katastrofickým odvrhnutím hmoty a explóziou supernovy, však nie sú zatiaľ úplne dokonalé. Preto je presný osud hviezdy

¹Táto hmotnosť sa nazýva Chandrasekharova medza a je to maximálna hmotnosť, ktorú môže mať degenerovaný plyn elektrónov.

s hmotnosťou $\geq 4 M_{\odot}$ v súčasnosti nejasný.

Jednou z dvoch základných spoločných vlastností kompaktných objektov, ktorá ich odlišuje od normálnych hviezd, je ich mimoriadne malý rozmer vzhľadom na ich hmotnosť. Preto majú aj oveľa silnejšie povrchové gravitačné polia. Tento fakt je názorne uvedený v tabuľke 2.1 na strane 10.

Druhou vlastnosťou je fakt, že po spotrebovaní jadrového paliva nemôže proti gravitačnej kontrakcii pôsobiť tepelný tlak plynu. Preto sú biele trpaslíky udržiavané v rovnováhe tlakom degenerovaného elektrónového plynu, neutrónové hviezdy tlakom degenerovaného neutrónového plynu. Avšak čierne diery sú úplne „skolažované“ hviezdy bez akýchkoľvek prostriedkov na zadržanie gravitácie a preto sa zrúti do singularít.²

Táto časť bola spracovaná podľa [1].

Tabuľka 2.1: Vlastnosti kompaktných objektov

Objekt	Hmotnosť (M_{\odot})	Polomer (R_{\odot})	Str. hustota ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Gr. potenciál ($GM_{\odot}/R_{\odot}c^2$)
Slnko	1	1	10^3	10^{-6}
Biely trpaslík	≤ 1	$\sim 10^{-2}$	$\leq 10^{10}$	$\sim 10^{-6}$
Neutrónová hviezda	$\sim (1 - 3)$	$\sim 10^{-5}$	$\leq 10^{18}$	$\sim 10^{-1}$
Čierna diera	ľubovoľná	$2GM/c^2$	$\sim M/R^3$	~ 1

2.2 Neutrónové hviezdy

Názov neutrónových hviezd je odvodený z faktu, že v ich vnútri prevažujú neutróny, ktoré vznikajú spolu s elektrónovými neutrínami v dôsledku vzájomnej eliminácie elektrónov a protónov v procese inverzného beta rozpadu:



Protón a neutrón sú spravidla viazané v jadre. Táto jadrová reakcia sa môže spustiť, keď elektrón získa dostatočnú energiu na vyrovnanie hmotnostného rozdielu medzi protónom a neutrónom, $(m_n - m_p)c^2 = 1,29 \text{ MeV}$. Inverzný beta rozpad nastáva, ak je blokovaný proces beta rozpadu ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$). To sa stane vtedy, ak je hustota dostatočná na to, aby všetky elektrónové energetické hladiny vo Fermiho mori³ boli obsadené, až na jednu, ktorú zaplní emitovaný elektrón. Preto existuje kritická hodnota hustoty na spustenie inverzného beta rozpadu.

²Gravitačná singularita je teoretický bod v priestore, kde gravitačné pole a iné fyzikálne veličiny nadobúdajú nekonečné hodnoty. [11]

³elektrón (e^{-}) – pozitronové (e^{+}) páry

Únik neutrína z jadra pri beta rozpade a odčerpávanie energie ďalej urýchľuje kolaps hviezd [9]. Po výbuchu supernovy vzniká v SNR nová, extrémne malá, rýchlo rotujúca (perióda v ráde sekúnd) neutrónová hviezda s veľmi silným magnetickým poľom (okolo 10^8 T). Asymetria explózie môže spôsobiť vyvrhnutie neutrónovej hviezd zo SNR. [5]

Pretože hustota neutrónovej hviezd je porovnateľná s hustotou jadra, je neutrónová hviezda v podstate „gigantické jadro“ (10^{57} baryónov) držané pohromade vlastnou gravitáciou. Odhad hmotnosti neutrónovej hviezd je 1,4 hmotnosti Slnka, polomeru medzi 10 až 16 kilometrov a hustoty v ráde 10^{17} $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [5].

Neutrónové hviezdy môžu byť pozorované priamo ako pulzujúce rádiové zdroje, pulzary, a nepriamo pri akrécii plynu ako periodické röntgenové zdroje, röntgenové pulzary. Ich pozorovanie je však skomplikované tým, že sú viditeľné len počas astronomicky krátkeho obdobia, keď sú aktívne.

Druhá podkapitola bola vypracovaná najmä podľa [1].

2.3 Štruktúra neutrónových hviezd

Stavba neutrónových hviezd je nasledovná:

Povrch ($\rho \leq 10^9$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) je oblasť, v ktorej teploty a magnetické polia predpokladané pre väčšinu neutrónových hviezd môžu významne ovplyvniť stavovú rovnicu.

Vonkajšia kôra (10^9 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \leq \rho \leq 4,3 \cdot 10^{14}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) je pevná časť hviezd tvorená Coulombovou mriežkou ťažkých jadier existujúcich v beta-rovnováhe s plynom relativistických degenerovaných elektrónov.

Vnútorňá kôra ($4,3\cdot 10^{14}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \leq \rho \leq (2-2,4)\cdot 10^{17}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) pozostáva z mriežky jadier bohatých na neutróny spolu so supertekutým neutrónovým plynom a elektrónovým plynom.

Neutrónová kvapalina/tekutina ($(2-2,4)\cdot 10^{17}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \leq \rho \leq \rho_{\text{jadro}}$) pozostáva predovšetkým zo supertekutých neutrónov spolu s menšou koncentráciou supertekutých protónov a normálnych elektrónov.

Jadro ($\rho > \rho_{\text{jadro}}$) môže, ale nemusí existovať a závisí na tom, či dochádza k piónovej kondenzácii, alebo k prechodu na pevnú fázu neutrónov, alebo ku kvarkovej hmote, alebo k nejakej inej fáze fyzikálne odlišnej od neutrónovej tekutiny s hustotami nad istou kritickou hodnotou ρ_{jadro} ⁴.

Tento popis štruktúry neutrónových hviezd je prevzatý z [1].

⁴Centrálne hustoty aj tých najmasívnejších neutrónových hviezd sú $\rho_{\text{jadro}} \sim 10^{18}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Preto sa možnosť prechodu na kvarkovú hmotu či iné exotické formy zdá nepravdepodobná.

2.4 Pulzary

Pulzary sú rotujúce neutrónové hviezdy, ktoré emitujú lúče elektromagnetických vln nad magnetickými pólmi s rýchlosťou periódy ich rotácie. Objavili ich v roku 1967 Jocelyn Bell a Anthony Hewish [1] v rádiovnej oblasti spektra. Od tohto priekopníckeho objavu boli pulzary zaznamenané aj v iných oblastiach spektra, ako napríklad v optickej, röntgenovej a gama oblasti.

Merania ukázali, že perióda pulzarov postupom času rastie, čo naznačuje, že rotácia hviezd sa spomaľuje. Tento jav sa pripisuje pôsobeniu ich magnetického poľa. Siločiarly sú ukotvené k povrchu neutrónovej hviezdy, pretože sú generované cirkulujúcimi elektrickými prúdmi vo vnútri hviezdy. A tak ako sa otáča hviezda, tak sa musí točiť aj pole. Vystupujúce magnetické vlny spolu s difúznymi vetrami nabítych častíc odnášajú energiu a spôsobujú postupné spomaľovanie rotácie hviezdy. Nameraná rýchlosť spomaľovania rotácie umožňuje odhad veľkosti magnetického poľa. [3]

Existujú nasledujúce tri základné triedy pulzarov založené na zdroji energie: rotačne poháňané pulzary, akreáciou poháňané pulzary a magnetary.

Rotačne poháňané pulzary emitujú zo svojich magnetických pólov elektromagnetické žiarenie vyplývajúce z ich vlastnej rotačnej energie. Emitované dipólové žiarenie pokrýva veľkú časť elektromagnetického spektra, všeobecne od röntgenovej až k rádiovnej oblasti. Typicky je však žiarenie pozorované v rádiovnej oblasti spektra.

Akreáciou poháňané pulzary emitujú elektromagnetické žiarenie najmä prostredníctvom akreácie materiálu na svoj akrečný disk, typicky od binárneho spoločníka v tesnej blízkosti, alebo dokonca od ich blízkych SNR. Akrečný disk vytvára röntgenové horúce škvrnny, ktoré sú zodpovedné za periodické kolísanie intenzity (a neperiodické zmeny intenzity) v týchto pulzaroch.

Magnetary sú považované za zdroje opakovane sa zvyšujúceho mäkkého gama žiarenia (**SGR** – soft gamma ray repeater) a za anomálne röntgenové pulzary (**AXP** – anomalous X-ray pulsars). Magnetary sú silne zmagnetizované neutrónové hviezdy, v skutočnosti viac ako 100 krát silnejšie ako bežné neutrónové hviezdy, s magnetickým poľom v ráde 10^{10} T a môžu emitovať röntgenové aj gama žiarenie zoslabovaním ich veľmi silného magnetického poľa. [5]

2.5 Magnetary: AXP a SGR

SGRs sú röntgenové hviezdy emitujúce jasné opakujúce sa záblesky mäkkého gama žiarenia (rádovo desiatky keV). Fyzikálna podstata týchto hviezd bola záhadou po mnoho rokov. Prvá hypotéza navrhutá Thompsonom a Duncanom v roku 1992 tvrdila, že SGR sú magneticky poháňané neutrónové hviezdy, teda magnetary. Na-

sledujúce pozorovacie štúdie podporili túto hypotézu. Astronómovia sa teraz domnievajú, že všetky emisie detekované z SGR a z blízkej triedy hviezd, známej ako anomálne röntgenové pulzary AXP, sú poháňané rozpadom magnetického poľa.

Aj keď bolo zatiaľ zistených len 23 magnetarov (11 SGR, z toho 7 potvrdených a 4 kandidáti, a 12 AXP, z toho 9 potvrdených a 3 kandidáti) [4], takmer určite existujú v našej a v každej inej galaxii milióny takýchto hviezd. Keďže však prestanú emitovať jasné záblesky po púhych 10000 rokoch, bolo detekovaných zatiaľ len zopár najmladších magnetarov.

Magnetary sú rýchlo rotujúce (do 12 sekúnd) neutrónové hviezdy s mimoriadne silným magnetickým poľom, s trvalým žiarivým výkonom $10^{27} - 10^{29}$ W a spomaľovaním rotácie v intervale $10^{-13} - 10^{-10}$ s/s [2]. Tabuľka 2.2 na strane 14 uvádza porovnanie rôznych magnetických polí. Prvý spoľahlivý odhad magnetizmu SGR vykonala Chryssa Kouveliotou v roku 1998 a určila jeho indukciu na $8 \cdot 10^{10}$ T.

V poliach silnejších než $B_Q = 4,4 \cdot 10^9$ T (indukcia kvantového elektrodynamického poľa)⁵, čo je prípad magnetarov, krúžia elektróny takmer rýchlosťou svetla pozdĺž magnetických siločiar aj vo svojom najnižšom kvantovo-energetickom stave. V dôsledku toho sa veľmi zmagnetizované vákuum – Fermiho more – stáva magnetickou šošovkou.⁶ Röntgenové fotóny letiace cez tak silné pole sa ľahko rozdelia na dva, alebo sa spoja.

Táto podkapitola bola vypracovaná podľa [3].

⁵Táto indukcia poľa je daná kombináciou základných konštánt: $B_Q = m_e^2 c^3 / \hbar e$, kde m_e je hmotnosť elektrónu, c je rýchlosť svetla, \hbar je redukovaná Planckova konštanta a e je elementárny náboj.

⁶Vákuum sa stáva dvojlohným ako kryštál vápenca a je schopné skresliť a zväčšiť obraz.

Tabuľka 2.2: Porovnanie indukcií magnetických polí

Zemské magnetické pole <i>merané na severnom magnetickom póle</i>	$6 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
Obyčajný magnet <i>ako magnetky na chladničke</i>	0,01 T
Silné magnetické polia v slnečných škvrnách <i>na povrchu Slnka</i>	0,4 T
Najsilnejšie trvalé magnetické pole v laboratóriu <i>„hulking huge electromagnets“</i>	45 T
Najsilnejšie človekom vyrobené pole <i>hoci len na 4 až 8 mikrosekúnd</i>	10^3 T
Najsilnejšie pole detekované na ne-neutrónovej hviezde <i>na kompaktných bielych trpaslíkoch</i>	10^4 T
Povrchové pole na póloch rádiových pulzarov <i>najznámejší druh neutrónových hviezd</i>	$10^8 - 10^9 \text{ T}$
Povrchové pole na póloch magnetarov <i>SGR a AXP (vnútorné pole môže mať hodnotu až 10^{12} T)</i>	$10^{10} - 10^{11} \text{ T}$

2.6 Magnetické pole magnetarov

Neutrónové hviezdy sú pri formovaní veľmi horúce. Hustá tekutina neutrónov sa vo vnútri hviezdy víri, aby tak pomohla odvieť teplo; tento pohyb sa nazýva konvekcia. Táto tekutina môže byť tiež dobrým elektrickým vodičom, pretože okrem neutrónov obsahuje aj množstvo voľných elektrónov a protónov. To znamená, že magnetické siločiarly sú zmiatané konvektívnymi prúdmi elektricky vodivej tekutiny.

Ak sa hviezda zrodí s dostatočnou rýchlosťou rotácie, účinky konvekcie a rotácie sa skombinujú a hviezda tak získa zložené magnetické pole procesom známym ako dynamo efekt. Dynamo pôsobí tiež vo vnútri Zeme a Slnka a dáva im tak ich charakteristické magnetické pole, ktoré je znázornené na obrázku číslo 2.1 na strane 16. Ideálne dynamo dokáže v rodiacej sa horúcej neutrónovej hviezde vygenerovať pole s indukciou 10^{12} T .

Dynamo a konvekcia ustáva, keď hviezda chladne. V neutrónovej hviezde toto nastáva už asi po 10 sekundách, to ale stačí na sfomovanie silného magnetického poľa. Potom ostáva pole uväznené alebo zamrznuté v navrstvovej neutrónovej tekutine vo vnútri hviezdy.

V mladom magnetare sa magnetické pole časom vyvíja a svojimi silami pôsobí na kôru magnetaru. Nie je však dostatočne silné na to, aby stláčalo kôru vo vertikálnom smere, ale dokáže vyvolať točivý pohyb častí kôry (škvrn) v horizontálnom smere, kde pôsobia len sily šmykovej deformácie. S pohybom kôry sa ale stočia

aj magnetické siločiarly vyčnievajúce nad povrch hviezdy, kde sú ukotvené, čo vedie k vytvoreniu elektrického prúdu pozdĺž oblúka podľa Ampérovho zákona. Táto situácia je zobrazená na strane 16 na obrázku číslo 2.2.

Ampérov zákon hovorí, že krivkový integrál magnetickej indukcie pozdĺž uzavretej orientovanej krivky (v tomto prípade zelená kružnica okolo oblúka skrútených siločiar) nazývanej Ampérova krivka je priamo úmerný celkovému elektrickému prúdu pretekajúcemu plochou ohraničenou touto krivkou [6]. A tak nabité častice prúdia pozdĺž skrúteného zväzku magnetických siločiar, ktoré tvoria oblúk nad povrchom hviezdy. Elektróny tečú jedným smerom, kým protóny a ióny prúdia opačným smerom.

Röntgenová emisia prebieha v magnetaroch dvomi spôsobmi. Prvým je, keď protóny a ťažšie ióny narážajú na povrch hviezdy v jednom footpointe⁷. Tie zohrievajú škvry na kôre, ktoré potom žiaria v mäkkej röntgenovej oblasti. Druhým spôsobom sú rýchle elektróny prúdiace v opačnom smere. Síce tiež dopadajú na povrch a zohrievajú ďalšie footpointy, ale čo je dôležitejšie, tieto elektróny sa často zrážajú s röntgenovými fotónmi nad povrchom hviezdy, pričom fotónom odovzdávajú svoju kinetickú energiu. Mnoho mäkkých, tepelných röntgenových fotónov žiaria-aceho povrchu preto získa vysokú energiu tvrdého röntgenu.

Škvry na kôre magnetarov sa krúčia elasticky (podľa šmykovej deformácie). Keď sa ale magnetické sily dostatočne zosilnia, môžu tiež plasticky zdeformovať štruktúru kôry. Takéto krútenie kôry pravdepodobne vyvoláva epizódy vzplanutí a výbuchov. Viac informácií na [3].

Týmto spôsobom sa energia magnetického poľa magnetaru postupne disipuje a mení sa na röntgenové žiarenie a rotácia hviezdy sa spomalí. Rýchlosť, s akou sa mení perióda pulzaru, je odvodená od rotačnej periódy pulzaru a od MET (Mission Elapsed Time – čas trvania družicovej misie) a je daná vzťahom:

$$P(t) = P_0 + \dot{P}(t - t_0), \quad (2.2)$$

kde P je rotačná perióda pulzaru v sekundách, P_0 je počiatková perióda, \dot{P} je zmena periódy pulzaru, $(t - t_0)$ je čas súvisiaci s (MET).

Podľa tejto rýchlosti zmeny periódy môže byť určené magnetické pole hviezdy rovnicou:

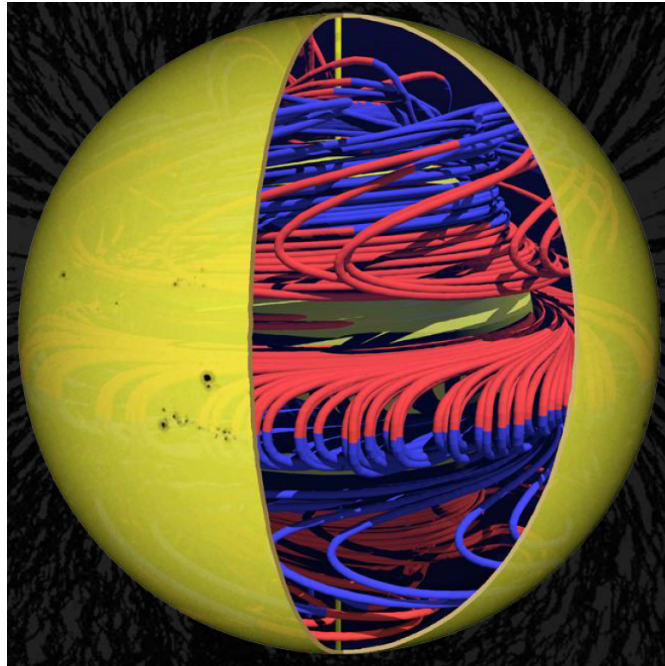
$$B^2 = \frac{3Ic^3}{8\pi^2 R^6} \cdot P \cdot \dot{P}, \quad (2.3)$$

kde $I = 2/5MR^2$ je moment zotrvačnosti gule, $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rýchlosť svetla a R je polomer magnetaru [5]. Prvý zlomok v tomto vzťahu sa môže aproximovať ako [21]:

$$a = \frac{3Ic^3}{8\pi^2 R^6} = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ T}. \quad (2.4)$$

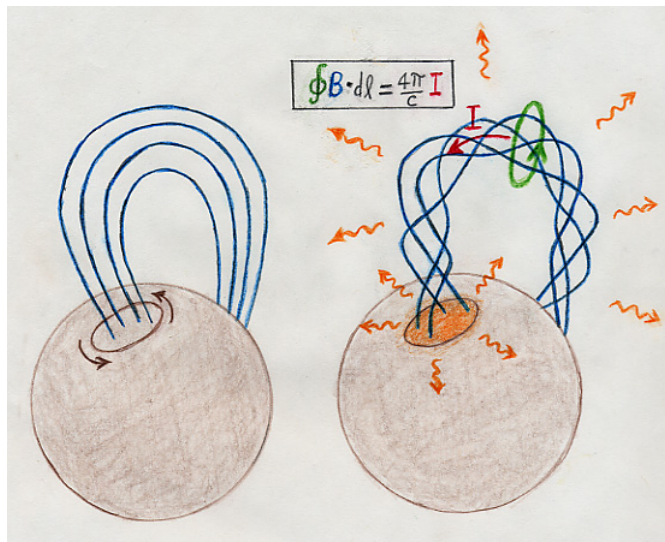
⁷miesto, kde magnetické siločiarly pretínajú fotosféru [12]

Obr. 2.1: Magnetické pole Slnka



http://www.aip.de/image_archive/images/sun_withdynamo.jpg

Obr. 2.2: Magnetické siločiarý nad povrchom magnetaru



<http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/twisting.jpg>

Kapitola 3

Získavanie a spracovanie dát

Tretia kapitola popisuje prístroje kozmického observatória Swift, špeciálne röntgenový teleskop XRT, ktorý pozoroval skúmané magnetary. Ďalej uvádza presný postup získavania dát z pozorovaní teleskopu XRT a ich predprípravu pred analýzou.

3.1 Swift: XRT

Swift – Swift Gamma-Ray Burst Mission – je kozmické observatórium pod správou americkej agentúry NASA. Pozoruje gama záblesky a ich dosvity v niekoľkých vlnových dĺžkach, poskytuje spektrá, svetelné krivky dosvitov a ak je to možné, určí aj vzdialenosť zdroja žiarenia. Swift bol vypustený 20. novembra 2004 a na obežnú dráhu bola družica vynesena nosnou raketou Delta II. Každý rok napozoruje okolo 100 nových zábleskov.

Satelit nesie tri prístroje pokrývajúce rozsah energií od 0,002 do 150 keV:

BAT – Burst Alert Telescope (15 – 150 keV),

XRT – X-Ray Telescope (0,2 – 10 keV),

UVOT – Ultra Violet Optical Telescope (170 – 650 nm).

Schéma Swiftu je zobrazená na obrázku číslo 3.1 na strane 19.

Pre túto prácu je podstatný hlavne prístroj XRT, ktorý je röntgenovým ďalekohľadom pozorujúcim v rozsahu 0,2 – 10 keV s detekčným prvkom CCD. Jeho efektívna plocha je 110 cm², ohnisková vzdialenosť 3,5 m a zorné pole 23,6 arcmin². Schéma prístroja XRT je zobrazená na obrázku číslo 3.2 na strane 19.

XRT môže pracovať v štyroch nasledujúcich režimoch:

IM – Image Long and Short,

LR a **PU** – Low rate a Piled-up Photodiode,

WT – Windowed Timing,

PC – Photon Counting.

Hlavným rozdielom medzi týmito režimami je časové rozlíšenie, v ktorom pracujú, presnosť dát a intenzita zdroja, ktorý teleskop pozoruje. Módy sú uvedené vzostupne podľa časového rozlíšenia a zostupne podľa intenzity zdroja.

V tejto práci boli používané dáta z módu Photon Counting kvôli jeho citlivosti v intenzite. Aj napriek obmedzenému časovému rozlíšeniu (bin) 2,5 s zachováva plné zobrazenie a spektroskopické rozlíšenie. Je vhodný pre intenzity menšie ako 1 mCrab¹. Ďalšie informácie sú dostupné na [7], [8] a [10].

3.2 Získavanie dát

Pozorovania teleskopu XRT je možno získať z archívu HEASARC (High Energy Astro-physics Science Archive Research Center), ktorý vyše 30 rokov zhromažďuje dáta z pozorovaní vo vysokých energiách extrémneho ultrafialového, röntgenového a gama žiarenia z 25 vesmírnych observatórií. [14]

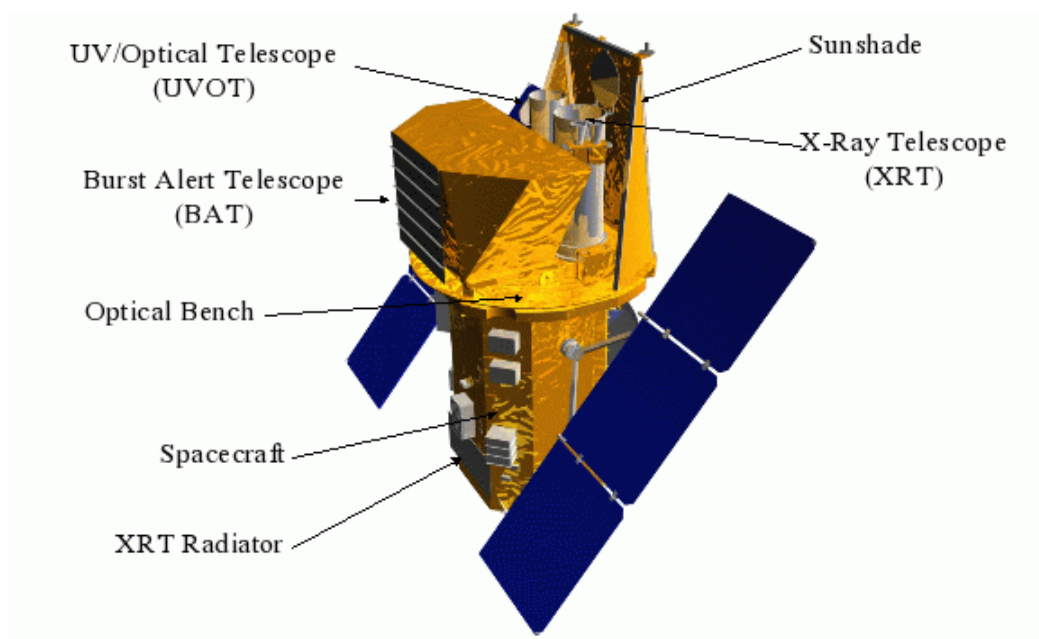
Dáta z pozorovaní vesmírneho observatória Swift sa dajú voľne stiahnuť na adrese `ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/swift/data/obs/`, kde sú roztriedené podľa dátumu a identifikačného čísla pozorovania. Na pomoc pri masívnom získavaní dát prichádza program `browse_extract_wget.pl`, ktorý vytvorí tabuľku s výsledkami požiadaviek na HEASARC databázu. Užívateľia môžu zadať jeden objekt alebo môžu získať informácie pre zoznam objektov. [15]

Spracovanie dát zo Swiftu sa vykonáva v Swift Data Center (SDC) v Goddard Space Flight Center (GSFC). Telemetrické dáta prijaté z kozmickej sondy ukladané na zemi vo formáte takzvaných Level 0 súborov slúžia na vytvorenie FITS súborov, ktoré obsahujú snímky a dáta pozorovaní z 3 prístrojov. Tieto Level 1 súbory sú následne upravené príkazom `xrtpipeline`, ktorý vytvorí kalibrované snímky a očistené dáta pozorovaní pripravené na ďalšie spracovanie. Obrázok 3.3 na strane 20 zobrazuje schému rôznych úrovní spracovania dát. [17]

Očistené Level 2 dáta sú bežne generované SDC spracovaním, ale užívateľom sa odporúča vlastné spracovanie Level 1 súborov príkazom `xrtpipeline`, aby mali istotu najaktuálnejšej verzie skriptov a mohli si prispôbiť úroveň spracovania. Tento príkaz postupne spúšťa úlohy pre spracovanie dát z XRT teleskopu. Ich presný zoznam je uvedený na stránke [19]. Prebieha v troch štádiách: najprv spustí rôzne kalibračné príkazy v závislosti na spracovávanom súbore, potom kalibrované dáta vytriedi podľa zadaných podmienok pre sadu parametrov a nakoniec vygeneruje produktové súbory, 2D snímky, spektrá a svetelné krivky, pripravené na ďalšiu analýzu. [18], [16]

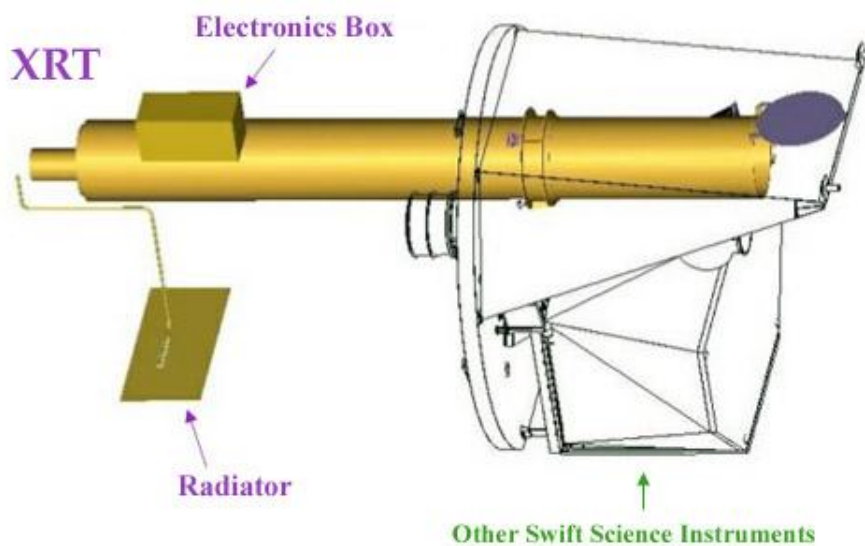
¹Crab je astrofotometrická jednotka na meranie intenzity röntgenových zdrojov. Jednotka 1 crab zodpovedá intenzite Krabej hmloviny v danej energii röntgenových fotónov. V intervale 2 – 10 keV platí $1 \text{ crab} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. [13]

Obr. 3.1: Swift



<http://www.swift.ac.uk/about/images/instruments.gif>

Obr. 3.2: XRT



http://www.swift.ac.uk/about/images/XRT_schematic.jpg

Obr. 3.3: Úrovne spracovania dát

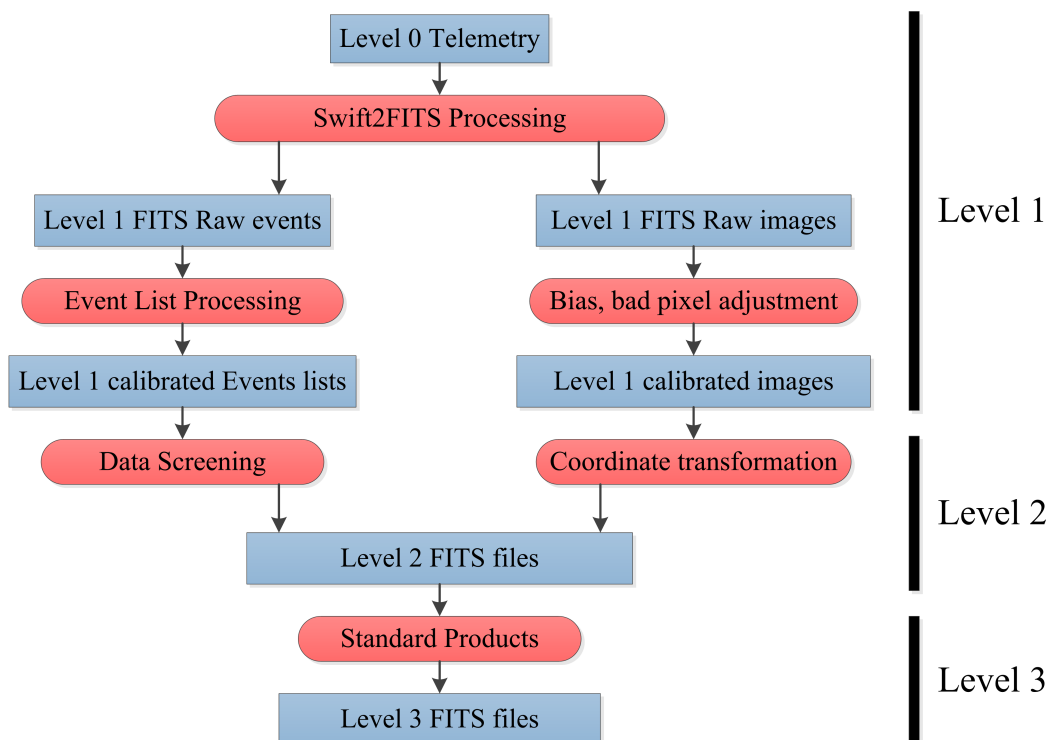


Schéma vytvorená podľa
http://www.swift.ac.uk/analysis/images/highlevel_pp1.gif

Kapitola 4

Svetelné krivky magnetarov

Nasledujúca kapitola sa v prvej časti venuje popisu spracovania získaných a predpripravených dát, svetelných kriviek. Druhá časť uvádza informácie o skúmaných objektoch a výsledky spracovania dát z pozorovaní.

4.1 Spracovanie svetelných kriviek

Počiatočným krokom pri spracovávaní svetelných kriviek vyprodukovaných príkazom `xrtpipeline` je prevod FITS súborov s príponou `.lc` na dáta typu ASCII s príponou `.dat` pomocou sady nástrojov STILTS (Starlink Tables Infrastructure Library Tool Set), konkrétne príkazu `tpipe` konvertujúceho formáty tabuliek [20]. Takto vzniknú tabuľky obsahujúce v prvých dvoch stĺpcoch čas (v sekundách od počiatku pozorovania) a pozorovaný signál (county za sekundu), ktoré sa budú ďalej analyzovať. Vzhľad jednej z tabuliek je nasledovný:

#	TIME	RATE
	0.0	0.0
	2.509999990463257	0.7968128
	5.019999980926514	0.0
	7.5299999713897705	0.0
	10.040000021457672	0.3984064
	12.550000011920929	0.0
	15.060000002384186	0.3984064

Ďalšie spracovanie tabuľky prebieha pomocou octave skriptu `lc.m`, ktorý v prvej fáze odstráni nulové body (signál je použiteľný, ak je nenulový, pretože by mal mať aspoň hodnotu pozadia), v druhej fáze hľadá periódu P a zmenu periódy \dot{P} a v poslednej tretej fáze vykresľuje grafy.

Odstránenie nulových bodov sa vykonalo pomocou nasledovných príkazov:

```
k = 1;
n = size(data,1);           # data je matica tvorená tabuľkou
for i=1:n                   # obsahujúcou v prvých dvoch
    if (data(i,2)>eps(0))    # stĺpcoch TIME a RATE
        t(k) = data(i,1);
        rate(k) = data(i,2);
        k = k+1;
    endif
endfor
```

Hľadanie periódy P a zmeny periódy \dot{P} využíva takzvanú χ^2 *folding metódu*, ktorá pre fázovú krivku počíta hodnotu χ^2 oproti konštantnej hodnote signálu (v tomto prípade mediánu signálu) na zadanom skúšobnom intervale periódy, respektíve zmeny periódy. Maximálna hodnota χ^2 indikuje skutočnú hodnotu periódy a zmeny periódy magnetaru. [21]

Fáza ϕ pre daný čas t je definovaná rovnicou:

$$\phi(t) = \left[f(t - t_0) + \frac{1}{2} \dot{f}(t - t_0)^2 \right] \bmod 1, \quad (4.1)$$

kde frekvencia f a zmena frekvencie \dot{f} súvisí s periódou P a zmenou periódy \dot{P} podľa vzťahov $P = 1/f$ a $\dot{P} = -\dot{f} \cdot P^2$. Funkcia mod dáva zvyšok po delení, tu je deliteľom 1.

V prípade analyzovaných svetelných kriviek je $t_0 = 0$. Fáza sa pre zadaný interval periódy P a zmeny periódy \dot{P} vypočíta príkazmi:

```
f = 1/P;
df = -dP/P^2;
phase = f*t + (df*t.^2)/2;
phase = mod(phase,1);
```

Folding metóda spočíva v tom, že najskôr zoradí dvojice fáz a signálov vzostupne, rozdelí ich do 10 skupín podľa hodnôt fáz po celých desatinách a vypočíta robustný priemer signálov a deviáciu pre každú z 10 skupín. Vypočítaný robustný priemer sa vykreslí na y -os do fázovej krivky. Takto sa všetky fázy akoby naskladajú na seba do jedinej fázovej krivky. Táto jednoducho znejúca metóda vyzerá vo forme kódu o čosi záhadnejšie:

```
N = 10;
data = [phase;rate]';
```

```

data = sortrows(data,1);      # zoradí fázy vzostupne aj so signálmi
n = size(data,1);
r = zeros(1,n);
R = zeros(1,N);
devR = zeros(1,N);
T = linspace(1/N,1,N);

i = 1;
j = 2;
k = 1;
ind = zeros(1,N+1);
ind(1) = 0;
ind(N+1)=n;
for i=1:n                      # ak je i-tá fáza väčšia ako (j-1)-ty
    if ( (data(i,1) > T(j-1)) ) # člen vektora T, zapíše do vektora
        ind(j) = i-1;          # ind poradové číslo predošlej fázy,
        j = j+1;              # teda rozdelí fázy do 10 skupín
    endif
endfor

k = diff(ind);
for i=1:N
    r = data(ind(i)+1:ind(i+1),2) # do r zapíše raty z 10 skupín fáz
    if (sum(r)>eps(0))
        [m,dev,istat] = am1(k(i),r,10); # am1 je kód pre robust. priem.
        R(i) = m;                       # robustný priemer signálov
        devR(i) = dev;                   # deviácia signálov
    else
        R(i) = 0;
        devR(i) = 0;
    endif
endfor

```

Robustný priemer sa vypočíta prostredníctvom metódy najväčšej pravdepodobnosti, ktorá je charakterizovaná funkciou L :

$$L = \prod_{i=1}^N p(x_i|\tilde{x}) = \prod_{i=1}^N f(x_i - \tilde{x}), \quad (4.2)$$

a logaritmus pravdepodobnostnej funkcie je

$$\ln L = \sum_{i=1}^N \ln f(x_i - \tilde{x}) = - \sum_{i=1}^N \rho(x_i - \tilde{x}). \quad (4.3)$$

Extrém pravdepodobnosti potom určí derivácia funkcie L :

$$\frac{d \ln L}{d \tilde{x}} = 0, \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^N \rho'(x_i - \tilde{x}) = \sum_{i=1}^N \psi(x_i - \tilde{x}) = 0. \quad (4.5)$$

Táto rovnica je počítaná numericky a pri použití Tukeyho lambda rozdelenia je $f = e^{-\rho}$, $\rho = x^6/6c^4 - (x^2/2)(1 - x^2/c^2)$ a $\psi = x(1 - x^2/c^2)$. Optimálna hodnota c je 6,0. [23], [24]

Nakoniec sa relevantnosť odhadnutej hodnoty periódy P či zmeny periódy \dot{P} určí testom χ^2 . Táto štatistika je charakterizovaná vzťahom:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(N_i - n_i)^2}{n_i}, \quad (4.6)$$

kde N_i je počet udalostí pozorovaných v i -tom bine a n_i je počet očakávaný podľa zvoleného rozdelenia. Čím vyššia je hodnota χ^2 , tým pravdepodobnejšia je správnosť odhadovanej hodnoty N_i . [23]

V tomto prípade sa N_i rovná robustnému priemeru signálu $R(i)$, vypočítanému v predchádzajúcich krokoch, a očakávanou hodnotou n_i je medián signálov:

```
for i=1:N
    X = R(i) - median(rate);
    if X>0
        chisq = chisq + X^2;    # delenie mediánom je tu zbytočné,
    endif                      # pretože sa hľadá maximum,
endfor                        # nie konkrétna hodnota
```

Tento celý proces sa spočiatku aplikuje na širokom intervale hodnôt periódy P (rádovo okolo očakávanej katalógovej hodnoty) a zmeny periódy \dot{P} . Interval sa postupne zužuje, až kým sa vypočítané periódy a zmeny periódy nezačnú blížiti k jedinej hodnote. Iterácie prebiehajú podľa nasledovných príkazov:

```
iter = 100;
P = linspace(6,9,iter);    # nastavuje sa P v sekundách
```



```

iterd = 100;
dP = logspace(-15,-2,iterd);      # nastavuje sa široký interval dP
#dP = linspace(1e-11,9e-11,iterd); # neskôr sa zúži na 1 rád
chisq = zeros(iterd,iter);

for J=1:iterd
    for I=1:iter
        [T,R,chisq(J,I)] = mkphase(N,P(I),dP(J),t,rate,1);
    endfor
endfor
# mkphase je funkcia, ktorá počíta
# fázové krivky, robust. priemer a chi^2

```

Keď je interval hľadaných períód P a zmien períód \dot{P} dostatočne úzky, výslednú hodnotu určí ťažisko týchto veličín:

$$x_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \chi_i^2}{\sum_{i=1}^n \chi_i^2}, \quad (4.7)$$

Neistotu zistených hodnôt P a \dot{P} určí smerodajná odchýlka [23]:

$$s_P = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_t)^2}{n - 1}}, \quad (4.8)$$

$$s_{\dot{P}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\dot{P}_j - \dot{P}_t)^2}{n - 1}}. \quad (4.9)$$

Predpokladá sa, že P a \dot{P} nekorelujú, čo naznačuje aj [22].

Z týchto odchýlok je možné zistiť neistotu hodnoty magnetického poľa B podľa Zákona šírenia neistôt [25]:

$$s_B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial P}\right)^2 s_P^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \dot{P}}\right)^2 s_{\dot{P}}^2}, \quad (4.10)$$

čo po dosadení dáva vzťah:

$$s_B = \sqrt{\frac{a \cdot \dot{P}_t}{4P_t} \cdot s_P^2 + \frac{a \cdot P_t}{4\dot{P}_t} \cdot s_{\dot{P}}^2}. \quad (4.11)$$

4.2 Výsledky spracovania dát

SWIFT J1822.3-1606

Tento objekt leží v súhvezdí Sagittarius a jeho súradnice sú: $\alpha = 18$ h 22 m 18.32 s, $\delta = -16^\circ 04' 27.2''$. [26]

Bol objavený 14. júla 2011 vesmírnou sondou Swift počas niekoľkých náhlych zjasnení. Tento magnetar má v rozpore s očakávaniami prekvapivo nízke vonkajšie magnetické pole, zatiaľ druhé najslabšie spomedzi magnetarov, a jeho vek je asi 550 tisíc rokov. [27]

Na obrázku číslo 4.1 na strane 28 je snímka hviezdy SWIFT J1822.3-1606 z pozorovania, ktoré bolo spracovávané, na obrázku číslo 4.2 na strane 28 je svetelná krivka, na obrázku číslo 4.3 na strane 29 graf závislosti χ^2 štatistiky na P a obrázku číslo 4.4 na strane 29 graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} .

SGR 1806-20

Druhý objekt leží opäť v súhvezdí Sagittarius, súradnice sú: $\alpha = 18$ h 08 m 39,32 s, $\delta = 20^\circ 24' 39,5''$. Jeho hmotnosť je $M = 12,391M_\odot$ pri polomere $R = 2,5 \cdot 10^{-6}R_\odot$. Žiarivý výkon je približne $L = 3 \cdot 10^6L_\odot$ a od Zeme je vzdialený asi 14,5 kpc. [28]

Objavenie tohto historicky prvého SGR sa datuje v roku 1979. Počas 80-tych rokov bol mimoriadne aktívny a počet zaznamenaných burstov presiahol stovku. Doteraz je to objekt s najsilnejším magnetickým poľom, ktorý bol kedy pozorovaný. Koncom roka 2004 bol pozorovaný mimoriadne silný gama záblesk, ktorý uvoľnil stokrát viac energie než záblesky z roku 1979. Aj napriek značnej vzdialenosti magnetaru bol záblesk tak silný, že dočasne narušil ionosféru Zeme a keby žiaril v optickom obore, bol by jasný asi ako Mesiac v splne. [29]

Na obrázku číslo 4.5 na strane 30 je snímka objektu SGR 1806-20 z pozorovania, na obrázku číslo 4.6 na strane 30 je svetelná krivka, na obrázku číslo 4.7 na strane 31 graf závislosti χ^2 štatistiky na P a obrázku číslo 4.8 na strane 31 graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} .

SGR 0501+4516

Poloha tohto magnetaru je rozdielna od dvoch predošlých, leží v súhvezdí Auriga a jeho súradnice sú: $\alpha = 05$ h 01 m 08.0 s, $\delta = +45^\circ 16' 31''$ a je vzdialený približne 4,6 kpc. [30]

Tento objekt bol prvýkrát pozorovaný 22. augusta 2008 satelitom Swift len vďaka svojmu búrlivému burstu a bol zaradený ako 15. magnetar. Počas prvých

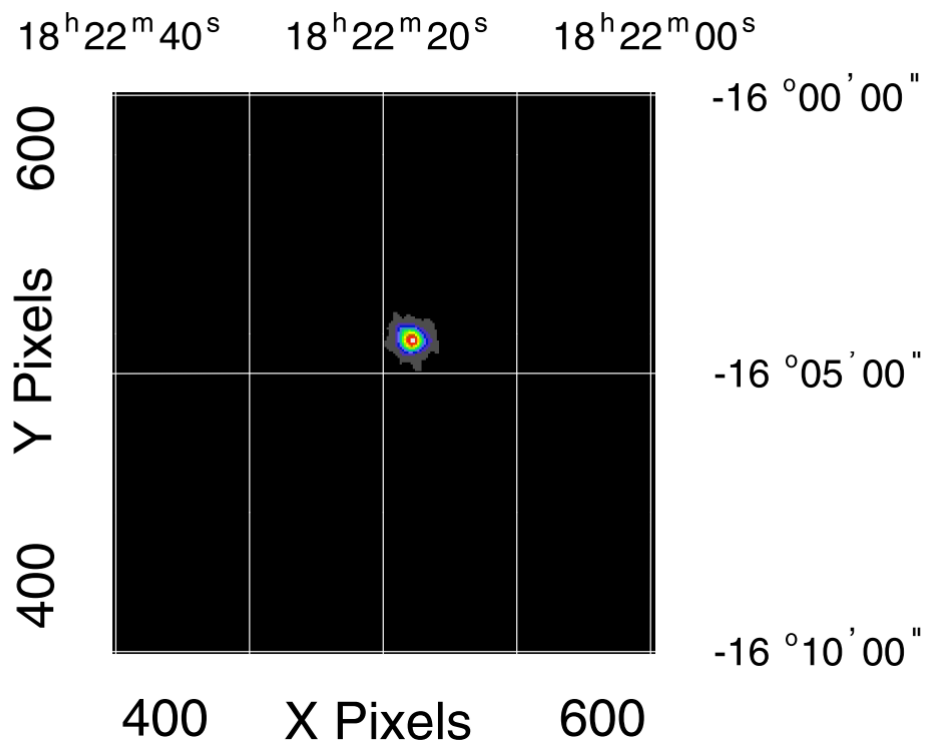
štyroch mesiacov po burste v auguste 2008 prebehlo na tomto SGR ešte niekoľko stoviek menších výbuchov. [31]

Na záver obrázkov číslo 4.9 na strane 32 so snímkou objektu SGR 0501+4516 z pozorovania, na obrázku číslo 4.10 na strane 32 je svetelná krivka, na obrázku číslo 4.11 na strane 33 graf závislosti χ^2 štatistiky na P a obrázku číslo 4.12 na strane 33 graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} .

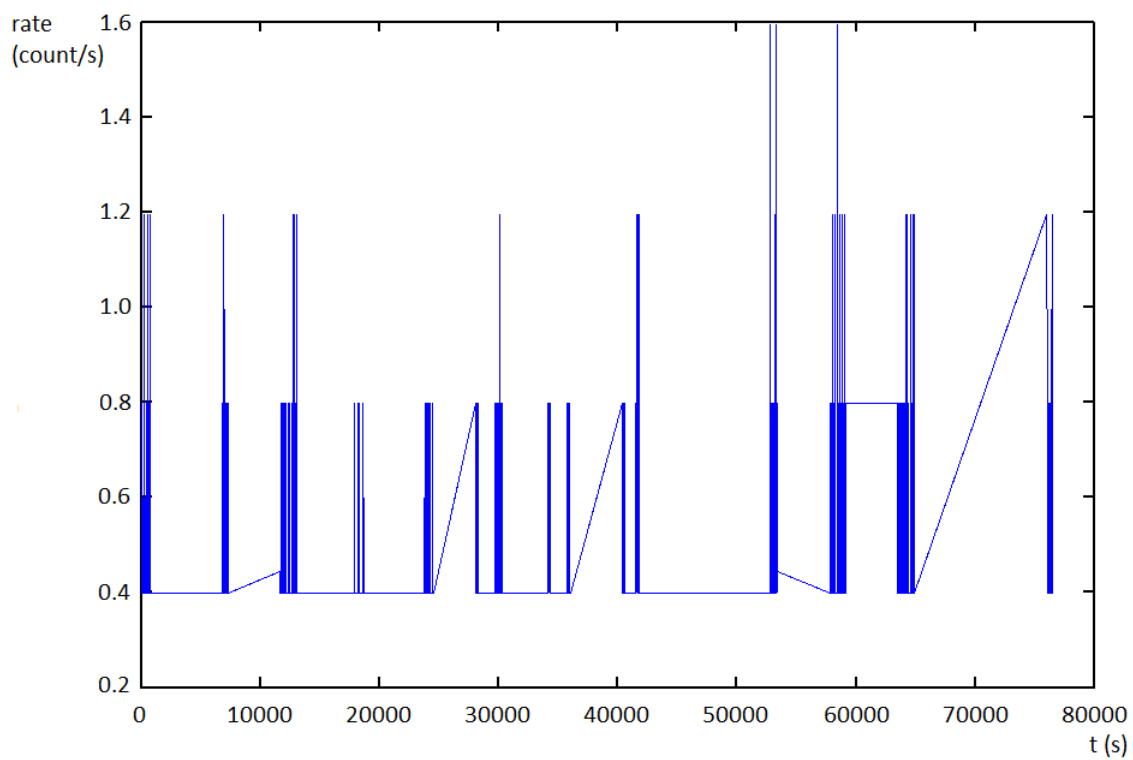
Nasledujúca tabuľka obsahuje výsledné ťažiská pre periódu P_t a zmenu periódy \dot{P}_t a veľkosť magnetického poľa B vypočítanú podľa rovníc (2.3) a (2.4) na daných intervaloch P a \dot{P} k jednotlivým magnetarom z daného počtu dát. Ďalej obsahuje tabuľkové hodnoty períód P_{tab} , zmien períód \dot{P}_{tab} a magnetické polia B_{tab} skúmaných objektov z katalógu magnetarov [4]. Neistoty pre jednotlivé veličiny sú uvedené v zátvorkách na príslušnom desatinnom mieste.

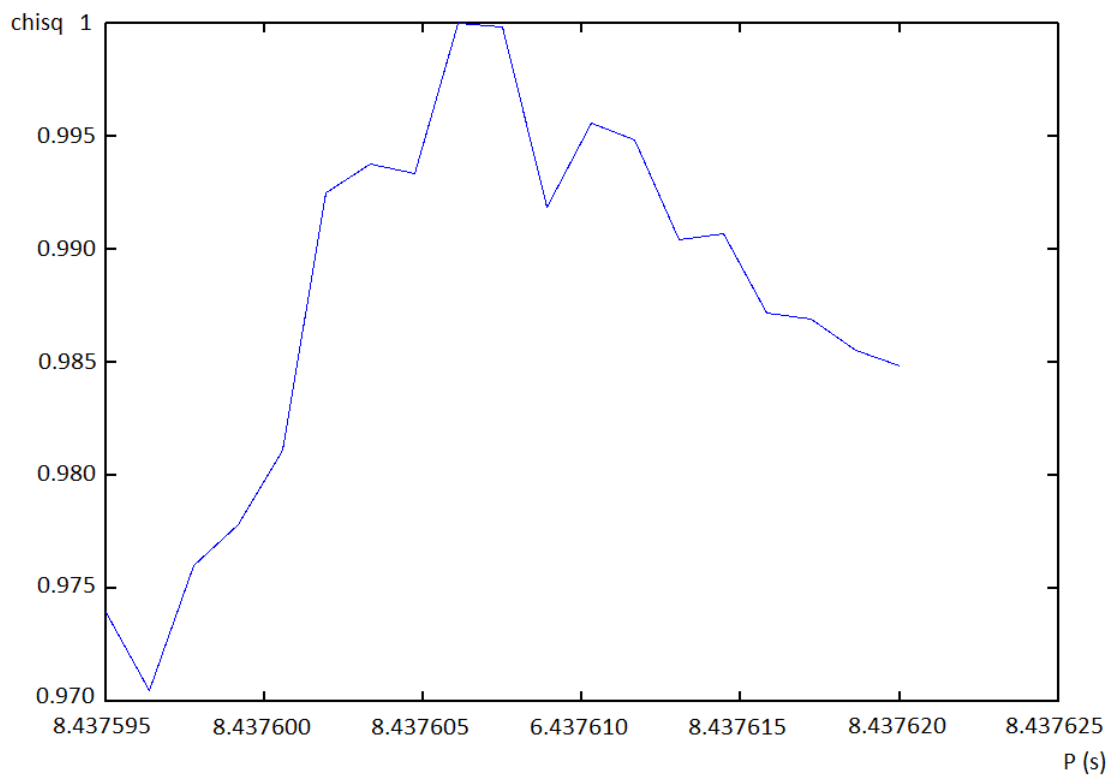
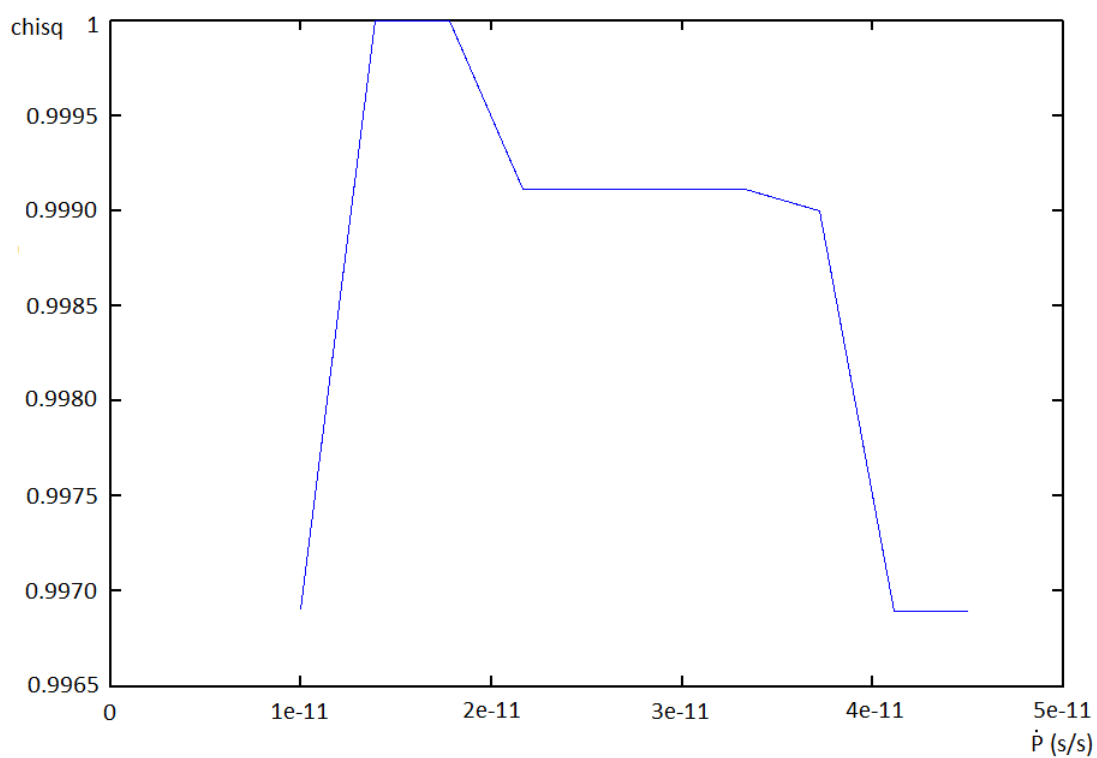
	SWIFT 1822.3-1606	SGR 1806-20	SGR 0501+4516
Počet dát	1277	1167	4621
Interval P	$\langle 8, 437595; 8, 437620 \rangle$	$\langle 7, 518720; 7, 518727 \rangle$	$\langle 5, 761542; 5, 761549 \rangle$
Interval \dot{P}	$\langle 1 \cdot 10^{-11}; 4, 5 \cdot 10^{-11} \rangle$	$\langle 4 \cdot 10^{-9}; 5, 5 \cdot 10^{-9} \rangle$	$\langle 7 \cdot 10^{-10}; 8, 2 \cdot 10^{-11} \rangle$
$P_t \pm s_P$ (s)	8,437608(2)	7,5187235(6)	5,7615455(2)
P_{tab} (s)	8,43771977(4)	7,6022(7)	5,76209653(3)
$\dot{P}_t \pm s_{\dot{P}}$ (s/s)	$2, 8(3) \cdot 10^{-11}$	$475(4) \cdot 10^{-11}$	$75, 00(8) \cdot 10^{-11}$
\dot{P}_{tab} (s)	$0, 0254(22) \cdot 10^{-11}$	$75(4) \cdot 10^{-11}$	$0, 582(3) \cdot 10^{-11}$
$B \pm s_B$ (T)	$4, 8(3) \cdot 10^{10}$	$60, 4(3) \cdot 10^{10}$	$21, 18(1) \cdot 10^{10}$
B_{tab} (T)	$0, 46 \cdot 10^{10}$	$24 \cdot 10^{10}$	$1, 9 \cdot 10^{10}$

Obr. 4.1: SWIFT J1822.3-1606, Swift XRT, 21. 2. 2012, Expozícia: 11011 s

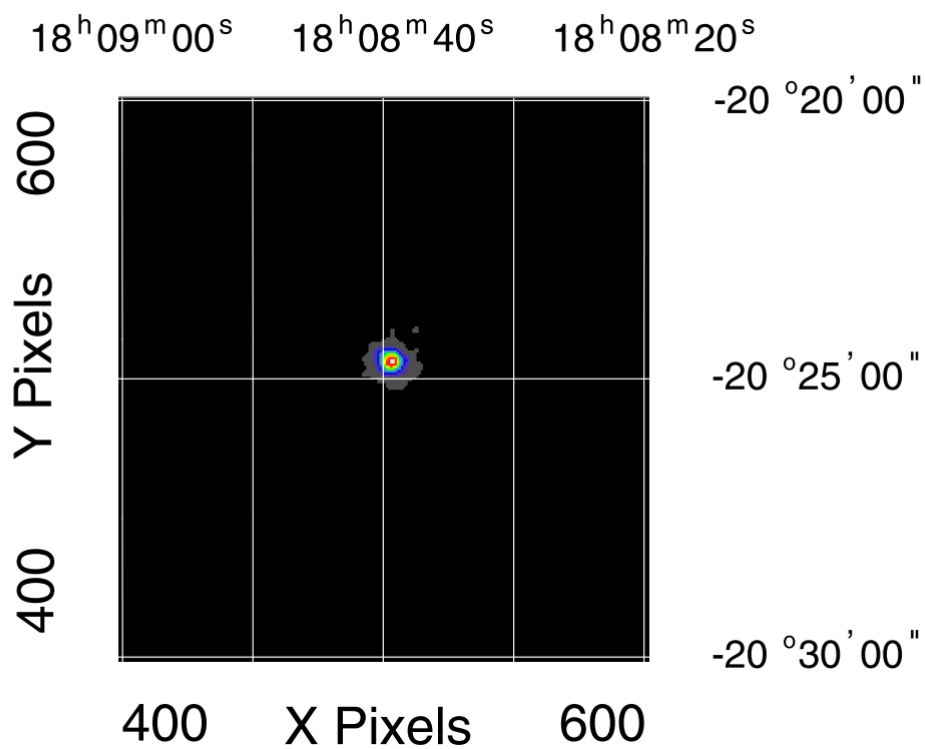


Obr. 4.2: SWIFT J1822.3-1606, Svetelná krivka

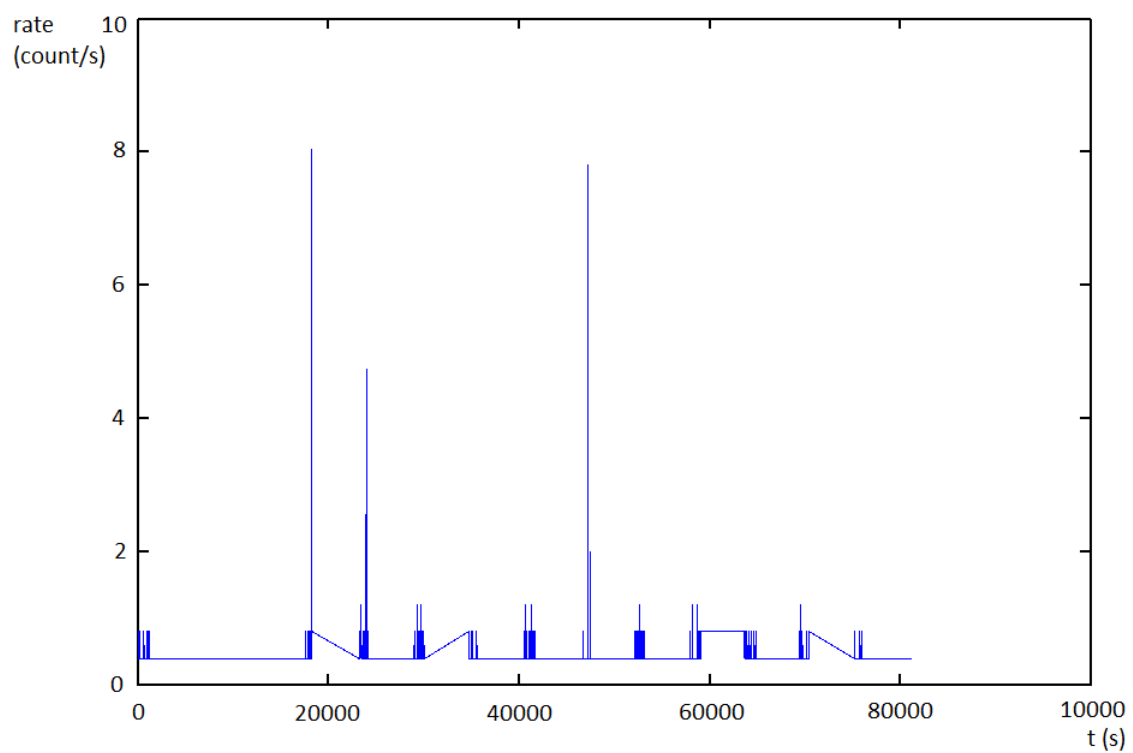


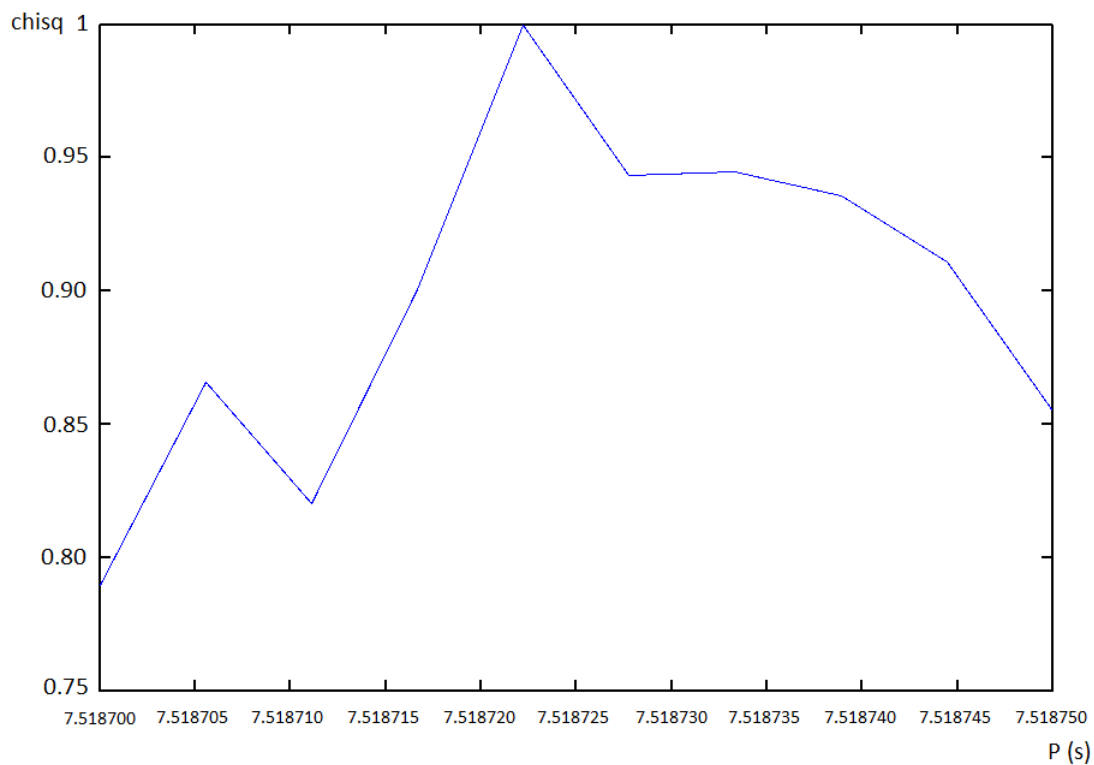
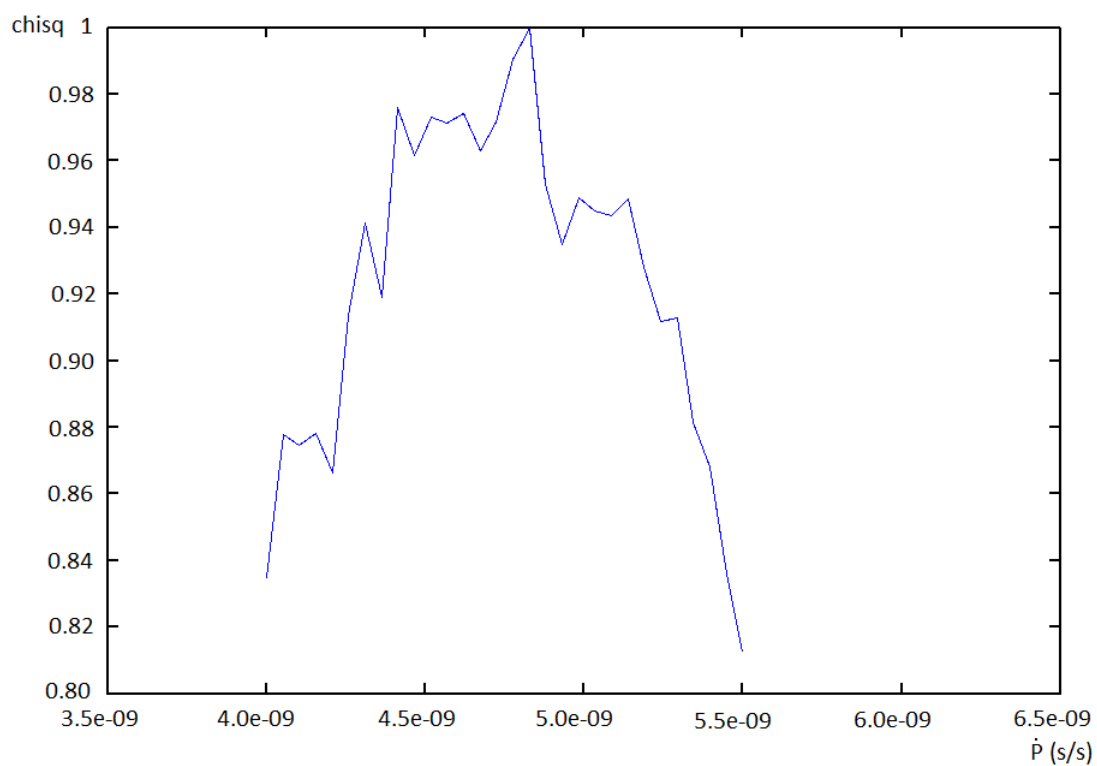
Obr. 4.3: SWIFT J1822.3-1606, Graf závislosti χ^2 štatistiky na P Obr. 4.4: SWIFT J1822.3-1606, Graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} 

Obr. 4.5: SGR 1806-20, Swift XRT, 10. 8. 2006, Expozícia: 14000 s

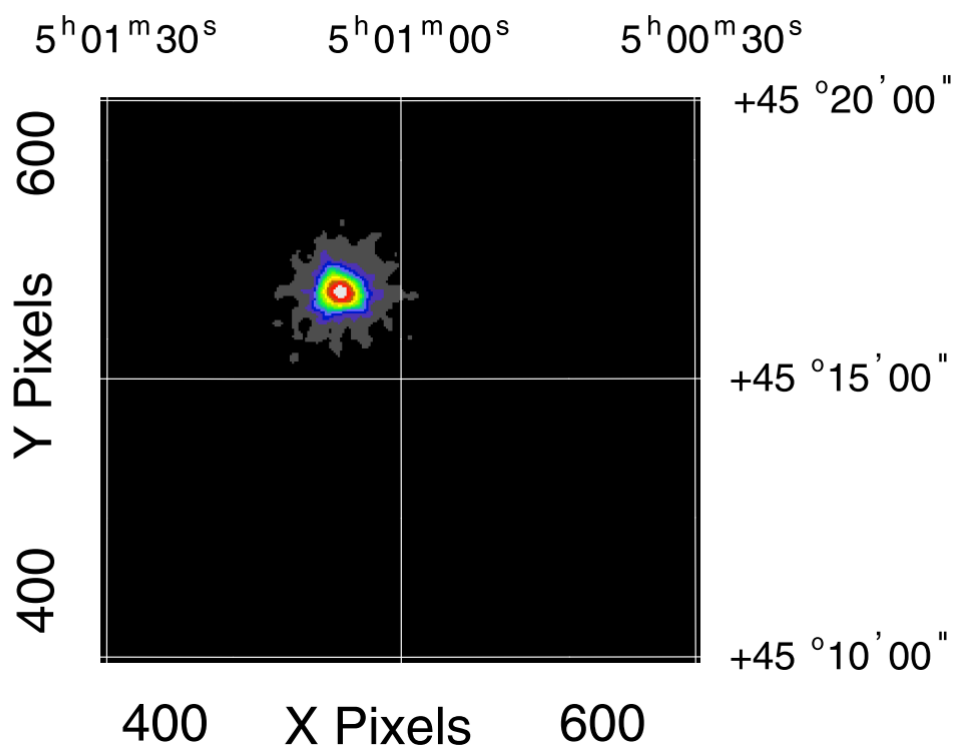


Obr. 4.6: SGR 1806-20, Svetelná krivka

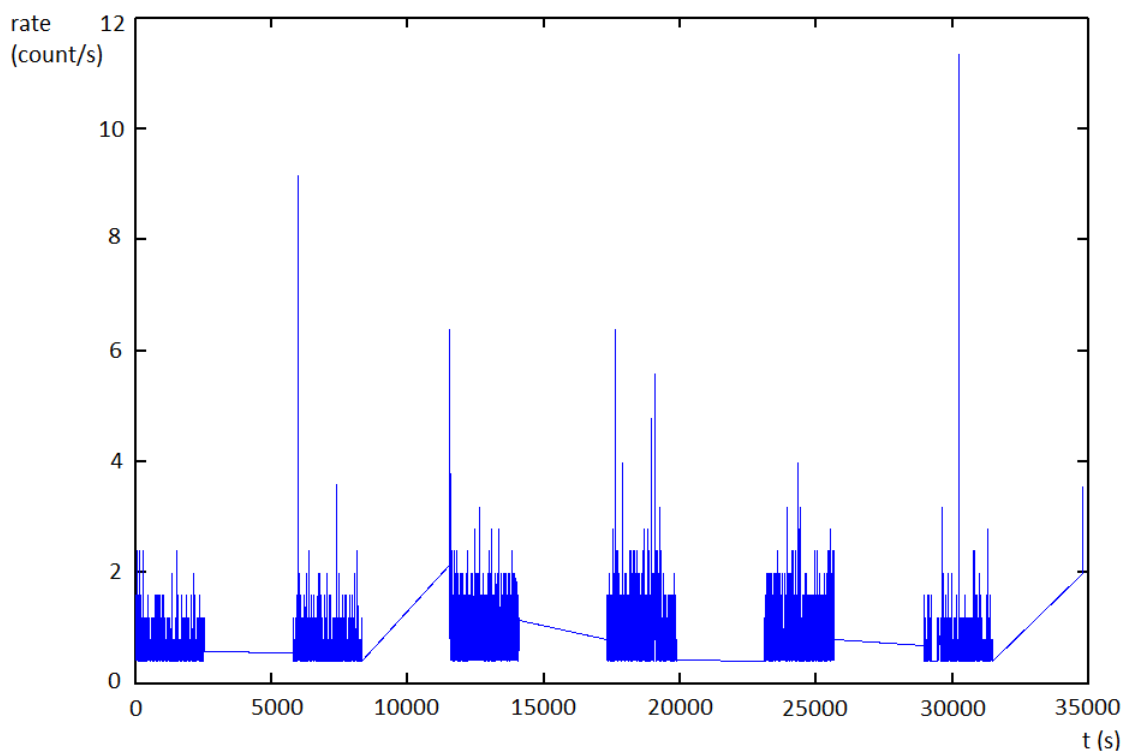


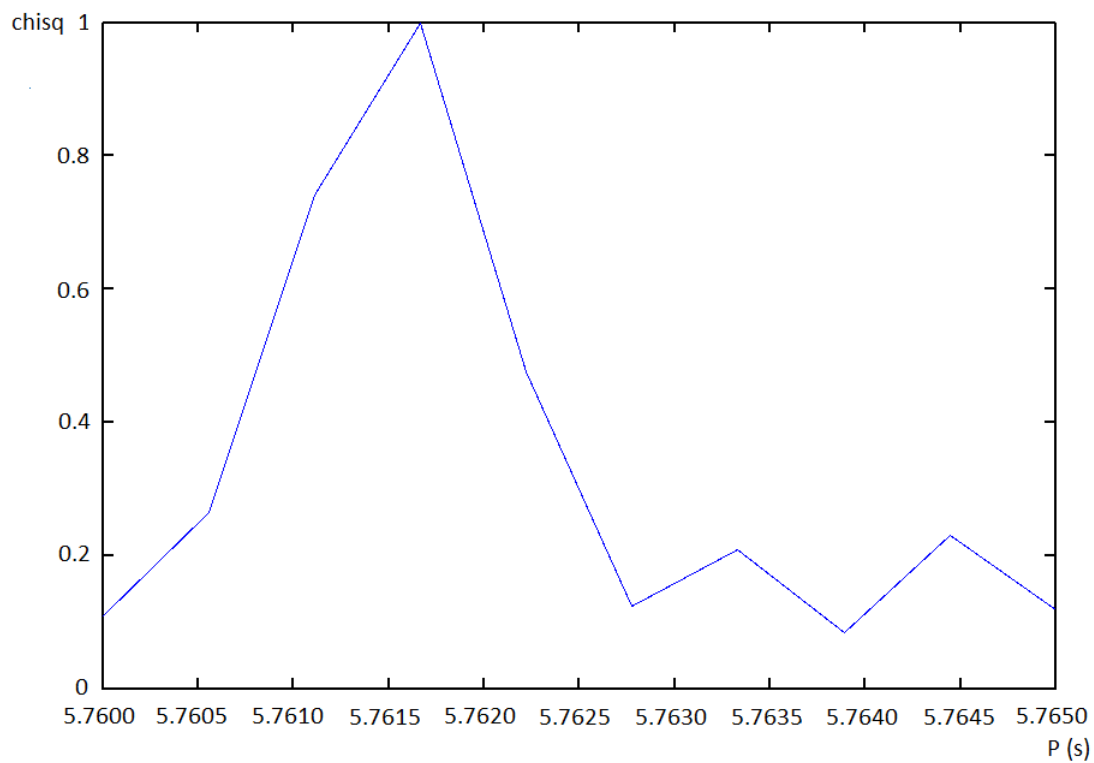
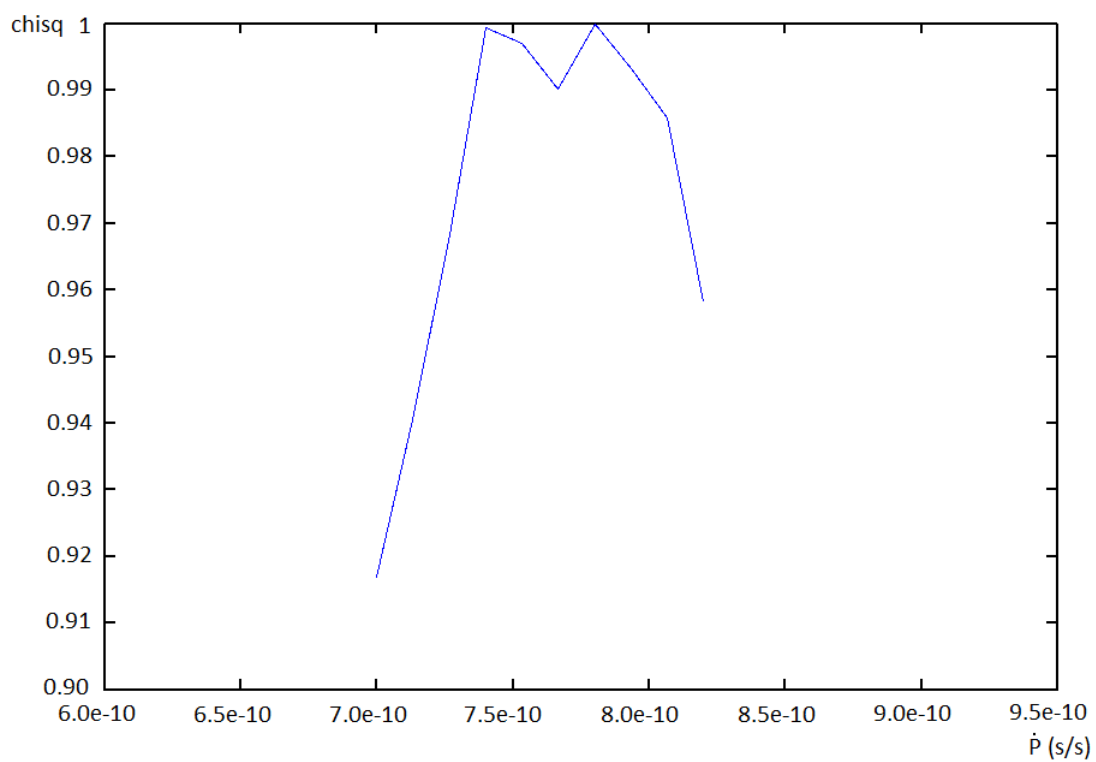
Obr. 4.7: SGR 1806-20, Graf závislosti χ^2 štatistiky na P Obr. 4.8: SGR 1806-20, Graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} 

Obr. 4.9: SGR 0501+4516, Swift XRT, 23. 8. 2008, Expozícia: 14750 s



Obr. 4.10: SGR 0501+4516, Svetelná krivka



Obr. 4.11: SGR 0501+4516, Graf závislosti χ^2 štatistiky na P Obr. 4.12: SGR 0501+4516, Graf závislosti χ^2 štatistiky na \dot{P} 

Kapitola 5

Záver

Medzi magnetary sa radia dva typy objektov: SGR (Soft Gamma Repeaters) a AXP (Anomalous X-ray Pulsars). Sú to neutrónové hviezdy emitujúce silné röntgenové a gama žiarenie počas náhlych vzplanutí. Tieto hviezdy sú zaujímavé najmä svojím nezvyčajne silným magnetickým poľom, ktorého indukcia sa pohybuje v ráde 10^{10} T. Z toho vyplýva aj značné spomaľovanie rotácie a predlžovanie periódy.

Práve z tohto predlžovania periódy rotácie, ktoré vykazuje svetelná krivka magnetaru, je možné zistiť veľkosť jeho magnetického poľa. Metódou stanovenia periódy rotácie a jej spomalenia je takzvaná *folding metóda* [21], ktorá rozdelí svetelnú krivku na časti podľa predpokladanej periódy a spriemeruje hodnoty signálu. Či bola perióda a zmena periódy pri folding metóde odhadnutá správne, určí test χ^2 . Maximum tejto hodnoty χ^2 totiž indikuje najpravdepodobnejšiu hodnotu skúmaných parametrov.

Skúmané boli vlastnosti troch magnetarov. Pre jednotlivé objekty sú vypočítané hodnoty periódy P , zmeny periódy \dot{P} a indukcie magnetického poľa B v porovnaní s hodnotami z katalógu magnetarov [4] nasledovné:

	Namerané hodnoty	Tabuľkové hodnoty
SWIFT 1822.3-1606	$P = (8,437608 \pm 0,000002)\text{s}$ $\dot{P} = (2,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = (4,8 \pm 0,3) \cdot 10^{10}\text{T}$	$P = (8,43771977 \pm 0,00000004)\text{s}$ $\dot{P} = (0,0254 \pm 0,0022) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = 0,46 \cdot 10^{10}\text{T}$
SGR 1806-20	$P = (7,5187235 \pm 0,0000006)\text{s}$ $\dot{P} = (475 \pm 4) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = (60,4 \pm 0,3) \cdot 10^{10}\text{T}$	$P = (7,6022 \pm 0,0007)\text{s}$ $\dot{P} = (75 \pm 4) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = 24 \cdot 10^{10}\text{T}$
SGR 0501+4516	$P = (5,7615455 \pm 0,0000002)\text{s}$ $\dot{P} = (75,00 \pm 0,08) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = (21,18 \pm 0,01) \cdot 10^{10}\text{T}$	$P = (5,76209653 \pm 0,00000003)\text{s}$ $\dot{P} = (0,582 \pm 0,003) \cdot 10^{-11}\text{s/s}$ $B = 1,9 \cdot 10^{10}\text{T}$

Na vzniku malých odchýlok od katalógových hodnôt sa podieľajú viaceré faktory. Prvým z nich je fakt, že pozorovania sú poznačené značným šumom. Ďalej sú hodnoty zmeny periódy také malé, že je ťažké určiť ich s dostatočnou spoľahlivosťou či presnosťou. Napokon analyzované pozorovania sú pravdepodobne iné ako pozorovania, na základe ktorých boli zistené hodnoty uvedené v katalógu. Za ten čas sa magnetické pole magnetarov búrlivo menilo a jeho hodnota kolíše.

Hoci sú magnetary pozoruhodnými objektmi, stále sú pre nás istou záhadou. Ich podrobnejšie skúmanie môže pomôcť hlbšie pochopiť vývoj a štruktúru neutrónových hviezd v záverečnej fáze života. Takisto sú observačné prejavy magnetarov vhodným prostriedkom na štúdium povahy degenerovaného plynu neutrónov a extrémnych magnetických polí.

Literatúra

- [1] Shapiro S. L., Teukolsky S. A.: *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars. The Physics of Compact Objects*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1983. ISBN 0-471-87317-9.
- [2] Nobili L., Turolla R., Zane S.: *X-ray spectra from magnetar candidates - I. Monte Carlo simulations in the non-relativistic regime*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **386** (2008), 1527-1542.
- [3] <http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html>
- [4] <http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>
- [5] <http://astronomyonline.org/Stars/Pulsars.asp?Cate=Stars\&SubCate=OG04\&SubCate2=Pulsars>
- [6] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*, VUTIUM Brno a PROMETHEUS Praha, 2000. ISBN 8-021-41869-9.
- [7] http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/about_swift/xrt_desc.html
- [8] <http://www.swift.ac.uk/index.php>
- [9] Winkler P. F.: *SN 1006: a thousand-year perspective*, Highlights of Astronomy **14** (2007), 301-302.
- [10] <http://www.lib.cas.cz/space.40/2004/047A.HTM>
- [11] Shapiro S. L., Teukolsky S. A.: *Formation of naked singularities: The violation of cosmic censorship*, Physical Review Letters **66** (1991), 994-997.
- [12] <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/sftheory/glossary.htm>
- [13] <http://fykos.cz/rocnik25/serial/jednotky.pdf>
- [14] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/HEASARCGen.html>

- [15] http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/heasarc/software/web_batch/browse_extract_wget.pl
- [16] http://heasarc.nasa.gov/docs/swift/analysis/xrt_swguide_v1_2.pdf
- [17] <http://www.swift.ac.uk/analysis/xrt/files.php>
- [18] <http://www.swift.ac.uk/analysis/xrt/xrtpipeline.php>
- [19] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft/ftools/headas/xrtpipeline.htm>
- [20] <http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/stilts/>
- [21] Marsden D., Rothschild R. E., Lingenfelter R. E.: *Is SGR 1900+14 a Magnetar?*, The Astrophysical Journal **520** (1999), L107-L110.
- [22] Marsden D., Rothschild R. E., Lingenfelter R. E.: *ERRATUM: Is SGR 1900+14 a Magnetar?*, The Astrophysical Journal **523** (1999), L97-L97.
- [23] Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., Flannery B. P.: *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Third Edition*, Cambridge University Press, 2007. ISBN 0-521-88068-8.
- [24] <http://physics.muni.cz/~hroch/amachine.pdf>
- [25] http://www1.lf1.cuni.cz/~ldohna/nejist_ref_mat/medlov.htm
- [26] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=SWIFT+J1822.3-1606&NbIdent=1&Radius=2&Radius.unit=arcmin&submit=submit+id>
- [27] <http://astronomy.activeboard.com/t48525194/swift-j18223-1606/>
- [28] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=PSR+J1808-2024&NbIdent=1&Radius=2&Radius.unit=arcmin&submit=submit+id>
- [29] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_21_mag.php
- [30] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=SGR+0501%2B4516&NbIdent=1&Radius=2&Radius.unit=arcmin&submit=submit+id>
- [31] http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/magnetar_europe.html