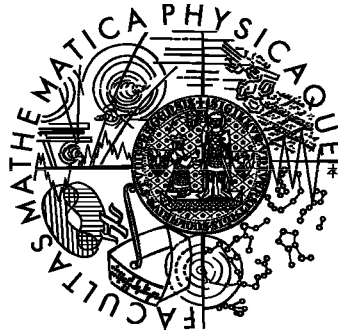


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



Jakub Řípa

**STUDIE GAMA ZÁBLESKŮ DETEKOVANÝCH DRUŽICÍ RHESSI**

Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astronomie a astrofyzika

Praha 2006

Touto cestou bych chtěl poděkovat školiteli této práce Attilovi Mészárosovi za cenné rady a připomínky, ale hlavně za ochotu tuto diplomovou práci vést. Také bych chtěl poděkovat Renému Hudcovi, který původně zadal téma této práce a který ochotně koordinoval spolupráci s ústavem PSI. Na tomto místě nesmím zapomenout ani na Claudii Wiggerovou a na Wojteka Hajdase, kterým chci poděkovat za pomoc s příslušným softwarem a za poskytnutí dat, bez kterých by tato práce nebyla možná.

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

V Praze dne 17. dubna 2006

Jakub Řípa

# Obsah

<b>1</b>	<b>Seznam použitých zkratek</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Objev záblesků gama</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Krátký historický přehled a technický popis družic určených k pozorování GRB</b> .....	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Technický popis družice RHESSI</b> .....	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Fyzikální procesy vzniku záření gama</b> .....	<b>18</b>
6.1	Procesy vedoucí ke vzniku čárového spektra .....	18
6.1.1	Anihilace .....	18
6.1.2	Reakce při zachytu neutronu .....	19
6.1.3	De-excitace jádra atomu srážkou s rychlým protonem nebo jinými částicemi .....	19
6.1.4	Landauovy přechody .....	19
6.2	Procesy vedoucí ke vzniku spojitého spektra .....	19
6.2.1	Anihilace za letu .....	19
6.2.2	Bremsstrahlung .....	20
6.2.3	Inverzní Comptonův rozptyl .....	20
6.2.4	Synchrotronová emise .....	20
6.2.5	Záření absolutně černého tělesa .....	21
<b>7</b>	<b>Veličiny charakterizující GRB</b> .....	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Vlastnosti GRB</b> .....	<b>23</b>
8.1	Časové profily GRB a jejich vlastnosti .....	23
8.2	Spektrální charakteristiky .....	24
8.3	Prostorové rozložení GRB .....	26
<b>9</b>	<b>Existence SGR a TGF</b> .....	<b>27</b>
9.1	SGR .....	27
9.2	TGF .....	28
<b>10</b>	<b>Hledání protějšků na jiných vlnových délkách a dosvitů</b> .....	<b>29</b>
<b>11</b>	<b>Modely vzniku gama záblesků</b> .....	<b>31</b>
11.1	Fireball model .....	31
11.2	The Central Engine .....	32
11.2.1	Splynutí kompaktních objektů .....	32
11.2.2	Model kolapsaru .....	32
<b>12</b>	<b>Morfologie časových profilů</b> .....	<b>33</b>
<b>13</b>	<b>Statistická analýza rozdělení časů <math>T_{90}</math> pro GRB detekované družicí RHESSI</b> .....	<b>36</b>
13.1	$\chi^2$ test .....	37

13.2	Jedno-lognormální fit .....	37
13.3	Dvou-lognormální fit.....	38
13.4	Tří-lognormální fit.....	40
<b>14</b>	<b>Nepřímé pozorování prostorového rozdělení gama záblesků a test <math>V/V_{\max}</math> pro data z RHESSI .....</b>	<b>43</b>
<b>15</b>	<b>Hardness ratio vs. <math>T_{90}</math> .....</b>	<b>47</b>
<b>16</b>	<b>Databáze GRB RHESSI.....</b>	<b>50</b>
<b>17</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>67</b>
<b>18</b>	<b>Seznam referencí .....</b>	<b>68</b>

Název práce: Studie gama záblesků detekovaných družicí RHESSI

Autor: Jakub Řípa

Katedra (ústav): Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc.

e-mail vedoucího: attila.meszáros@mff.cuni.cz

Abstrakt:

Teoretická rešerše této práce se postupně zaměřuje nejdříve na vlastní objev zábleskových zdrojů záření gama, poté na stručný historický průřez různými přístroji zaměřenými na studium GRB. Protože hlavním cílem této diplomové práce je základní analýza a klasifikace zábleskových zdrojů záření gama pozorovaných sluneční družicí RHESSI (která detekovala zatím přes 220 GRB), tak je zde uveden její technický popis. Následuje část o fyzikálních procesech vzniku záření gama. V této práci jsou také zmíněny některé související zdroje záření gama, jako jsou např. SGR. Rešerše je zakončena popisem dosvitů GRB s krátkým popisem některých modelů jejich vzniku. Ve vlastní práci je udělána morfologická klasifikace časových profilů gama záblesků, dále je zde studováno rozdělení jejich dob trvání se zaměřením na určení počtu podskupin pomocí lognormálních fitů a  $\chi^2$  testu. Nepřímé určení rozdělení radiálních vzdáleností zdrojů může být provedeno pomocí závislosti  $\log N$  vs.  $\log P$ . Výsledky této závislosti pro data z RHESSI jsou patřičně diskutovány a porovnány s výsledky z přístroje BATSE (včetně  $V/V_{\max}$  testu). V poslední části je diskutována závislost veličiny hardness ratio na době trvání a jsou zde opět porovnány výsledky z RHESSI a BATSE.

Klíčová slova: gama záblesky, RHESSI, podskupiny GRB, prostorové rozložení GRB, hardness ratio

Title: Study of the Gamma-Ray Bursts Detected by the RHESSI satellite

Author: Jakub Řípa

Department: Astronomical Institute of the Charles University

Supervisor: Doc. RNDr. Attila Mészáros, DrSc.

Supervisor's e-mail address: attila.meszáros@mff.cuni.cz

Abstract:

The beginning of the theoretical section of this diploma thesis is pointed to a discovery of the gamma-ray bursts. Then it is pointed to a brief historical summary of the different instruments dedicated to the GRB's field. Because the main aim of this work is the basic analysis and the classifying of the observed gamma-ray bursts by RHESSI solar satellite (which has observed more than 220 GRBs yet), a technical description of this instrument is introduced. It is followed by a part about gamma-ray production mechanisms. In this work there are also mentioned some related gamma-ray sources e.g. SGRs. The theoretical résumé is concluded by the description of the GRB's afterglows and some preferred models of their origins. In the proper study there was done the morphological classifying of the GRB's temporal profiles. Next there was studied the duration distribution with orientation to determine number of the subclasses using lognormal fits and the  $\chi^2$  test. Distribution of the radial distances of the gamma-ray sources can be examined by the  $\log N$  vs.  $\log P$  dependence. The results are properly discussed and compared with the results of the BATSE instrument (including the  $V/V_{\max}$  test). In the final stage of this work, there is argued the dependence between the hardness ratios and the durations.

Keywords: gamma-ray bursts, RHESSI, subclasses of GRBs, spatial distribution of GRBs, hardness ratio

# 1 Seznam použitých zkratek

AIP	American Institute of Physics
AGN	Active Galactic Nucleus
AV ČR	Akademie Věd České Republiky
BAT	Burst Alert Telescope
BATSE	Burst And Transient Source Experiment
CGRO	Compton Gamma-Ray Observatory
COMPTEL	COMpton TELEscope
EGRET	Energetic Gamma Ray Experiment Telescope
ETH	Die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EURECA	EUropean REtrievable CARrier
FRED	Fast Rise, Exponential Decay
FREGATE	FRench GAMMA-ray TELEscope
FWHM	Full Width at Half Maximum
GBD	Gamma-ray Burst Detector
GCN	Gamma ray bursts Coordinates Network
GRB	Gamma-Ray Burst
GRS	Gamma-Ray Spectrometer
GSFC	Goddard Space Flight Center
HEAO	Hard X-Ray and Low Energy Gamma-Ray Experiment
HETE	High Energy Transient Explorer
HPGSPC	High Pressure Gas Scintillator Proportional Counter
HST	Hubble Space Telescope
HXIS	Hard X-ray Imaging Spectrometer
HXRBS	Hard X-Ray Burst Spectrometer
IBIS	Imager on Board the Integral Satellite
INTEGRAL	INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory
IPN	InterPlanetary Network
ISEE	International Sun-Earth Explorer
ISM	Inter Stellar Matter
JEM-X	Joint European X-ray Monitor
LMC	Large Magellanic Cloud
MT	Morphological Type
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NFI	Narrow Field Instruments
OMC	Optical Monitoring Camera
OSSE	Oriented Scintillation Spectrometer Experiment
OT	Optical Transient
PC	Proportional Counter
PDS	Phoswich Detection System
PSI	Paul Scherrer Institut
PVO	Pioneer Venus Orbiter
RASs	Roll Angle Systems
RHESSI	Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager
RMCs	Rotating Modulation Collimators
S/N	Signal/Noise
SAS	Solar Aspect System
SC	Scintillation speCtrometer
SGR	Soft Gamma-Ray repeater
SMEX	SMall EXplorer
SMM	Solar Maximum Mission
SNR	SuperNova Remnant
SPI	SPectrometer on Integral
SSL	Space Sciences Laboratory at Berkeley
SSW IDL	SolarSoftWare Interactive Data Language
SXC	Soft X-ray Camera
TGF	Terrestrial Gamma Flashes
TGRS	Transient Gamma-Ray Spectrometer
UTC	Universal Time Coordinated
UVOT	Ultraviolet/Optical Telescope
WFC	Wide Field Camera
WXM	Wide field X-ray Monitor
XRT	X-Ray Telescope

## 2 Úvod

Gama záblesky jsou náhlá vzplanutí elektromagnetického záření v gama oboru. Pokud mluvíme o  $\gamma$ -záření, tak máme na mysli elektromagnetické záření s energií asi od 100 keV výše, přičemž hranice mezi rentgenovým a  $\gamma$ -zářením není pevně definovaná. V češtině je pro ně ustálený název zábleskové zdroje záření gama. Často se můžeme setkat se zkratkou GRB pocházející z anglického vžitého názvu Gamma-Ray Burst. Tyto zdroje záření gama jsou natolik intenzivní, že jejich zářivý tok přesvítl na krátký okamžik v daném oboru celou oblohu, a to i takové zdroje jako je například naše Slunce či Galaxie. Mohutnost těchto zdrojů je lépe patrná pokud se podíváme na číslo  $E_{\text{iso}} = 10^{54}$  erg ( $\approx 0,6 M_{\odot} \cdot c^2$ ). Je to energie, která se podle některých modelů při GRB uvolňuje. Zábleskové zdroje záření gama jsou studovány již více než třicet let. K dnešnímu datu o nich bylo publikováno více než 7000 článků (starší seznam bibliografie viz Hurley 2003) a bylo navrženo asi 120 modelů (Nemiroff 1994a) popisujících jejich vznik. V roce 1997 byla poprvé pozorována emise na delších vlnových délkách než je záření gama, doprovázející GRB několik desítek sekund po vlastní  $\gamma$ -emisi. Mluvíme o tzv. dosvitech „afterglow“ na vlnových délkách v oblasti rentgenového, optického, ale i radiového oboru. Díky proměření spektra těchto dosvitů a nalezení spektrálních čar bylo možné určit rudý posuv  $z$ . Některé, dnes již známé hodnoty  $z$ , jsou takové, že mluvíme o vzdálenosti gama záblesků jako o kosmologické. Toto zjištění velice omezilo počet navrhovaných modelů jejich možného vzniku na několik málo dnes preferovaných.

Všechny tyto skutečnosti jsou dále postupně diskutovány v kapitolách 2 až 11, které představují teoretickou rešerši této práce. Postupně se v ní zaměřujeme nejdříve na vlastní objev zábleskových zdrojů záření gama družicemi řady VELA na přelomu šedesátých a sedmdesátých let. Poté následuje kapitola představující historický průřez přístroji zaměřenými na studium tohoto fenoménu. Protože je tato práce zaměřena na zpracování pozorovatelských dat z družice RHESSI, tak nesmí v této práci chybět její detailnější technický popis (kapitola 5). Následuje část o fyzikálních procesech vzniku záření gama. V kapitolách 7 a 8 jsou popsány veličiny běžně používané při popisu GRB a jejich vlastnosti jakými jsou např. vlastnosti jejich časových profilů či prostorové rozložení (na tyto kapitoly je později odkazováno ve vlastní práci počínaje kapitolou 12). Následující oddíly popisují související zdroje záření gama, jako jsou např. SGR. Dále popisují dosvity GRB a jsou zde i krátce popsány některé modely jejich vzniku.

Cílem této diplomové práce je základní analýza a klasifikace zábleskových zdrojů záření gama detekovaných družicí RHESSI. Tato družice, jejíž hlavním cílem je studium rentgenové a gama emise slunečních vzplanutí (solar flares), detekovala zatím přes 220 GRB. Kromě statistického a fyzikálního zpracování pozorovaných vlastností gama záblesků bylo součástí této práce získání potřebných dat při pobytu v ústavě PSI (Paul Scherrer Institut) ve Villigen, Švýcarsko. Potřebná měření i s patřičným softwarem byla poskytnuta na základě vědecké spolupráce s Astronomickým ústavem AV ČR. Na získání potřebných fyzikálních vlastností u každého detekovaného gama záblesku byl použit program SSW IDL a příslušné procedury. Takto získané informace jsou sestaveny v databázi GRB RHESSI v kapitole 16 a jsou základem při dalším zpracování. V kapitole 12 je popsána morfologie časových profilů gama záblesků naměřených pomocí RHESSI. V kapitole 13 je studováno rozdělení dob trvání gama záblesků se zaměřením na určení počtu podskupin záblesků v naší GRB RHESSI databázi. Dále následují kapitoly zaměřené na nepřímé pozorování rozdělení radiálních vzdáleností zdrojů (kapitola 14) a část popisující závislost veličiny vyjadřující „tvrdost“ spektra GRB na době trvání.

Toliko úvodem, nyní se pojd'me seznámit s gama záblesky jako takovými.

### 3 Objev záblesků gama

K objevu došlo víceméně náhodou. V roce 1963 byla Spojenými Státy, Velkou Británií a tehdy Sovětským Svazem podepsána mezinárodní smlouva o zákazu pokusných jaderných výbuchů pod vodou, v atmosféře a ve vesmírném prostoru. Jako doprovodný jev těchto nukleárních výbuchů je silná emise záření gama, a tak vypustily Spojené Státy družice řady VELA, které měly monitorovat, zda Sovětský Svaz tuto smlouvu dodržuje. K velkému překvapení byly detekovány krátké gama záblesky. Po bližší analýze se však ukázalo, že jejich zdroj neleží na Zemi, nýbrž někde daleko ve vesmíru. První takovýto objevený GRB byl zachycen v roce 1967 (Murthy & Wolfendale 1993, str. 43). Poté, co byla data z VELA odtajněna, se gama záblesků chytli astronomové.

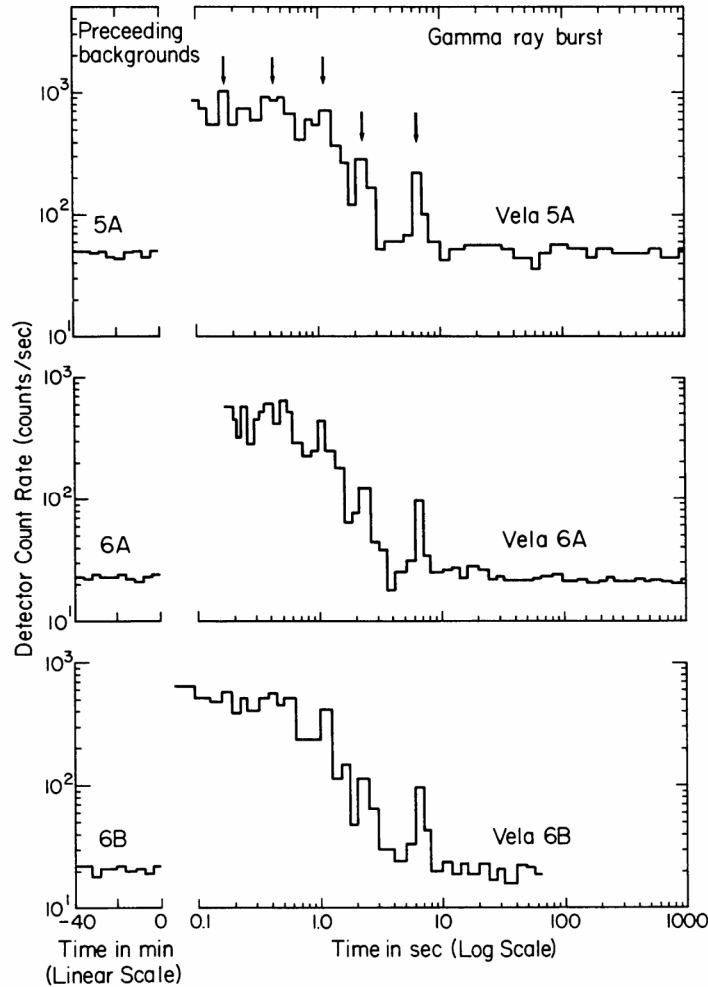
První článek o objevu gama záblesků pochází z roku 1973 od R. W. Klebesadela a jeho spolupracovníků z Los Alamos Scientific Laboratory (Klebesadel *et al.* 1973). Jejich práce popisuje 16 prokázaných GRB detekovaných od července 1969 do července 1972 pomocí čtyř satelitů VELA 5A, 5B, 6A a 6B. Ty byly umístěny na téměř kruhových orbitách o geocentrickém poloměru  $\sim 1,2 \cdot 10^5$  km. Na palubě každé družice bylo šest  $10 \text{ cm}^3$  CsI scintilačních detektorů rozmístěných tak, aby bylo dosaženo izotropní citlivosti. Citlivost těchto detektorů byla v oblasti 0,2 až 1,0 MeV pro družice VELA 5 a 0,3 až 1,5 MeV pro družice VELA 6 a jejich účinnost se pohybovala mezi 17 až 50 %. Samotné scintilátory byly stíněny proti průniku elektronů s energií nepřesahující  $\sim 0,75$  MeV a protonů s energií pod  $\sim 20$  MeV.

Těchto 16 zaznamenaných gama záblesků mělo tyto charakteristiky:

- Doba jejich trvání byla od méně než 1s až po asi 30s.
- Struktura světelných křivek byla velice rozmanitá. Někdy byly jasně patrné oddělené špičky, jindy byla světelná křivka spíše hladká.
- Časově integrovaná hustota zářivého toku, v daném oboru, nabývala hodnot od minimální měřitelné  $\sim 10^{-5} \text{ erg.cm}^{-2}$  do více než  $2 \cdot 10^{-4} \text{ erg.cm}^{-2}$ .
- Okamžitá špičková hustota zářivého toku dosahovala hodnoty  $4 \cdot 10^{-4} \text{ erg.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Příklad naměřené světelné křivky z 22. srpna 1970 je na Obrázku 3.1. Na y-nové ose je vyneseno počet zaznamenaných gama fotonů (counts) za jednotku času. Každý graf je rozdělen na dvě části. V levé je vynesena křivka za delší časový interval, a to před vlastním GRB ukazující úroveň pozadí.

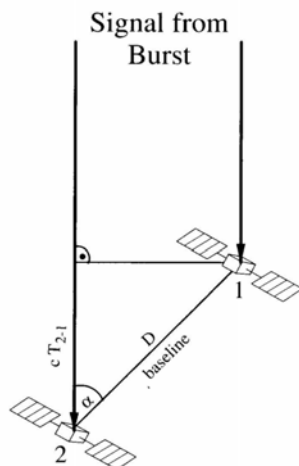




Obrázek 3.1. Světelná křivka gama záblesku (GRB 700822)<sup>1</sup> zachyceného třemi satelity řady VELA. Šipky ukazují struktury, které jsou stejné na všech třech záznamech. Podobné koincidence umožňují pomocí triangulační metody zjistit směr příchodu gama paprsků. Obrázek byl převzat z Klebesadela *et al.* (1973).

Směr, odkud k nám gama záření přichází, je možné určit metodou triangulace, jak je znázorněno na Obrázku 3.2. Tato technika spočívá ve sledování časových rozdílů koincidencí od různých navzájem velmi vzdálených družic. Pro data z družic VELA byl tento časový rozdíl znám s přesností  $\pm 0,05$  s. Tímto se podařilo pro oněch 16 záblesků vyloučit Zemi a Slunce jako jejich zdroj. Nebyla ani pozorována korelace mezi gama záblesky a zvýšenou sluneční aktivitou.

<sup>1</sup> Pro označení gama záblesků se používá tato zkratka GRB rrrmdd, kde rr značí rok, mm měsíc a dd den v měsíci. Např. GRB 700822 je záblesk pozorovaný 22. srpna 1970.



Obrázek 3.2. Triangulační metoda. První družice určené pro výzkum gama záblesků sami o sobě neuměly určit směr, odkud záření přichází. Nicméně, pokud známe rozdíl časů  $T_{2-1}$ , kdy dorazil gama paprsek do dvou různých detektorů družic 1 a 2 ve vzájemné vzdálenosti  $D$  (baseline), tak můžeme vypočítat úhel  $\alpha$  mezi směrem od jedné družice ke zdroji a směrem k druhé družici:

$$\cos \alpha = \frac{T_{2-1} \cdot c}{D}$$

Kde  $c$  je rychlost světla. Toto redukuje možnou polohu zdroje

na prstencovitou oblast s úhlovým poloměrem  $\alpha$ . Šířka tohoto prstence  $\Delta\alpha$  je úměrná přesnosti měření časového rozdílu a nepřímo úměrná  $\sin(\alpha)$ . Pokud máme tři družice, máme tři časové rozdíly, které nám vymezují tři prstence na obloze. Prstence se protínají v jednom bodě, respektive chybovém boxu, se kterým lze ztotožnit polohu zdroje. Obrázek byl převzat z Schönfeldera (2001, str. 369).

## 4 Krátký historický přehled a technický popis družic určených k pozorování GRB

První družice nesoucí na palubě přístroj přímo určený ke studiu GRB byla vypuštěna v roce 1976 a nesla název Helios 2. Ve spolupráci s družicemi VELA a použitím triangulační metody bylo možné určit směr gama paprsků. Nicméně tyto směry nebyly ve shodě s očekávanými kandidáty na zdroje GRB jako např. pulsary, pozůstatky supernov, Galaktické centrum atd.. Během sedmdesátých a osmdesátých let bylo za jediný rok změřeno několik silných GRB, jejichž polohy byly určeny s přesností jedné obloukové minuty. V následujícím stručném přehledu je uvedeno několik dalších družic či přístrojových experimentů (není to seznam úplný, ale jde pouze o výběr) určených ke studiu zábleskových zdrojů záření gama:

### Venera (11 – 14)

- První z této řady sond startovala v září 1978 k planetě Venuše a činnost poslední z nich byla ukončena v březnu 1983.
- Na palubě nesly dva přístroje zaměřené na detekci záření gama: SIGNE a KONUS, více informací je uvedeno dále v textu nebo například v článkách Mazets & Golenetskii (1981a), nebo Mazets *et al.* (1983).

### SIGNE

- Experiment francouzsko-sovětské spolupráce (Barat *et al.* 1981, Boer *et al.* 1986).
- Byl umístěn na družicích Prognos (2 – 9) a Venera (11 – 12) v letech 1972 až 1984.
- Použité detektory byly scintilační, např. na družici Prognos 9 byly dva NaI scintilátory, každý o průřezu  $178 \text{ cm}^2$  a citlivosti v oboru energií od 40 do 8000 keV.

### HEAO-1

- Hard X-Ray and Low Energy Gamma-Ray Experiment (srpen 1977 – leden 1979).
- Na palubě byly umístěny scintilační detektory NaI (Tl)/CsI (Na) s efektivní plochou až  $2100 \text{ cm}^2$ .
- Citlivost byla od 25 keV až do několika MeV.
- Časové rozlišení až 2,5 ms.
- Více informací lze nalézt v článku Knight *et al.* (1981).

### ISEE-3

- The International Sun-Earth Explorer (Klebesadel *et al.* 1981, Teegarden & Cline 1981) byla třetí družicí z řady ISEE. ISEE-1 byla vypuštěna v říjnu 1977 a činnost ISEE-3 nebyla stále ještě ukončena.
- Nejdůležitějším přístrojem na palubě ISEE-3 byl Goddard Gamma-Ray Burst Spectrometer. Byl to první úspěšně použitý vysoce čistý germaniový detektor speciálně určený na měření spekter gama záblesků.
- Více informací je uvedeno dále v textu.

### PVO

- Pioneer Venus Orbiter (viz Evans *et al.* 1981, Klebesadel *et al.* 1981).
- Tato sonda určené pro průzkum planety Venuše byla vypuštěna v květnu 1978 a na palubě nesla mimo jiné i detektor záblesků gama. Její činnost byla definitivně ukončena až v říjnu 1992.
- Spolu s družicí ISEE-3 byla součástí programu na sledování GRB: LASL.
- Každý element detektoru se skládal z válcovitého scintilačního krystalu z jodidu-cesného o průměru 3,8 cm a výšce 3,2 cm. Krystal byl obklopen tenkým plastickým scintilátorem a připojen k fotonásobiči. Tenký plastický scintilátor sloužil k vyloučení signálů způsobených nabitými částicemi. Pokud byl zaznamenán koincidenční signál z plastického a zároveň ze CsI scintilátoru, byl tento signál vyloučen z dalšího zpracování.
- Detektorem byly zaznamenávány gama fotony s energií od 60 keV do 1,2 MeV.

### SMM

- The Solar Maximum Mission Gamma Ray Experiment (Forrest *et al.* 1980).
- Její činnost byla od února 1980 do prosince 1989.
- Družice SMM byla určená pro pozorování slunečních vzplanutí „solar flares“ v rentgenovém a gama oboru. Nicméně tímto přístrojem bylo detekováno i mnoho GRB.
- Jedním z několika instrumentů na palubě byl gama spektrometr, který měl následující vlastnosti.
- Byl tvořen sedmi NaI (Tl) scintilátory s efektivní plochou až 200 cm<sup>2</sup>.
- Citlivost byla v oboru 0,3 – 100 MeV.
- Spektrální rozlišení bylo 7 % FWHM při 0,662 MeV.

### GINGA

- Japonský satelit s detektorem GBD na palubě (Murakami *et al.* 1989).
- Satelit byl vypuštěn na oběžnou dráhu Země v únoru 1987 a svojí činnost ukončil v listopadu 1991.
- Detektor GBD byl složen ze dvou částí SC a PC.
- SC byl scintilační spektrometr z jednoho centimetru tlustého NaI (Tl) krystalu.
- PC byl proporcionalní čítač plněný směsí plynů Xe a CO<sub>2</sub>.
- Detektor měl citlivost v oboru 1,5 – 500 keV.

### GRANAT

- Družice byla vypuštěna v prosinci 1989 na vysokou oběžnou dráhu Země a skončila v listopadu 1998.
- Na palubě nesla několik přístrojů na výzkum vysoko-energetického záření, z nichž některé byly:
  - PHEBUS - Francouzsko-sovětský experiment (Terekhov *et al.* 1994).
  - Gama detektor byl tvořen šesti Bi-Ge scintilačními krystaly.

- Signálová odezva detektoru byla pro gama fotony s energií mezi 0,1 – 100 MeV.
- WATCH - celoblokový X-ray detektor (Castro-Tirado *et al.* (1994).
- SIGMA - rentgenový teleskop s vysokým rozlišením (Paul *et al.* 1990).

#### *Ulysses*

- Kromě studování slunečních vzplanutí byla určena také na pozorování kosmických GRB (Hurley *et al.* 1992).
- Byla vypuštěna v říjnu 1990 a je stále v činnosti.
- Detekční systém sestává ze dvou CsI scintilátorů a dvou Si detektorů o rozsahu citlivosti od 5 do 150 keV.

#### *EURECA*

- Šlo o evropskou družici pro studium rentgenových zdrojů, pracující v období od července 1992 do července 1993 (Brandt *et al.* 1994).
- Její přístroj WATCH zaznamenal devatenáct GRB.

#### *Mars Observer*

- Tato sonda byla primárně určena pro průzkum planety Mars a byla vypuštěna v září 1992 a než byla v srpnu 1993 ztracena, tak se jí pomocí germaniového gama spektrometru podařilo detekovat několik GRB (více viz článek Laros *et al.* 1994).
- Spektrometr pokrýval oblast energií od 0,5 do 2 MeV se spektrálním rozlišením 2,7 keV při 1,33 MeV.

Jedním z mnoha senzorů na palubě družice ISEE-3 byl germaniový detektor s vysokým rozlišením (Teegarden & Cline 1981). Družice odstartovala v srpnu 1978 a byla umístěna v Lagrangeově bodě asi 230 zemských poloměrů směrem ke Slunci. Detektor byl tvořen vysoce čistým krystalem germania o průměru 4,02 cm, tloušťce 2,9 cm a byl stíněn před přímým slunečním světlem. Teplota detektoru byla udržována při 130 K. Spektrometr byl citlivý na gama záření o energiích od 200 keV do 3 MeV a jeho spektrální rozlišení činilo asi 10 keV při 570 keV. Časové rozlišení bylo až 1ms. Energetická spektra byla získávána s časovým rozlišením 8 ms.

Technicky zcela jiný detekční systémem byl použit při experimentech KONUS (Mazets *et al.* 1983) na družicích Venera 13 a 14. Systém byl tvořen šesti scintilačními detektory uspořádanými symetricky tak, že tvořily kartézský systém. Vlastní scintilátor byl z NaI(Tl), měl v průměru 8,0 cm a tloušťku 3,0 cm a po stranách bylo olovo-cínové stínění. Detektor byl citlivý na gama záření o energiích od 30 keV do 2 MeV. Časové rozlišení bylo až 4 ms. Díky závislosti účinnosti každého z šesti detektorů na směru dopadu gama záření bylo možné získat směrovou informaci GRB.

Na konci sedmdesátých let vznikla síť družic a sond tzv. IPN<sup>1</sup> (Interplanetary Network), kterou tvořily: Helios 2, PVO, ISEE 3, Venera 11 a 12 a Prognoz 7. Cílem IPN bylo použitím dat ze zmíněných družic, které byly schopné zachytit GRB, a pomocí triangulační metody zjišťovat přesný směr polohy GRB. Taktó byly získávány směrové informace s přesností menší než jedna oblouková minuta pro několik gama záblesků za rok.

Popis dalších nejnovějších a významných družic určených pro pozorování gama záblesků je následující:

---

<sup>1</sup> V současné době existuje již třetí IPN. Bližší informace lze nalézt na [www.ssl.berkeley.edu/ipn3](http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3)

## *CGRO*<sup>1</sup>

- Compton Gamma-Ray Observatory startovala v dubnu 1991 a svojí činnost skončila v červnu 2000.
- Díky svému velikému úspěchu se stala asi nejcitovanější družicí v gama oboru.
- Na palubě nesla čtyři přístroje zaměřené na detekci záření gama, a to přes velice široký obor energií od 30 keV po 30 GeV (Murthy & Wolfendale 1993, str. 170):
  - BATSE - The Burst and Transient Source Experiment
    - Šlo o celooblohovou soustavu osmi detektorů, každý o efektivní ploše 550 cm<sup>2</sup>.
    - Energetický obor byl 20 keV – 1 MeV se spektrálním rozlišením až 7,2 % FWHM při 660 keV.
    - Pro silné zdroje bylo možné získat informaci o poloze s přesností 1°.
    - Časové rozlišení bylo 100 μs.
    - Za celou svou dobu činnosti zaznamenal přístroj BATSE: 2704 GRB, 185 SGR a mnoho dalších událostí jako byly např. sluneční vzplanutí.
    - Tento detektor má klíčový význam v historii pozorování gama záblesků, protože drtivá většina (až 80 %) všech dodnes detekovaných záblesků byla objevena tímto přístrojem.
  - OSSE - The Oriented Scintillation Spectrometer Experiment
    - Detektor se skládal ze čtyř NaI scintilátorů s energetickým rozsahem 50 keV – 10 MeV.
  - COMPTEL - The Compton Telescope
    - Detektor se skládal z tekutého scintilátoru, pod kterým byl umístěn NaI (Tl) krystal.
    - Energetický rozsah činil 0,8 – 30 MeV.
    - Prostorové rozlišení bylo 8,5 úhlové minuty při zorném poli 1 steradiánu.
  - EGRET - Energetic Gamma Ray Experiment Telescope
    - Energetický rozsah činil 20 MeV až 30 GeV.
    - Prostorové rozlišení bylo 5 až 10 úhlových minut při zorném poli asi 0,6 steradiánu.

## *WIND*<sup>2</sup>

- Tato sonda, jejíž hlavní misí je studium slunečního větru, byla vypuštěna v listopadu 1994 a je stále v činnosti.
- Na palubě nese z hlediska pozorování gama záblesků dva důležité přístroje:
  - TGRS - The Transient Gamma-Ray Spectrometer
    - Citlivost spektrometru je v rozsahu 15 keV – 10 MeV se spektrálním rozlišením 2,0 keV při 1,0 MeV.
    - Detektor je 215 cm<sup>3</sup> vysoce čistého krystalu germania s takovou příměsí, aby byl vytvořen vodivostní typ-n.
    - Rozměry krystalu jsou 6,7 cm v průměru a 6,1 cm na výšku.
    - Radiační chlazení zajišťuje teplotu 85 K.
  - KONUS - Je to ruský experiment skládající se ze dvou všesměrových GRB senzorů každý s plochou 200 cm<sup>2</sup>.
    - Scintilační spektrometr poskytuje měření pokrývající pásmo 10 keV – 10 MeV.
    - Spektrální rozlišení dosahuje 15 keV při 200 keV.
    - Základní časové rozlišení činí 64 ms a pro zvláště silné záblesky až 2 ms.

<sup>1</sup> Více informací lze nalézt na internetové adrese: [f64.nsstc.nasa.gov/](http://f64.nsstc.nasa.gov/)

<sup>2</sup> Více informací lze nalézt na internetové adrese: [www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/wind/](http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/wind/)

### *Beppo-SAX*

- Tato družice pracovala od dubna 1996 do dubna 2002 a na palubě nesla tyto přístroje:
- The Narrow Field Instruments (NFI), High Pressure Gas Scintillator Proportional Counter (HPGSPC), Phoswich Detection System (PDS), Wide Field Camera (WFC), které dohromady pokrývaly široký energetický rozsah 0,1 – 300 keV.
- Jejím obrovským přínosem bylo první pozorování dosvitu GRB, a s tím související určení polohy na obloze v jiných vlnových délkách než je záření gama (více viz kapitola 10).

### *HETE-2<sup>1</sup>*

- Družice High Energy Transient Explorer byla vypuštěna v říjnu 2000 a je stále aktivní.
- Kromě dvou rentgenových přístrojů SXC a WXM, má na palubě gama teleskop FREGATE (French Gamma-ray Telescope) s těmito vlastnostmi:
  - Citlivost v energetickém rozsahu 6 – 400 keV.
  - Přístroj je složen ze čtyř NaI (TI) detektorů s efektivní plochou 120 cm<sup>2</sup>.
  - Zorné pole činí asi 3 steradiány a spektrální rozlišení cca. 9 % FWHM při 662 keV.

### *INTEGRAL*

- Družice The International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory byla v říjnu 2002 a je stále plně funkční.
- Hlavním cílem mise je pořídit podrobnou mapu oblohy v gama oboru s vysokým rozlišením, a přičemž se pomocí ní daří zaznamenávat typicky jeden GRB za měsíc.
- Kromě rentgenového přístroje JEM-X a optické kamery OMC má na palubě dva gama přístroje:
  - SPI - Spektrometr je složen z germaniových detektorů o rozsahu citlivosti 20 keV – 8 MeV a spektrálním rozlišení 2 keV pro 1 MeV.
    - Je u něho použita technika kódované masky.
    - Zorné pole je 16° a prostorové rozlišení 2°.
  - IBIS - Jde o zobrazovací prvek využívající techniku kódované masky v rozsahu energií 15 keV – 10 MeV.
    - Zorné pole je 9° a prostorové rozlišení 12 úhlových minut.

### *Swift*

- Tato autonomní družice byla vypuštěna v listopadu 2004 (v současnosti je stále aktivní) na nízkou oběžnou dráhu Země a je specializovaná na vyhledávání a rychlé určení polohy GRB (Gehrels *et al.* 2004).
- Družice nese na palubě tři instrumenty: rentgenový teleskop (XRT), teleskop pracující v optické a UV oblasti (UVOT) a teleskop v oblasti vysokých energií BAT:
  - BAT - Burst Alert Telescope
    - Je to přístroj využívající techniku kódované masky s detekční plochou 5240 cm<sup>2</sup>, zorném úhlu 1,4 steradiánu a prostorovém rozlišení 1 – 4 úhlové minuty.
    - Rozsah citlivosti je v energiích 15 – 150 keV a dosahuje spektrální citlivosti 7 keV.
    - Počet pozorovaných GRB je asi 100 za rok.
- Pokud přístroj BAT detekuje GRB, tak jsou na jeho změřenou pozici (během 20 – 70 s) automaticky zaměřeny přístroje XRT a UVOT, které začnou pátrat po dosvitu na delších vlnových délkách.

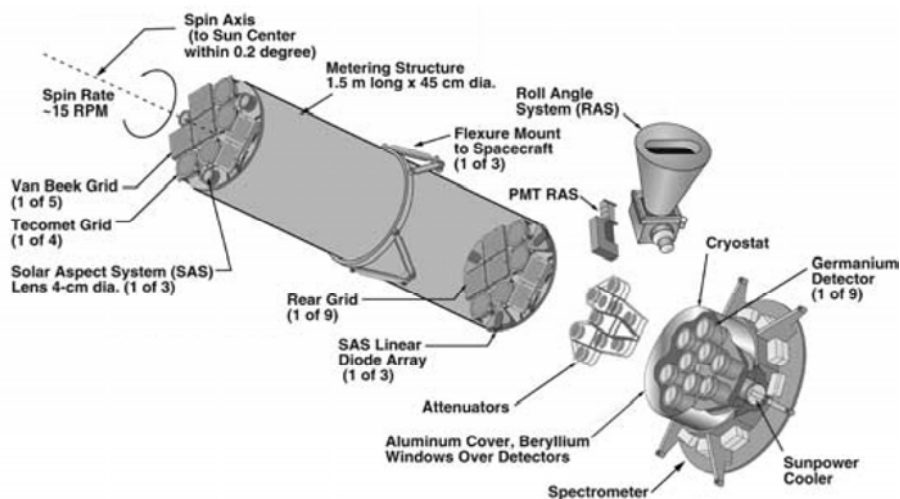
---

<sup>1</sup> Více informací lze nalézt na internetové adrese: [space.mit.edu/HETE/](http://space.mit.edu/HETE/)

## 5 Technický popis družice RHESSI

Protože hlavní náplní této práce je zpracování pozorovatelských dat gama záblesků z družice RHESSI, tak je zde předložen její technický popis. RHESSI je zkratkou The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager a je to v pořadí šestá NASA družice z řady Small Explorers (SMEX), tedy řady malých lehkých družic. RHESSI byla navržena k výzkumu urychlených částic a uvolňování energie při slunečních vzplanutích (solar flares), a to pomocí zobrazování a spektroskopie spojitého rentgenového a gama záření emitovaného energetickými elektrony a čárového gama záření produkovaného energetickými ionty.

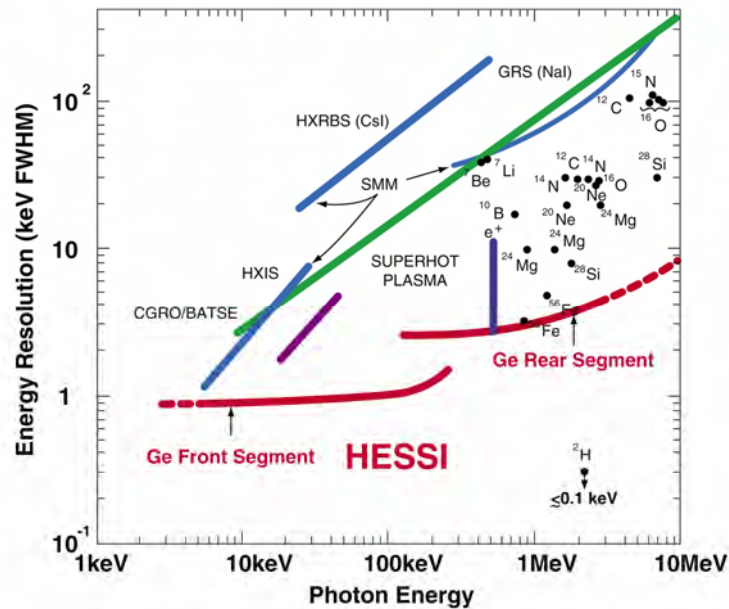
Plán vyvinout tuto družici byl v NASA přijat v říjnu 1997 s velice smělým časovým plánem vypustit ji na oběžnou dráhu už v červenci 2000 (blízko době předpověděného jedenáctiletého periodického slunečního maxima). Po mnoha technických problémech (včetně omylu při vibračním testu v Jet Propulsion Laboratory v březnu 2000, který vedl k téměř jejímu úplnému zničení) a po několika odkladech byla RHESSI nakonec vypuštěna 5. února 2002 na nosné raketě Pegasus XL zavěšené na letadle L-1011 z výšky asi 12 000 m na téměř kruhovou dráhu kolem Země se sklonem  $38^\circ$  a výškou 600 km. Pozorovací program začal o týden později. Po začátku mise byla družice původně označovaná pouze jako HESSI přejmenována na RHESSI na počest význačného astrofyzika vysokých energií Dr Reuvena Ramatyho, pracujícího v Goddardově středisku pro vesmírné lety (GSFC) a podílejícího se na vývoji této družice. Dr Reuven Ramaty se však samotného vypuštění nedožil. Svůj podíl jak na vývoji družice tak na správě a zpracování získaných dat mají podíl kromě již zmíněného GSFC NASA také: SSL Berkeley, ETH Zurich, PSI Villigen a další.



Obrázek 5.1. Schéma družice RHESSI. Tubus obsahuje soustavu devíti párů difrakčních mřížek, za nimiž jsou umístěny tlumící prvky a za nimi spektrometr složený s devíti germaniových detektorů. Převzato z článku Lin *et al.* (2002).

Samotný přístroj je složen z devíti párů zobrazovacích mřížek tvořících RMCs (Rotating Modulation Collimators), za každým z devíti RMC je jeden germaniový detektor (7,1 cm v průměru a 8,5 cm vysoký). V zadní části přístroje je tedy devět germaniových detektorů tvořících spektrometr a chlazených Stirlingovým kryostatem na teplotu přibližně 75 K, která tak zajišťuje spektrometru nevídanou přesnost. Toto uspořádání umožňuje provádět zobrazovací spektroskopii v oboru tvrdého rentgenového záření s vysokým rozlišením, zároveň umožňuje čárovou gama spektroskopii s vysokým rozlišením nad 100 keV.

Prostorové rozlišení je až 2,3 úhlových vteřin se zorným polem asi 1° (úhlový průměr Slunce je asi 0,5°). Spektrální rozlišovací schopnost je 1 – 10 keV FWHM (Full Width at Half Maximum = plná šířka v polovině výšky) v energetickém oboru od 3 keV po 17 MeV (viz Obrázek 5.2). Časové rozlišení činí až 1 μs. Pointační informaci zajišťují dvě zařízení: Solar Aspect System (SAS) a Roll Angle Systems (RASs). Schéma družice s nejdůležitějšími komponenty je na Obrázku 5.1 a technické specifikace jsou uvedeny v Tabulce 5.1.



Obrázek 5.2. Na grafu je znázorněno spektrální rozlišení (FWHM) pro družici RHESSI (červené čáry) zvláště pro přední a zadní segmenty germaniových detektorů tvořících spektrometr. Pro porovnání je zde vynesena rozlišovací schopnost přístroje BATSE (zelená čára) a družice SMM (modré čáry). Dále jsou v grafu vyneseny některé spektrální čáry (černé body), různé šířky pozitronové anihilační čáry závislé na teplotě a hustotě (vertikální modrá čára) a rozlišení potřebné k rozeznání tzv. „steep superhot thermal emission“. Převzato z článku Lin *et al.* (2002).

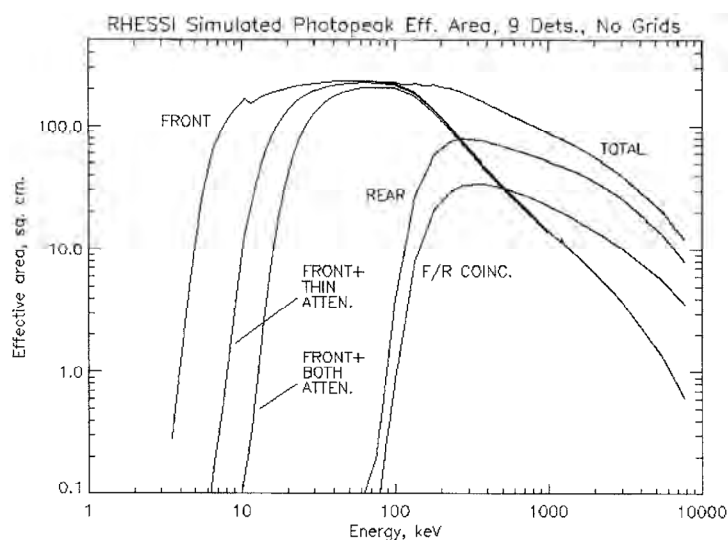
RHESSI characteristics.

Ia. Instrument characteristics:		Ib. Spacecraft characteristics:	
Energy range	3 keV to 17 MeV	Mass	Total 291.1 kg, instrument 130.8 kg
Energy resolution (FWHM)	$\lesssim 1$ keV at 3 keV, increasing to $\sim 5$ keV at 5 MeV	Power	Total 220.4 W, instrument 142.3 W
Angular resolution	2.3 arc sec to 100 keV, 7 arc sec to 400 keV, 36 arc sec to 15 MeV	Size	1.18 m diameter, 2.06 m height, 5.74 m tip-to-tip with solar panels deployed
Temporal resolution	2 s for detailed image, tens of ms for basic image	Telemetry	4 Mbps, downlink, 2 kbps command uplink
Field of view	full Sun ( $\sim 1^\circ$ )	On-board storage	4 Gbyte solid state memory
Effective area (photopeak)	$\sim 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> at 3 keV, $\sim 32$ cm <sup>2</sup> at 10 keV (with attenuators out), $\sim 60$ cm <sup>2</sup> at 100 keV, $\sim 15$ cm <sup>2</sup> at 5 MeV	Attitude	15 rpm spin rate, pointing to 0.2° of Sun center
Detectors	9 germanium detectors (7.1-cm dia. $\times$ 8.5 cm), cooled to $< 75$ K with Stirling-cycle mechanical cooler	Ic. Mission characteristics:	
Imager	9 pairs of grids, with pitches from 34 microns to 2.75 mm, and 1.55-m grid separation	Launch date	5 February 2002
Aspect system	Solar Aspect System: Sun center to $< 1$ arc sec Roll Angle System: roll to $\sim 1$ arc min	Launch vehicle	Pegasus XL
Number of flares expected	$\sim 1000$ imaged to $> 100$ keV $\sim$ tens with spectroscopy to $\sim 10$ MeV	Orbit	38° inclination, 600 km altitude apogee, 586 km perigee
		Nominal mission lifetime	2 years, 3rd year highly desirable

Tabulka 5.1. Technické specifikace družice RHESSI. Převzato z článku Lin *et al.* (2002).



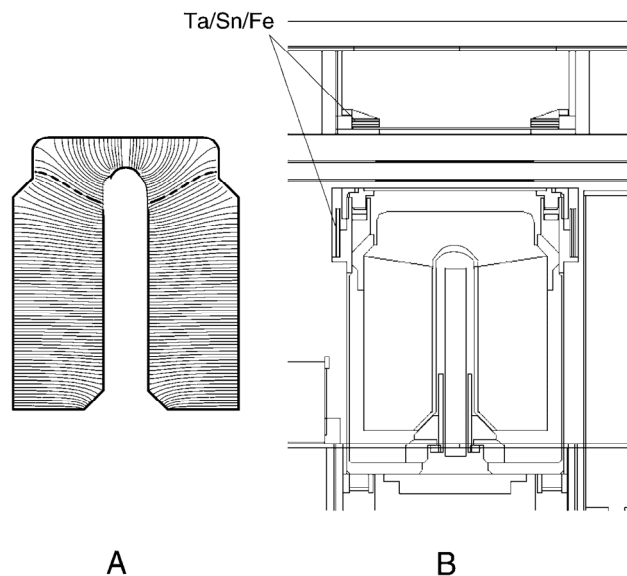
Ačkoliv byla tato družice původně určena pro studium sluneční fyziky, je RHESSI díky malé tloušťce stínění spektrometru (z důvodů minimalizace hmotnosti je stěna kryostatu mezi germaniovým detektorem a vnějším vesmírným prostředím tvořena jen 4 mm tlustým hliníkem) dobře využitelná pro spektrometrii s vysokým rozlišením, celooblohovým zorným polem (s efektivní plochou až  $150 \text{ cm}^2$  viz Obrázek 5.3) v rentgenové a gama oblasti nesluneční astrofyziky (Smith *et al.* 2000, 2002a). Takto mohou být studovány  $\gamma$ -fotony ze zdrojů jako jsou pozůstatky výbuchu supernov, pulzary, GRB a gama emise ze zemské atmosféry (Share *et al.* 2002). Tyto nesluneční gama fotony jsou především detekovány zadními segmenty germaniových detektorů (viz Obrázek 5.4), a tak mohou být odlišeny od slunečních fotonů dopadajících na přední segmenty.



Obrázek 5.3. Efektivní plocha spektrometru (sečteno přes všech devět detektorů) pro fotony přicházející podél osy přístroje pro přední (FRONT) a zadní (REAR) segmenty jako funkce energie. Dále je zde zobrazena závislost pro různé tloušťky tlumících prvků (Attenuators). Převzato z článku Smith *et al.* (2002b).

Jak již bylo řečeno výše, spektrometr je složen z devíti segmentových sousých detektorů z ultra-čistého germania s nepatrnou příměsí, tak aby se vytvořil vodivostní typ-n. Uvnitř ultra-čistého germania při velmi nízkých teplotách ( $\sim 75 \text{ K}$ ) nejsou žádné páry elektron-díra ve vodivostním pásu. Pokud však dojde k interakci rentgenového nebo  $\gamma$ -fotonu s materiálem v tomto krystalu, dojde k uvolnění jednoho nebo více rychlých elektronů, které následně ztrácejí energii kreací volných párů elektron-díra. Pokud vytvoříme v krystalu silné elektrické pole (řádu  $1000 \text{ V.cm}^{-2}$ ), tak budou elektrony a díry přitahovány k opačným elektrodám, a tak vytvoří proudový impuls (přičemž jeho celkový náboj je úměrný energii zachyceného fotonu), který může být posléze zesílen a digitalizován vhodnou elektronikou. Na Obrázku 5.4 je znázorněn průřez takovýmto jedním germaniovým detektorem. Energie a čas příchodu každého fotonu je nahrána do palubní paměti s kapacitou 4 Gbyte a automaticky odesílána do pozemního střediska během 48 hodin.

Na konec je třeba zmínit, že RHESSI nebyla konstruována jako přístroj s nízkou úrovní šumu pozadí. Nějaké masivní stínění nebylo na družici typu Small Explorer možné z důvodu omezení hmotnosti. Vypuštění na rovníkovou dráhu, což by mohlo vést ke snížení úrovně pozadí každé komponenty přístroje, a což by dovolovalo vyhnout se jihoatlantické anomálii (South Atlantic Anomaly), však také nebylo možné.



Obrázek 5.4. Řez jedním z devíti detektorů tvořícím RHESSI spektrometr. (A) Profil detektoru se znázorněnými siločarami elektrického pole. Tlustá přerušovaná čára značí hranici mezi dvěma segmenty. (B) Schéma detektoru uvnitř kryostatu s vyznačeným Ta/Sn/Fe stíněním. Převzato z článku Smith *et al.* (2002b).

## 6 Fyzikální procesy vzniku záření gama

Dříve než přistoupíme k podrobnějšímu popisu, ať už fyzikálních vlastností záření produkovaného při gama záblesku, či popisem astronomických modelů, které se snaží tento fenomén popsat, pojďme si nejdříve popsat základní fyzikální procesy vzniku záření gama. Tato kapitola vychází z Murthyho & Wolfendaleho (1993, str. 1) a podobný přehled lze také nalézt viz Schönfelder (2001, str. 12). Mechanismy vzniku gama záření lze rozdělit do dvou skupin, a to podle toho zda je jejich výsledkem záření čárové nebo spojitě.

### 6.1 Procesy vedoucí ke vzniku čárového spektra

#### 6.1.1 Anihilace

Nejznámější čarou v našem energetickém oboru je čára 511 keV pocházející z klidové kolize elektronu a pozitronu:



Je však třeba zdůraznit, že tato čára nebyla ve spektrech gama záblesků prokázána. Anihilace částic může samozřejmě také probíhat při jejich nenulových rychlostech (anihilace za letu). Výsledkem takového procesu už ovšem není čárové spektrum, ale spojitě. Více viz kapitola 6.2.

### 6.1.2 Reakce při záchytu neutronu

Gama fotony o energii 2,22 MeV mohou být produkovány při reakci tepelných neutronů a jiných atomů např. při reakci:



Tento mechanismus se uplatňuje především v oblastech s relativně vysokou hustotou jak je např. při slunečních vzplanutích a u akrečních disků, ale ne v mezihvězdné hmotě (ISM).

### 6.1.3 De-excitace jádra atomu srážkou s rychlým protonem nebo jinými částicemi

Samotná jádra se mohla dostat do excitovaného stavu např. při radioaktivním rozpadu. Příklady čar vzniklých po interakci protonu a daným atomovým jádrem jsou např.: 6,129 MeV pro  ${}^{16}\text{O}$ , 4,438 MeV pro  ${}^{12}\text{C}$ , 2,313 a 3,34 MeV pro  ${}^{14}\text{N}$ .

### 6.1.4 Landauovy přechody

V místech, kde jsou silná magnetická pole, mohou být produkovány cyklotronové emisní čáry při přechodech mezi Landauovými hladinami. Přechod z první takové hladiny má za následek emisi gama fotonu s energií:

$$E_\gamma (\text{keV}) = \frac{heB}{m_e c} = 11,6 B_{12}, \quad (6.3)$$

kde  $B_{12}$  je velikost magnetické indukce v jednotkách  $10^{12}$  G,  $h$  je Planckova konstanta,  $e$  je náboj elektronu,  $m_e$  je hmotnost elektronu a  $c$  je rychlost světla. Čáry mohou být pozorovány jak absorpční tak emisní v závislosti na teplotě okolní hmoty. Cyklotronové čáry byly pozorovány např. u objektů Her X-1 a u rentgenového binárního objektu 4U 0115 + 63, ale stejně tak i u mnoha GRB. Více viz Murthy & Wolfendale (1993, str. 68). Tyto čáry jsou nejčastěji pozorovány v intervalu energií 20 – 50 keV, což s ohledem na rovnici (6.3) ukazuje na sílu magnetického pole  $(2 - 5) \cdot 10^{12}$  G blízko zdroje.

## 6.2 Procesy vedoucí ke vzniku spojitého spektra

### 6.2.1 Anihilace za letu

Účinný průřez anihilace elektronu s pozitronem při relativistických rychlostech je:

$$\sigma_A = \frac{\pi r_e^2}{\Gamma} [\ln(2\Gamma) - 1], \quad (6.4)$$

kde  $\Gamma (= E_e/m_e c^2)$  je Lorenzův faktor pozitronu a  $r_e$  je Comptonův poloměr ( $= 2,82 \cdot 10^{-15}$  m).

### 6.2.2 Bremsstrahlung

Bremsstrahlung je brzdné záření vysílané nabitou částicí (elektronem) v elektrickém poli atomového jádra. Diferenciální účinný průřez pro elektron s energií  $E_e$ , který vysílá brzděním elektromagnetické záření s energií mezi  $E_\gamma$  a  $E_\gamma + dE_\gamma$  v elektrostatickém poli jádra s nábojem  $Z$  je:

$$\sigma(E_e, E_\gamma) dE_\gamma = 4\alpha Z^2 r_e^2 \frac{dE_\gamma}{E_\gamma} F(E_e, \nu), \quad (6.5)$$

kde

$$F(E_e, \nu) = \left[ 1 + (1-\nu)^2 - \frac{2}{3}(1-\nu) \right] \left[ \ln \left( \frac{2E_e}{m_e c^2} \frac{1-\nu}{\nu} \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (6.6)$$

pro případ plně ionizovaného jádra a  $E_e \ll 100m_e c^2 [\nu/(1-\nu)] Z^{-1/3}$  ;  
respektive

$$F(E_e, \nu) = \left[ 1 + (1-\nu)^2 - \frac{2}{3}(1-\nu) \right] \ln \left( 183 Z^{-1/3} \right) + \frac{1}{9}(1-\nu) \quad (6.7)$$

pro případ neionizovaného atomu a  $E_e \gg 100m_e c^2 [\nu/(1-\nu)] Z^{-1/3}$ . V rovnicích je  $\alpha$  konstanta jemné struktury a  $\nu = E_\gamma/E_e$ . Brzdné fotony mají spektrální tvar  $\sim 1/E_\gamma$ , a tak je emitováno více fotonů s nižší energií.

### 6.2.3 Inverzní Comptonův rozptyl

Mějme relativistický elektron s Lorentzovým faktorem  $\Gamma$  v laboratorní soustavě. Mějme v této soustavě foton s energií  $\varepsilon$ . V klidové soustavě elektronu bychom pozorovali energii fotonu rovnou  $\Gamma\varepsilon$ . V této klidové soustavě elektronu bude mít foton po Comptonově rozptylu energii  $\leq \Gamma\varepsilon$  a po transformaci zpět do laboratorní soustavy  $\sim \Gamma^2\varepsilon$ . Energie fotonu po inverzním Comptonově rozptylu je:

$$E_\gamma \approx \varepsilon \Gamma^2 \quad \text{pro } \varepsilon \Gamma \ll m_e c^2 \quad (6.8)$$

a

$$E_\gamma \sim E_e \quad \text{pro } \varepsilon \Gamma \gg m_e c^2. \quad (6.9)$$

Tento proces je významný, pokud je velká hustota fotonů v okolním prostředí. Je to také velice účinný způsob jak dodat fotonům velmi vysoké energie. Uveďme příklad. Aby se foton o energii  $\varepsilon = 1 \text{ eV}$  „rozkmítal“ na energii  $E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ , je zapotřebí relativistický elektron s energií  $E_e = 4,4 \cdot 10^8 \text{ eV}$ .

### 6.2.4 Synchrotronová emise

Pokud elektron nebo positron prochází magnetickým polem, tak dochází k synchrotronové emisi. Elektron s energií  $E_e$ , v homogenním magnetickém poli o intenzitě  $H$ , pohybující se pod úhlem  $\theta$  k vektoru magnetické intenzity, bude vyzařovat synchrotronové záření ve směru pohybu s intenzitou (hustotou zářivého toku na jednotku frekvence):

$$I_\nu = \frac{\sqrt{3}e^3}{m_e c^2} N_e(K) H \sin \theta \frac{\nu}{\nu_c} \int_{\frac{\nu}{\nu_c}}^{\infty} K_{5/3}(\eta) d\eta, \quad (6.10)$$

kde  $e$  je náboj elektronu,  $N_e(K)$  je počet elektronů na jednotku prostorového úhlu ve směru jejich vektorů rychlostí,  $K_{5/3}$  je modifikovaná Besselova funkce druhého řádu,  $\nu$  je frekvence emitovaných fotonů a  $\nu_c$  je:

$$\nu_c = \frac{3eH \sin \theta}{4\pi m_e c} \left( \frac{E_e}{m_e c^2} \right)^2. \quad (6.11)$$

Maximum emise bude poblíž frekvence:

$$\nu_m = 1,2 \cdot 10^6 H \sin \theta \left( \frac{E_e}{m_e c^2} \right)^2. \quad (6.12)$$

Pro příklad uveďme: k emisi synchrotronového fotonu s energií  $E_\gamma = 1$  MeV je potřeba magnetické pole o indukčnosti  $B = 10^4$  G a ve kterém se pohybuje elektron s energií  $E_e = 7,2 \cdot 10^{10}$  eV.

### 6.2.5 Záření absolutně černého tělesa

Záření absolutně černého tělesa je záření emitované tělesem o veliké optické tloušťce, které je v termodynamické rovnováze o teplotě  $T$ . Spektrum tohoto záření je spojitě a popsané známým Planckovým zákonem:

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[ \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \right]. \quad (6.13)$$

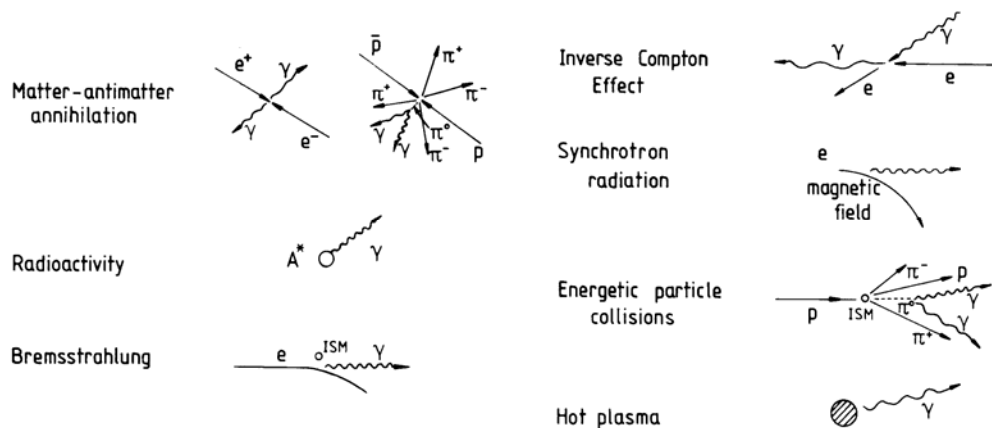
Wienův zákon nám říká, jakou energii mají fotony odpovídající maximu vyzařované intenzity:

$$E_w (\text{MeV}) = 4,3 \cdot 10^{-10} T (K). \quad (6.14)$$

Střední energie fotonů bude:

$$\langle E \rangle (\text{MeV}) = 2,3 \cdot 10^{-10} T (K). \quad (6.15)$$

Tuto část uzavřeme opět příkladem. Aby byly při maximu intenzity vyzařovány fotony s energií 1 MeV, byla by zapotřebí teplota asi  $2,3 \cdot 10^{10}$  K.



Obrázek 6.1. Shrnutí různých fyzikálních procesů vzniku gama záření. Převzato z knihy Murthy & Wolfendale (1993), str. 2.

## 7 Veličiny charakterizující GRB

Pro lepší pochopení dalšího textu je nezbytné definovat si základní veličiny obecně používané při popisu gama záblesků.

- **Fluence –  $F$**

Je to veličina charakterizující celkový počet registrovaných fotonů („counts“) v daném časovém intervalu (nejčastěji  $T_{90}$ ) na daném energetickém intervalu (kanálu). Jednotkou je  $1.\text{cm}^{-2}$ . Někdy se zavádí „fluence“  $F$  jako celková detekovaná energie gama záblesku (pro určitý energetický kanál). Potom je jednotkou  $\text{erg}.\text{cm}^{-2}$ .

- **Peak flux –  $P$**

Peak flux je maximální hustota zářivého toku naměřená v průběhu gama záblesku. Její jednotkou je  $1.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (pak mluvíme o „peak count“) nebo  $\text{erg}.\text{cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ .

- **Duration –  $T_{90}$ ,  $T_{50}$**

Určit dobu trvání gama záblesku není vždy jednoduché, zvláště pro slabý záblesk s velkou úrovní pozadí. Prekursory, pulzy po hlavní emisi nebo dlouhá, slabá a pozvolná emise to vše může nepříznivě ovlivnit naši snahu určit přesně dobu trvání záblesku. Různé přístroje s různou citlivostí tak mohou naměřit různou dobu trvání pro stejnou událost (Schönfelder 2001, str. 374). Proto se s výhodou používá veličina  $T_{90}$ , resp.  $T_{50}$  charakterizující dobu trvání daného GRB, a která má tu vlastnost, že není v prvním přiblížení závislá na intenzitě gama záblesku.

$T_{90}$  je časový interval potřebný pro nasčítání 90 % celkového počtu registrovaných gama fotonů  $F$ , a to tak, že se sčítá od 5 %  $F$  do 95 %  $F$  (Kouveliotou *et al.* 1993a). Pokud je  $F$  bráno jako celková detekovaná energie gama záblesku, potom je  $T_{90}$  přirozeně časový interval potřebný k integraci 90 % celkové přijaté energie. V některých publikacích je možné se setkat s veličinou  $T_{50}$ , která je definována podobně s tím, že se nasčítává 50 % fluence  $F$  a to od 25 % do 75 %.

- **Hardness ratio –  $H$**

Rozložení energie ve spektru GRB se poměřuje tvrdostí  $H$ . Je to podíl různých  $F$  pro různé energetické kanály a lze si jej představit jako analogii barevného indexu např.  $B - V$  v optickém oboru.

## 8 Vlastnosti GRB

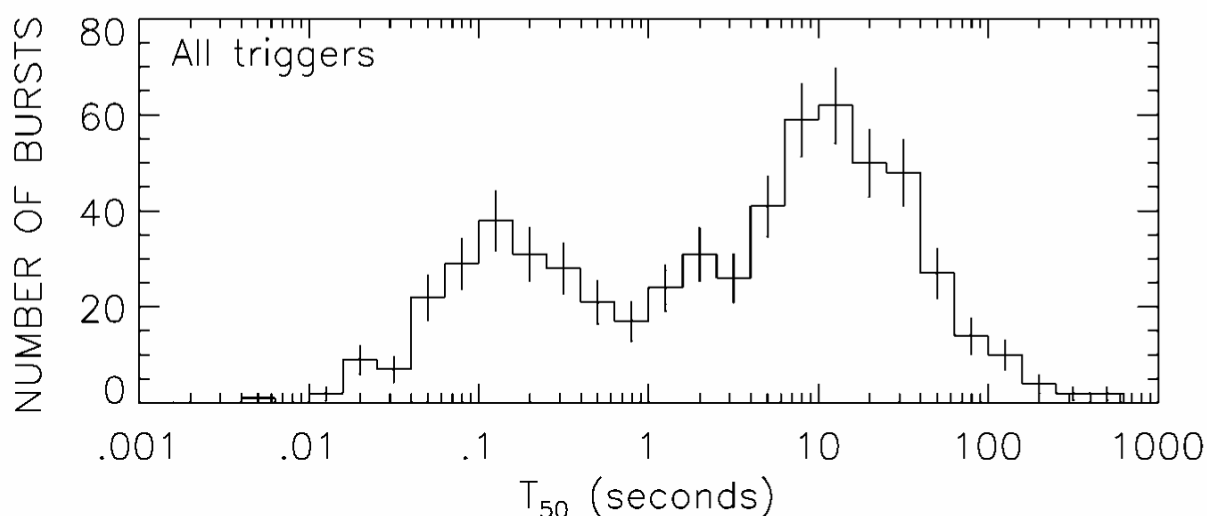
V této kapitole si přiblížíme vlastnosti gama záblesků, ať už jde o jejich časové profily, spektrální vlastnosti a nebo prostorové rozdělení. Podobný přehled je možné nalézt např. v článcích Fishman (1995a), Fishman & Meegan (1995b), Piran (2004), nebo v knihách Murthy & Wolfendale (1993, str. 43) a Schönfelder (2001, str. 373). Český psané přehledy o GRB lze nalézt např. ve článkách Hudec (1998) a nebo Štoček & Mészáros A. (2002).

### 8.1 Časové profily GRB a jejich vlastnosti

Jedním z největších problémů gama záblesků je velká rozmanitost jejich časových profilů (světelných křivek). Záblesky vykazují struktury na časových škálách od řádově milisekund až po 1000 s dlouhé události. Lze říci, že každý záblesk má jedinečný časový profil. Nicméně podle Fishmana & Meegana (1995b) je možné morfologii světelných křivek rozdělit do čtyř základních podskupin:

1. záblesk s jednou špičkou či úzkým hrotem
2. záblesky hladké s jednou nebo více dobře patrnými špičkami
3. záblesky, u kterých je od sebe velmi dobře odděleno vícero emisí
4. záblesky nepravidelné, chaotické a s velkým množstvím úzkých hrotů

Tento problém je detailněji probrán v kapitole 12, kde je provedena morfologie gama záblesků detekovaných družicí RHESSI. Pokud uděláme histogram dob trvání gama záblesků, zjistíme, že lze snadno identifikovat dvě podskupiny: krátké a dlouhé záblesky (Kouveliotou *et al.* 1993a, Balázs *et al.* 2003). Toto rozdělení je dobře patrné na Obrázku 8.1.



Obrázek 8.1. Rozdělení dob trvání gama záblesků z BATSE katalogu 4Br (Paciesas *et al.* 1999). Z grafu je na první pohled vidět, že se týká dob trvání, tak očividně existují dvě podskupiny gama záblesků. Krátké s dobou trvání okolo 0,1s a dlouhé okolo 10s.

Některé studie (Horváth 1998, Mukherjee *et al.* 1998, Balastegui *et al.* 2001, Horváth 2002b, Horváth *et al.* 2004, Horváth 2005, Horváth *et al.* 2006) ukazují na možnou existenci třetí podskupiny – prostředních gama záblesků. Podobná analýza je diskutována i v této diplomové práci pro data z družice RHESSI v kapitole 13. Některé práce zavádí třetí podskupinu na základě mnoha parametrické analýzy např. Mukherjee *et al.* (1998), podle které je možné zavést tři podskupiny gama záblesků s těmito vlastnostmi:

1. podskupina – dlouhá doba trvání – fluence jasný – spektrum měkké
2. podskupina – krátká doba trvání – fluence slabý – spektrum tvrdé
3. podskupina – střední doba trvání – fluence střední – spektrum měkké

## 8.2 Spektrální charakteristiky

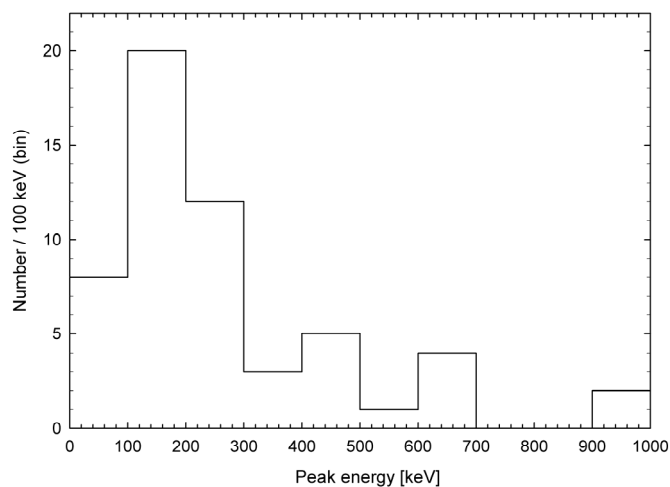
V astronomii obecně se mnoho informací získává ze spekter. Samotná spektra, jakož i jemné struktury jako například emisní či absorpční čáry velmi často prozradí produkční procesy daného záření. V tomto ohledu jsou spektra GRB neuspokojivá. Ve spektrech gama záblesků nejsou viditelné žádné charakteristické energie. Měřená spektra jsou jednoduchá a mohou být popsána funkcí pouze se čtyřmi nezávislými parametry; takzvanou Band funkcí (Band 1996):

$$N(E) = \begin{cases} AE^\alpha e^{-\frac{E}{E_0}} & E \leq E_b \\ A'E^\beta & E \geq E_b \end{cases} \quad \text{pro} \quad (8.2)$$

$$E_b = (\alpha - \beta) E_0$$

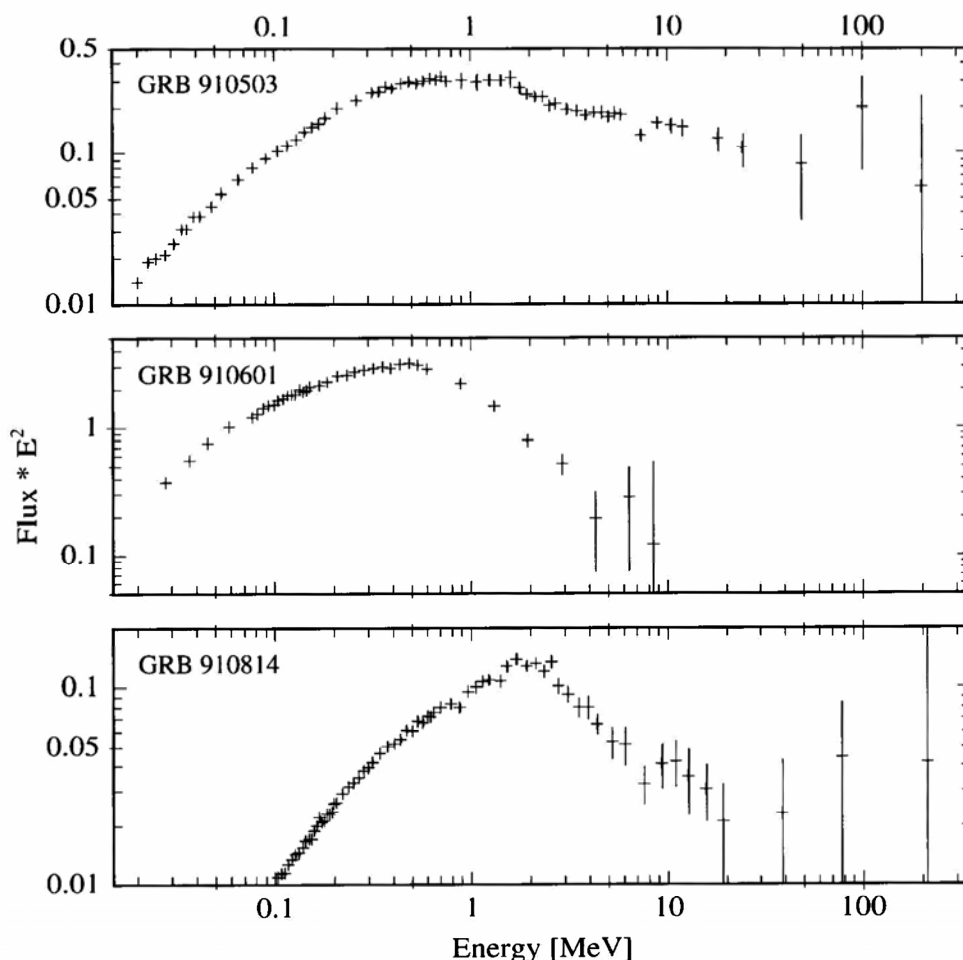
$A'$  je takové že  $N(E)$  je spojitě .

Toto spektrum má pro vysoké energie mocninný průběh (power-law spectrum). Typické hodnoty parametrů jsou:  $\alpha = -1$ ,  $\beta = -2$  a charakteristická energie  $E_0 = 150$  keV.  $E_b$  je tzv. „break energy“, kde se mění charakter spektra. Často se spektrum vynáší jako závislost  $\nu F_\nu (= N(E)E^2)$  na energii  $E$ . Tento průběh spektra vrcholí okolo  $E_p$  „peak energy“ od 0,1 MeV do 1 MeV. Rozdělení  $E_p$  pro 54 gama záblesků je zobrazeno na Obrázku 8.2. Příklady spekter tří gama záblesků jsou na Obrázku 8.3.



Obrázek 8.2. Rozdělení  $E_p$  pro  $N(E)E^2$  energetická spektra pro 54 GRB. Většina gama záblesků má vrchol spektra okolo 150 keV, kde je vyzařována většina energie (Band 1996).





Obrázek 8.3. Flux. $E^2$  spektra v jednotkách  $(\text{fotony} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1}) \cdot (\text{keV}/100)^2$  gama záblesků GRB 910503, GRB 910601 a GRB 910814. Data pocházejí z CGRO z přístrojů COMPTEL a EGRET. Spektra byla neobyčejně tvrdá s  $E_p$  mezi 500 keV a 2 MeV.

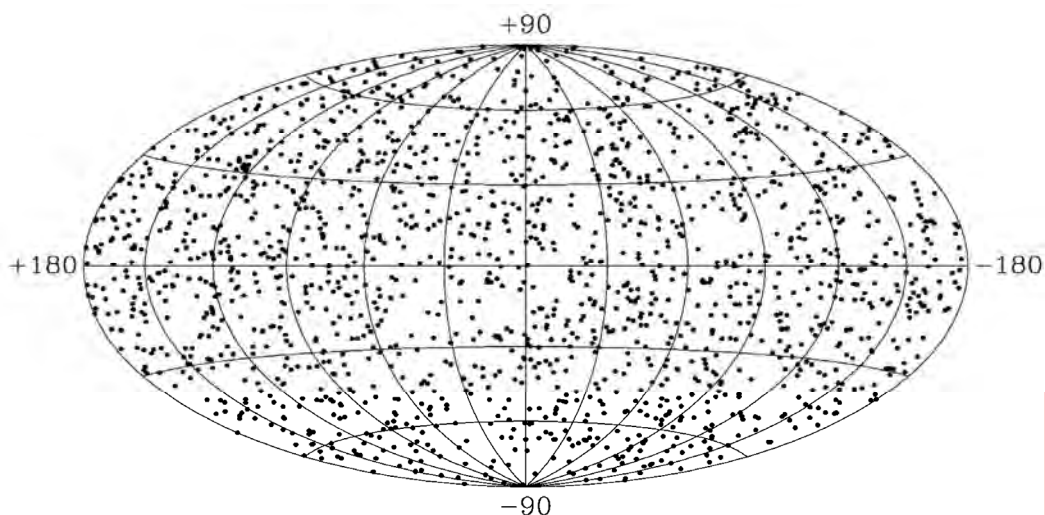
Značný výzkum byl zaměřen na hledání čar ve spektrech. Pouze v datech z experimentu KONUS, satelitu Ginga a v jednom případě na přístroji HXRBS na družici SMM byly nalezeny spektrální čáry (Murthy & Wolfendale 1993, str. 68). Tyto čáry byly vyhodnoceny jako cyklotronové absorpční čáry elektronů pohybujících se v silném magnetickém poli neutronové hvězdy. Nicméně objevily se názory, že čáry by mohly být ve skutečnosti artefakty způsobené superpozicí spekter s různým tvarem ve dvou blízkých energetických intervalech. Ve spektrech měřených pomocí CGRO BATSE nebyly nalezeny žádné signifikantně významné čáry.

Bylo pozorováno, že spektra se mohou v průběhu záblesku měnit, a to na velmi krátkých časových škálách. Takovým případem je např. GRB 930131, který vykazoval spektrální variace na škále 2 ms. Tento záblesk je také typickým příkladem časové spektrální evoluce. Spektra většiny (ne však všech) gama záblesků se vyvíjejí od tvrdšího po měkčí, a to od začátku po konec záblesku.

### 8.3 Prostorové rozložení GRB

Už různá měření před nástupem přístroje BATSE naznačovala izotropní a nehomogenní rozdělení<sup>1</sup> GRB v prostoru.

*Izotropie* je testována porovnáváním změřených statistických veličin, jako je např. dipólový moment  $\langle \cos \theta \rangle$ , s předpokládanými hodnotami plynoucími z hypotézy izotropního rozdělení. Dipólový moment je citlivý na koncentraci záblesků v jednom směru (např. směrem ke Galaktickému středu či ke Sluci), zatímco pomocí kvadrupólového momentu se testuje koncentrace směrem k pólům. Z prvních 1005 gama záblesků z BATSE se Galaktický dipólový moment lišil od předpovězené hodnoty dané izotropním rozdělením o  $0,9 \sigma$  a kvadrupólový moment  $\langle \sin^2 b - \frac{1}{3} \rangle$  o  $0,3 \sigma$ . Ani metody nezávislé na souřadném systému neodhalily žádný signifikantní dipólový nebo kvadrupólový moment. Z těchto výsledků založených na přísných statistických základech plyne, že rozdělení  $\gamma$ -záblesků je mnohem více izotropní než jakákoliv jiná populace astronomických objektů. Příklad pozorovaného prostorového rozdělení  $\gamma$ -záblesků je zobrazeno na Obrázku 8.4. Podrobnou diskuzi nad prostorovým úhlovým rozdělením gama záblesků lze najít v článkách Balázs *et al.* (1998), Mészáros A. & Štoček (2003), Litvin *et al.* (2001), Balázs *et al.* (1999), Mészáros A. *et al.* (2000a), Mészáros A. *et al.* (2000b), Mészáros A. *et al.* (2000c), Horváth *et al.* (2001), Mészáros A. *et al.* (2001), Vavrek *et al.* (2001), Vavrek *et al.* (2004).

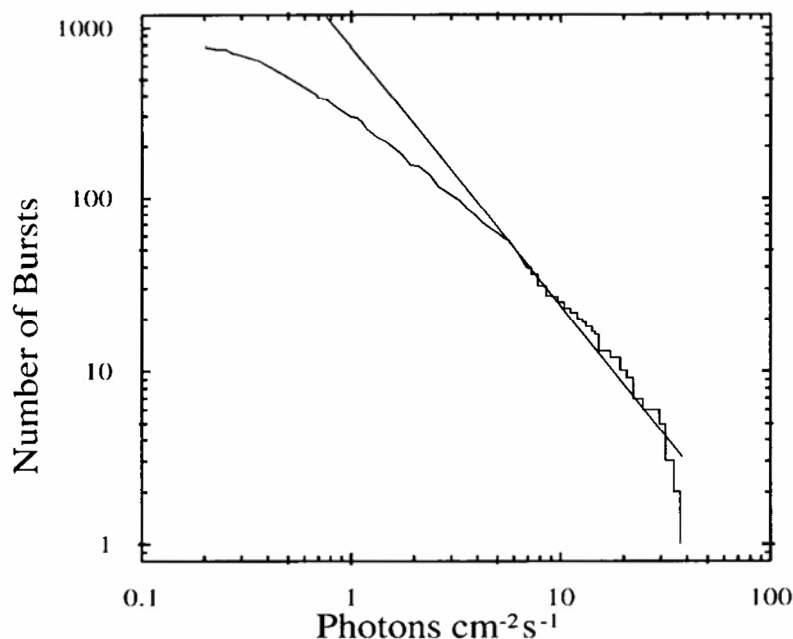


Obrázek 8.4. Prostorové rozdělení 1637 GRB ze čtvrtého revidovaného BATSE katalogu (Paciesas *et al.* 1999) v Aitoffově-Hammerově projekci v galaktických souřadnicích. Není zde použita korekce na nestejnou pokrytí oblohy.

*Homogenita* je prověřována porovnáním naměřených dat s tzv. třípolovinovým zákonem. Obrázek 8.5 ukazuje počet záblesků se špičkovou hodnotou hustoty zářivého toku větším než hustota toku  $P$  jako funkci  $P$  pro 772 záblesků. Pokud jsou zdroje gama záblesků rozmístěny homogenně v Euklidovském prostoru, potom jejich počet ve sféře se středem v místě pozorovatele je úměrný třetí mocnině poloměru. Hustota zářivého toku ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Kombinací těchto dvou závislostí dostaneme pro kumulativní počet záblesků mocninou závislost:  $N(P > P_i) \sim P_i^{-3/2}$ , která je na Obrázku 8.5 znázorněna přímkou. V této úvaze jsme předpokládali, že každý zdroj gama záblesku má stejnou intenzitu

<sup>1</sup> Izotropní znamená, že rozložení záblesků je po obloze stejné ve všech směrech, zatímco homogenní znamená stejnou prostorovou hustotu ve všech radiálních vzdálenostech od pozorovatele.

(tzv. model standardní svíčky), a že při průchodu gama záření mezihvězdným resp. mezigalaktickým prostředím nedochází k významné absorpci. Stejný problém je dále diskutován v kapitole 14, kde jsou použita data z družice RHESSI.



Obrázek 8.5. Závislost  $N(>P)$  na  $P$  (peak flux) pro 772 gama záblesků z BATSE katalogu 3B (Meegan *et al.* 1996). Rovná přímka představuje tzv. třípolovinový zákon. V logaritmické škále je její sklon roven  $-3/2$ , což odpovídá homogennímu rozdělení zdrojů  $\gamma$ -záblesků v prostoru. Odchylka od této křivky pro slabé záblesky může znamenat úbytek těchto zdrojů v největších vzdálenostech.

## 9 Existence SGR a TGF

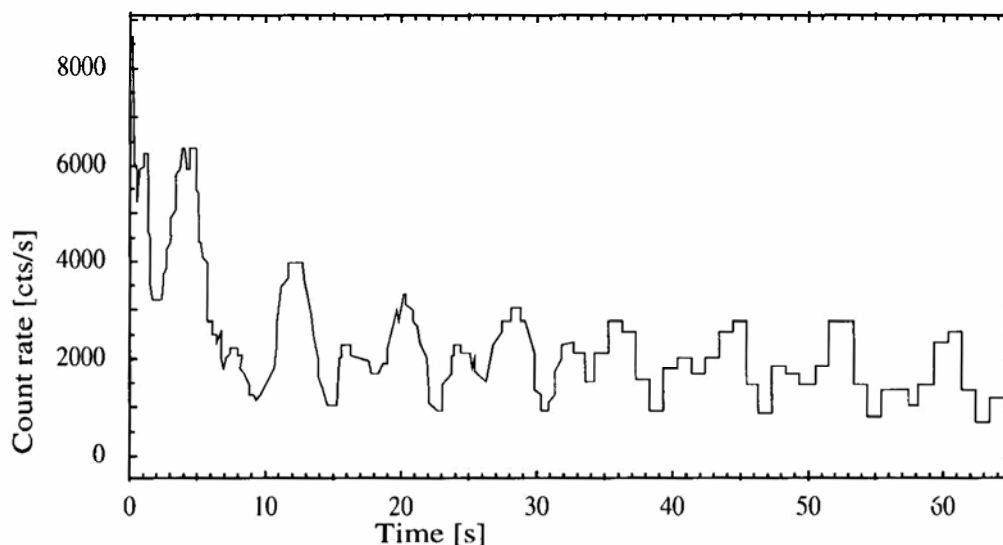
### 9.1 SGR

Velice důležitý výsledek spolupráce IPN bylo určení polohy velice silného a velice zvláštního gama záblesku 5. března 1979 (Mazets *et al.* 1979). Byl to první případ gama záblesku, který vykazoval periodicitu ( $8,1 \pm 0,1$ ) s časového profilu (viz Obrázek 9.1). Poloha, která vytyčovala na obloze oblast 2 čtverečních obloukových minut, byla ve shodě s polohou pozůstatku supernovy (SNR) N49 ve Velkém Magellanovu Mračnu (LMC). Poté ještě následovala řada dalších pozorování podobných záblesků např. SGR 1806-20 nebo SGR 1900+14. Nakonec byly klasifikovány jako objekty odlišné od klasických GRB a bylo pro ně zavedeno označení SGR, což znamená Soft Gamma-Ray Repeater. SGR jsou odlišné od GRB s následujícími vlastnostmi: mají měkká spektra bez časové evoluce, tvar spektra je stejný jako pro opticky tenký termální bremsstrahlung ( $T \approx 30 - 40$  keV), mají krátké doby trvání (0,1 s) a krátké časy vzestupu „rise times“ (pod 5 ms). Více informací viz Kouveliotou *et al.* (1993b).

Jako způsob jejich vzniku je dnes obecně přijímán model magnetaru (Duncan 1992). Magnetar je neutronová hvězda vzniklá při výbuchu supernovy, která má ovšem velmi krátkou rotační periodu ( $< 20$  ms), která umožňuje vznik velmi silného magnetického pole (až

$10^{15}$  G) pomocí dynamového jevu. Toto obrovské magnetické pole působí na povrchovou kůru neutronové hvězdy tak silně až praskne. Vzniklé seismické vlny vedou ke vzniku magnetických vln, které urychlují oblaka nabitých částic nad povrchem. Nadměrně silné záblesky jako byl GRB 790305 (= SGR 0526-66) jsou produkovány mechanismem podobným slunečním vzplanutím. Magnetické pole se čas od času stane nestabilním a náhle přejde do energeticky výhodnějšího stavu. Magnetické pole se tzv. magnetickou rekonexí přeuspořádá, přičemž se uvolní ohromné množství energie v podobě gama záření.

Všechny SGR leží na místech nebo poblíž mladých (< 10 000 let) SNR, a to buď v naší Galaxii nebo ve Velkém Magellanovu Mračnu (Kouveliotou *et al.* 1994, Kulkarni *et al.* 1994).



Obrázek 9.1. Časový profil prvního pozorovaného Soft Gamma-Ray Repeateru známého pod označením GRB 790305. Převzato z článku Mazets *et al.* (1979).

## 9.2 TGF

Jako vedlejší produkt hledání kosmických gama záblesků v datech z BATSE byl objeven vysoce energetických záblesků pocházejících ze Země – Terrestrial Gamma Flashes (Fishman *et al.* 1994). TGF trvají typicky jen několik milisekund a v jejich průběhu se mění spektrum. Z minimálních časových struktur okolo 50  $\mu$ s lze jednoduše vypočítat, že oblast v níž k TGF dochází, má rozměry asi 15 km. Časové profily neukazují nějakou významnou asymetrii.

Předpokládá se, že TGF jsou spojeny s rozsáhlými bouřkovými oblastmi. Také by mohly souviset s nedávno objevenými bouřkovými jevy ve vysoké atmosféře, jako jsou tzv. „red sprites“ nebo modré výtrysky „blue jets“. Red sprites jsou favorizováni, protože mají stejně jako TGF dobu trvání řádově milisekund, a protože jsou typicky složeny z několika dominantních emisních částí (Sentman *et al.* 1995). Ještě dodejme, že red sprites dosahují atmosférických výšek až 90 km, kde je případný únik záření gama, vzhledem k malé hustotě vzduchu, pravděpodobnější.

## 10 Hledání protějšků na jiných vlnových délkách a dosvitů

Hledání protějšků gama záblesků v jiných oborech elektromagnetického spektra (dále jen protějšky „counterparts“) bylo obtížné hned ze dvou důvodů. Za prvé to byly poměrně velké oblasti možné polohy daného gama záblesku („error boxes“) na obloze, které byly cílem hledání. A za druhé to bylo velké časové zpoždění získávání informací o poloze záblesku ze změřených dat. Přesnost většiny triangulačních metod se pohybovala okolo několika stupňů pro satelity na oběžné dráze Země a několik úhlových minut pro meziplanetární sondy. Dosvit „afterglow“ gama záblesku na jiných vlnových délkách trvá od několika hodin po týdny. Avšak získání a analýza dat trvala na počátku výzkumu  $\gamma$ -záblesků minimálně několik týdnů, a tak rychlé sledování místa GRB nebylo možné. Pravděpodobnost úspěchu při simultánním pozorování GRB a jeho oblasti teleskopy na jiných vlnových délkách byla velmi malá, protože buď bylo malé zorné pole případného teleskopu nebo detektoru a nebo byla malá jeho citlivost.

Existuje také možnost hledání protějšků na fotografických deskách v archivech přehlídek oblohy, a to v podobě tzv. transientů (objekty, které se na fotografiích téhož místa náhle objeví a zase zmizí) v chybových oblastech polohy GRB. Mnoho takových kandidátů bylo skutečně nalezeno, některé z nich byly vysvětleny jako fotografické defekty či artefakty způsobené letadly nebo satelity v zorném poli (Greiner & Moskalenko 1994, Schaefer 1994). Poblíž některých GRB sice byly nalezeny reálné optické transienty (na jejich místech byly prokázány slabé AGN), nicméně jejich relace s GRB nebyla dokázána. Jinou možností hledání optických protějšků bylo využití archivů snímků z kamer určených pro sledování meteorů. Jejich výhodou je široký zorný úhel, ale citlivost bývá omezena jen na objekty jasnější než 10 – 15 mag.

Průlomem v této oblasti byl úspěch malé italsko-holandské družice Beppo-SAX, která byla schopná detekovat gama záblesk, určit jeho polohu a poté na tuto polohu rychle zaměřit kamery citlivé v rentgenové oblasti, a tím zpřesnit polohu zdroje. Byla vypuštěna 30 dubna 1996 a s měřením začala na konci roku. Kombinace celooblohového gama detektoru „all-sky  $\gamma$ -detector“ (40 – 700 keV) se dvěma širokouhlými „WFC“ (2 – 28 keV) a čtyřmi úzkouhlými „NFI“ (0,1 – 10 keV) rentgenovými kamerami umožňovalo pozorování gama záblesků a jeho rentgenového protějšku na jediné platformě. Pro každý zpozorovaný záblesk pomocí  $\gamma$ -detektoru je zahájeno hledání simultánního rentgenového signálu pomocí WFC. V případě pozitivního výsledku jsou zaměřeny úzkouhlé kamery.

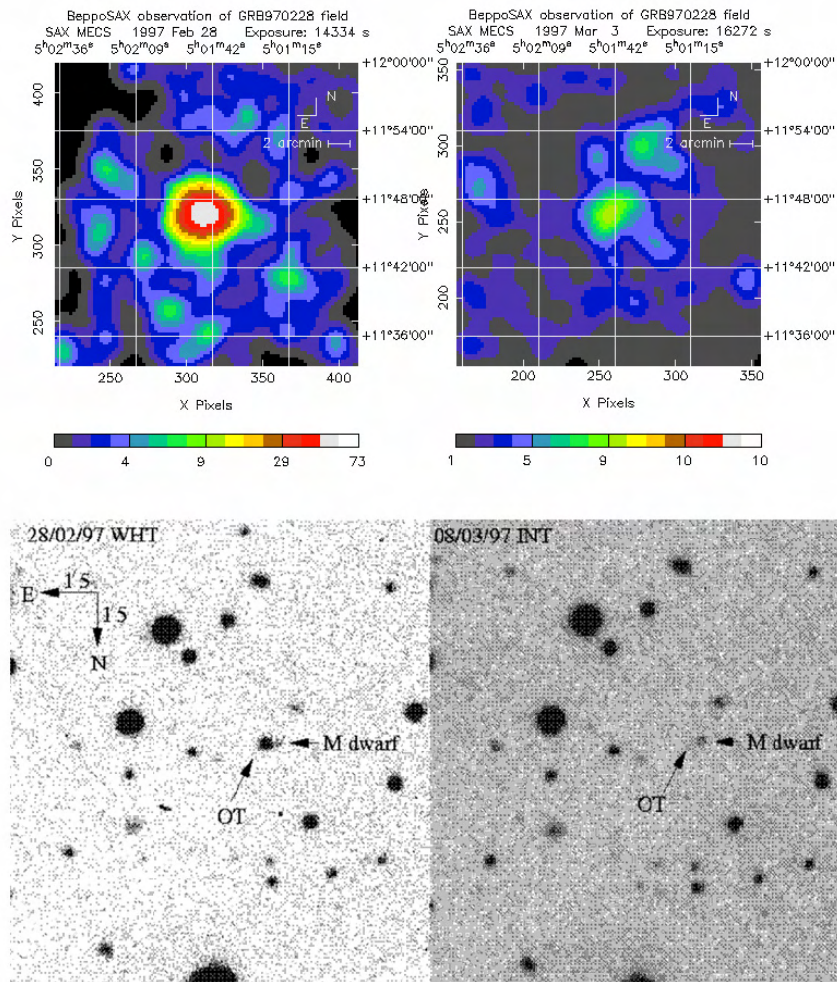
28. února roku 1997 byl pomocí all-sky  $\gamma$ -detektoru zpozorován záblesk. Rychlá analýza dat z přístroje WFC odhalila přebytek počtu RTG-fotonů. Předběžný rozbor obrazových dat ukázal bodu podobný rentgenový signál, který se objevil současně s gama zábleskem. Poloha byla určena s přesností 10 obloukových minut. Což umožnilo zaměřit na tuto pozici úzkouhlé kamery NFC. Mezitím detailnější rozbor vedl ke zmenšení error boxu na 3'. Poté, 8 hodin po gama záblesku, bylo spuštěno měření pomocí NFC. Na výsledném snímku se nacházel jediný objekt – rentgenový dosvit.

První optická pozorování byla získána 20,8 hodiny po vlastním záblesku na 4,2-metrovém teleskopu Williama Herschela na La Palmě (van Paradijs *et al.* 1997). Optický dosvit ležel úhlově blízko vzdálené galaxie (Obrázek 10.1). Na později pozorované stejné oblasti pomocí 2,5-metrového teleskopu Isaaca Newtona (taktéž na La Palmě) již optický dosvit zjištěn nebyl. Tento optický transient postupně potemňoval z hvězdné velikosti 21,3 (při prvním pozorování ve filtru V), až se stal nepozorovatelným. Snižující se jasnost dosvitu krásně sledovala mocninný pokles, tak jak to předpovídá *fireball model* (viz kapitola 11).

Pozdější pozorování pomocí Hubbleova vesmírného teleskopu a mnoha dalším pozemních dalekohledů prozradila na místě dosvitu slabou galaxii. Korelace těchto objektů s galaxiemi je velmi pravděpodobná. Rudý posuv této galaxie byl odhadnut pomocí pozorované optické intenzity jako 0,2 až 2.

Potvrzení toho, že zdroje gama záblesků jsou extragalaktické, na sebe nenechalo dlouho čekat. Ve spektru optického protějšku dlouhého gama záblesku GRB 970508 (také pozorovaného pomocí Beppo-SAX) byly objeveny absorpční čáry železa a manganu. Z nich byl spočítán rudý posuv 0,835. Byl to taktéž první případ, kdy byl pozorován dosvit v radiové oblasti.

Na konci tohoto plodného roku byl pozorován GRB 971214, jehož optický protějšek splýval s galaxií o rudém posuvu 3,42. Nyní již není sporu o tom, že alespoň některé gama záblesky leží v kosmologických vzdálenostech; ve vzdálenostech skoro na hranici pozorovatelného vesmíru tedy několik giga parseků daleko, což za předpokladu izotropní emise vede k nutnosti neuvěřitelně veliké vyzářené energie asi  $10^{53}$  erg.



Obrázek 10.1. Objevení rentgenového a optického protějšku gama záblesku GRB. *Vlevo nahoře*: rentgenový obraz protějšku osm hodin po gama záblesku (družice Beppo-SAX). *Vpravo nahoře*: Ta samá oblast tři dny poté. Jasnost klesla asi 20krát. *Vlevo dole*: Optický obraz oblasti záblesku získaný pomocí 4,2 m teleskopu Williama Herschela (La Palma) 20,8 hodin po začátku záblesku. *Dole vpravo*: Stejná oblast oblohy několik dní později zachycená 2,5 m teleskopem Isaaca Newtona (La Palma). Jasnost dosvitu již poklesla pod úroveň pozorovatelnosti tímto dalekohledem.

Další informace o pozorování GRB v jiných částech spektra než je záření gama lze nalézt např. ve Schaeferovi *et al.* (1998) nebo v Mészárosovi P. (1999). V této kapitole bychom neměli opomenout objev dosvitu krátkého gama záblesku GRB 050709 ( $T_{90} \approx 70$  ms). Tento záblesk poprvé zpozorovala družice HETE-2, která určila jeho polohu s přesností asi  $0,5^\circ$ . Poté se na takto ohraničenou oblast zaměřila družice Chandra X-ray Observatory, která zpřesnila chybu polohy až na 81 úhlových vteřin, poté i nová družice Swift, která stejně jako Chandra detekovala rentgenovský dosvit. Následovala pozorování v optickém oboru pomocí HST a několika pozemských dalekohledů. Nakonec ještě dodejme, že dnes známý rozsah rudých posuvů u různých GRB činí od nejmenších hodnot  $z = 0,0085$  pro GRB 980405 nebo  $z = 0,033$  pro GRB 060218 (což byl velice dlouhý záblesk  $T_{90} \approx 2000$  s asociovaný se supernovou typu Ic (Fan *et al.* 2006)) až po  $z = 6,29$  pro GRB 050904.

## 11 Modely vzniku gama záblesků

Mnohem více informací, než je uvedeno v této kapitole o modelech gama záblesků, lze nalézt např. v článkách Fishman & Meegan (1995b), Mészáros P. (2001, 2002), Piran (2004), anebo v knihách Murthy & Wolfendale (1993, str. 98) a Schönfelder (2001, str. 385). V této kapitole si nastíníme některé základní modely, které jsou dnes již více méně přijímány jako nejpravděpodobnější.

Jak je zmíněno hned na začátku této práce, bylo v průběhu zhruba třicetiletého průzkumu  $\gamma$ -záblesků, navrženo přes 120 modelů jejich možného vzniku (Nemiroff 1994a). Nicméně už jen objev jejich isotropního, ale nehomogenního rozdělení v prostoru vyloučil zprvu upřednostňované modely zdrojů svázaných s Galaktickým diskem. Objev optických dosvitů s absorpčními čarami s velkým rudým posuvem znamenal, že jejich poloha leží až ve vzdálenostech několika giga parseků. Což vedlo k vyloučení lokálních heliocentrických modelů a modelů spojených s Galaktickým halem. Tyto tři důvody: izotropie ale nehomogenita a obrovská vzdálenost hrají ve prospěch tzv. kosmologických modelů. Avšak to, s čím se tyto modely musí vypořádat, je schopnost generovat enormní množství energie ( $10^{50}$  až  $10^{54}$  erg) v krátkém okamžiku a její transport s poměrně malého prostoru asi 100 km (Tato mez plyne z jednoduché úvahy. Nejkratší pozorovaná změna v časovém profilu asi  $10^{-3}$  s krát rychlost světla dává onen odhad velikosti. Pokud by byl objekt větší než tento limit, potom bychom díky vystředování záření z odlehlých bodů nemohli pozorovat tak krátkou změnu.).

Popis procesu vzniku GRB lze rozdělit (a také je tak v literatuře často dělen) na dva body: prvotní uvolnění energie „the central engine“ následované rozptýlením energie do prostoru za vzniku záření  $\gamma$  a vznik dosvitu na jiných vlnových délkách.

### 11.1 Fireball model

Zpočátku vzniká výbuchem urychlená vlna, která produkuje gama záření interakcemi v odlétajícím materiálu, mezihvězdném materiálu, hvězdném větru, nebo ve vnějších vrstvách případného průvodce, pokud jde o binární systém. V následující ochlazovací fázi může díky zpomalující rázové vlně dojít k vyzáření méně energetického záření v podobě dosvitu. K formování charakteristického zlomeného „power-law“ spektra dochází pomocí synchrotronového procesu nebo pomocí stejně významného inverzního Comptonova procesu.



Typická čísla charakterizující tuto událost jako luminosita  $L$ , doba trvání  $T$ , celková energie  $E$  záblesku a četnost výskytu  $R$  jsou:

$$\begin{aligned} L &\approx 10^{52} \frac{\Omega}{4\pi} \text{erg.s}^{-1} & T &\approx 10\text{s} \\ E &\approx 10^{53} \frac{\Omega}{4\pi} \text{erg} & R &\approx 10^{-6} \left( \frac{\Omega}{4\pi} \right)^{-1} \text{galaxie}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}, \end{aligned} \quad (11.1)$$

kde  $\Omega$  je prostorový úhel svazku, pod kterým je záření emitováno (v případě izotropní emise je  $\Omega = 4\pi$ ).

Exploze kompaktního zdroje vytvoří opticky tlustou plazmu, která zrychleně expanduje až k relativistickým rychlostem (Waxman 1997). Energie exploze se přemění v kinetickou energii protonů. Zformuje se chladná „skořápka“, která expanduje s časově proměnným Lorentzovým faktorem  $\Gamma \sim 200$ . Později dochází k disipaci energie této rozpínající se obálky prostřednictvím srážek s mezihvězdným materiálem. Někdy je také pozdější emise na delších vlnových délkách než je záření gama vysvětlována tak, že dochází postupně k expanzi několika obálek, přičemž ta první se rozpíná pomaleji. Tím dojde v určitém čase k jejich srážce a uvolněnou energii pozorujeme v podobě dosvitu.

## 11.2 The Central Engine

Samotný prvotní způsob, jakým dojde k ohromné explozi a následnému rozpínání obálky plazmatu, může být rozličný. Obecným schématem většiny modelů je gravitační kolaps nebo rychlá akrece jednoho nebo více objektů, která vede ke vzniku neutrin a antineutrin, které později navzájem anihilují, což vede ke vzniku rychle se rozpínající obálky elektron-pozitronových párů.

### 11.2.1 Splýnutí kompaktních objektů

Splýnutí dvou kompaktních objektů jako jsou neutronové hvězdy, černé díry nebo bílí trpaslíci. Těsný binární systém takovýchto objektů není stabilní kvůli ztrátě energie vyzařováním gravitačních vln, a proto se bude postupně zmenšovat vzdálenost mezi nimi, až dojde k jejich splýnutí. Často přitom může dojít k vytvoření disku, z něhož hmota rychle akreuje na druhou složku. Přitom je nezbytná akrece 2 až  $10 M_{\odot}$  při rychlosti nejméně  $0,1 M_{\odot} \text{s}^{-1}$ . Takové splýnutí může uvolnit energii až  $10^{53}$  erg během 10 ms. Přitom významná část energie se vyzařuje v podobě neutrin a antineutrin, které navzájem anihilují a produkují elektron-pozitronové páry. Výsledný výbuch vede k expandující sféře nebo dvěma paprskům v navzájem opačných směrech podél rotační osy. Expandující hmota má teplotu  $k_b T \approx 100$  MeV. V současné době se předpokládá, že právě splýnutí dvou kompaktních objektů je příčinou vzniku krátkých záblesků gama.

### 11.2.2 Model kolapsaru

Model kolapsaru předpokládá gravitační kolaps hvězdy – supernova typu Ic. Tento fenomén začíná jednou masivní hvězdou podobnou Wolfůvě-Rayetově hvězdě s nízkou metalicitou.



Na konci jejího života vznikne černá díra s akrečním diskem. V tomto modelu je rozhodující moment hybnosti (Woosley & MacFadyen 1999). Pokud je moment hybnosti příliš malý, potom hmota v disku pouze akreuje na černou díru, aniž by došlo k explozivní události. Pokud je však příliš velký, pak teplota v disku není dostačující k produkci neutrin. Akreční čas pro disk je od 10 s do 1 min. Vzniklý výtrysk plazmy (svírající úhel zhruba  $30^\circ$ ), složené z neutrin a elektron-pozitronových párů, proniká podél rotační osy zbylou obálkou hvězdy. Tento průnik výtrysku může vysvětlovat výskyt prekursoru (v měkké oblasti  $\gamma$  resp. tvrdé rentgenové oblasti) v časovém profilu některých gama záblesků. Model kolapsaru se zdá být pravděpodobný pro vznik tzv. dlouhých GRB.

Pokud by byly gama záblesky produkovány podle tohoto modelu, potom bychom dostali pro  $\Omega/4\pi = 10^{-2}$  jednu událost za 10 000 let na galaxii. Ale protože pozorovaná četnost supernov činí asi jedna za 100 let na galaxii, tak by pouze malé procento všech supernov končilo způsobem, při kterém by byl produkován gama záblesk. Nedávný objev neobvyklé supernovy SN 1998bw a její očividná korelace s  $\gamma$ -zábleskem GRB 980425 (Wheeler *et al.* 1998) spolu s pozorováními, že některé dosvity obsahují komponentu záření supernovy, přinesly nové důkazy ve prospěch tohoto modelu.

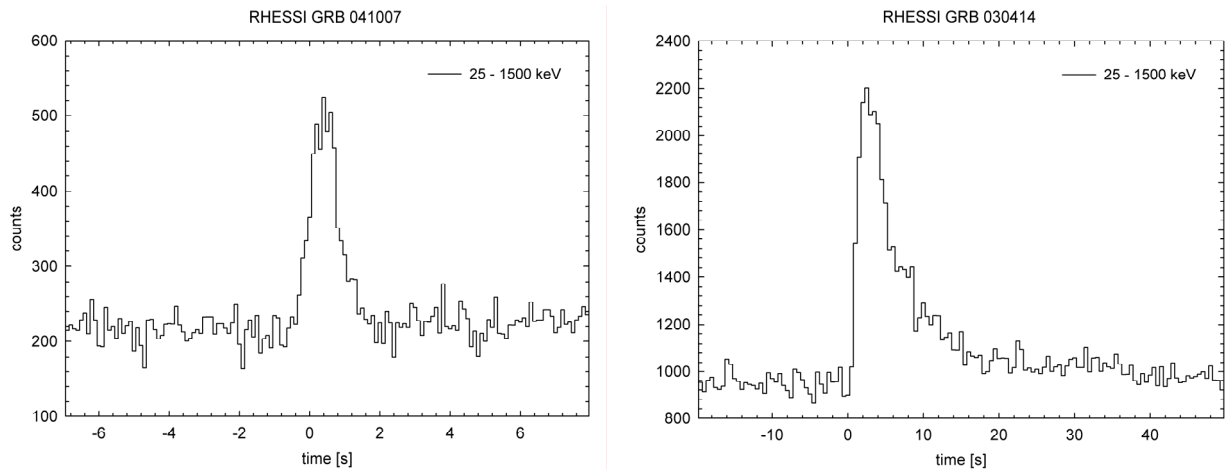
## 12 Morfologie časových profilů

Tato kapitola se zaměřuje na popis světelných křivek gama záblesků detekovaných družicí RHESSI a jejich rozčlenění do určitých typových skupin (podle klíče uvedeného níže). Asi nejnápadnějším znakem časových profilů  $\gamma$ -záblesků je jejich morfologická rozmanitost a široký rozsah jejich délek. Tím je případná klasifikace do pevně zadefinovaných morfologických typů ztížena.

Snah o kategorizaci profilů  $\gamma$ -záblesků bylo v minulosti několik (Hurley & Desai 1986, Klebesadel 1992). Tato nesnadná úloha je ztěžována přítomností slabých záblesků a také tím, že a priori neznáme počet skupin a podskupin, které mají být na tuto klasifikaci použity. A co dál, vypadá to, že zde nejsou další pozorovatelné parametry (poloha na obloze, spektra, délka záblesku, atd.), které by jasně korelovaly s časovou morfologií. Snad jedinou výjimkou je fakt, že kratší gama záblesky mívají tvrdší spektra. Fishman (1993) resp. Fishman & Meegan (1995b) ukázal jedno z možných morfologických dělení profilů gama záblesků z prvního BATSE Gamma-Ray Bursts katalogu. Toto klasifikování je:

- I. záblesky s jedinou špičkou či úzkým hrotem
- II. záblesky hladké s jednou nebo více dobře patrnými špičkami
- III. záblesky, u kterých je od sebe velmi dobře odděleno vícero emisí
- IV. záblesky nepravidelné, velmi členité s velkým množstvím úzkých hrotů

*První skupina:* Jedno pulsové záblesky, které mají malou nebo žádnou další strukturu. Jejich doba trvání je přibližně od 30 ms po asi 100 s. Jejich částečná podskupina jsou tzv. záblesky FRED (Fast Rise, Exponential Decay), ve kterých je čas nárůstu „rise time“ mnohem kratší než čas poklesu „fall time“. Koncová klesající část těchto gama záblesků nemusí být striktně vzato exponenciální, je ale monotónně klesající. U mnoha záblesků typu FRED se v klesající části vyskytují jeden či více malých peaků. Spektrum těchto gama záblesků se skoro vždy v čase vyvíjí od tvrdšího po měkké a sekundární peaky, pokud se vyskytují, tak jsou obvykle tvořeny energetičtějšími  $\gamma$ -fotony než primární peak. Tyto některé charakteristiky kvantifikoval Bhat *et al.* (1994). Příklady záblesků z této skupiny jsou na Obrázku 12.1.

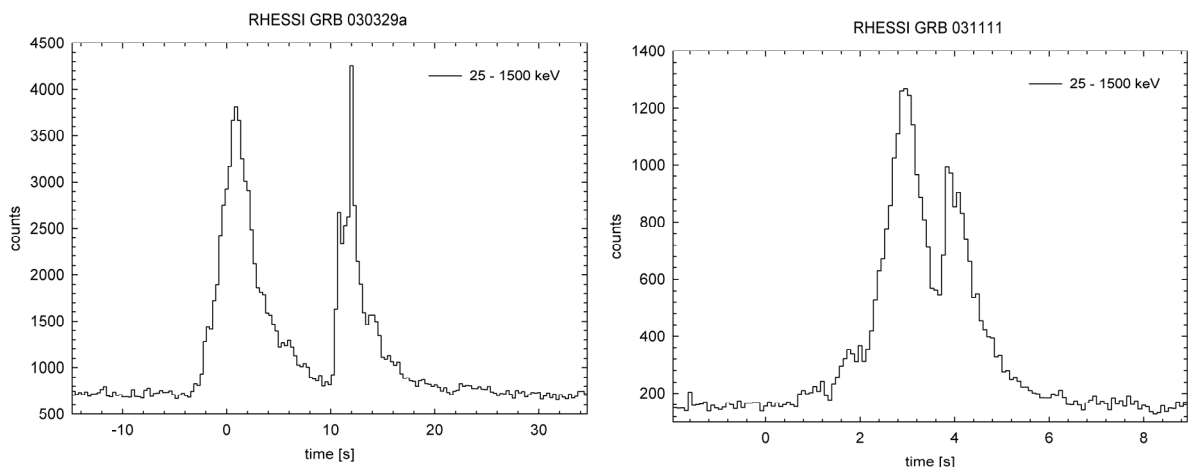


Obrázek 12.1. Obrázek ukazuje časové profily gama záblesků zachycených družicí RHESSI. Tyto dva záblesky patří do I. morfologické skupiny (viz výše); záblesků s jedním peakem či úzkým hrotem, tak jak ji zavedl Fishman & Meegan (1995b). Záblesk GRB 030414 lze také zařadit do podskupiny tzv. FRED záblesků. U záblesku GRB 041007 je na časové ose nula ztotožněná s časem 02:02:08 UTC a u záblesku GRB 030414 s časem 13:48:26 UTC.

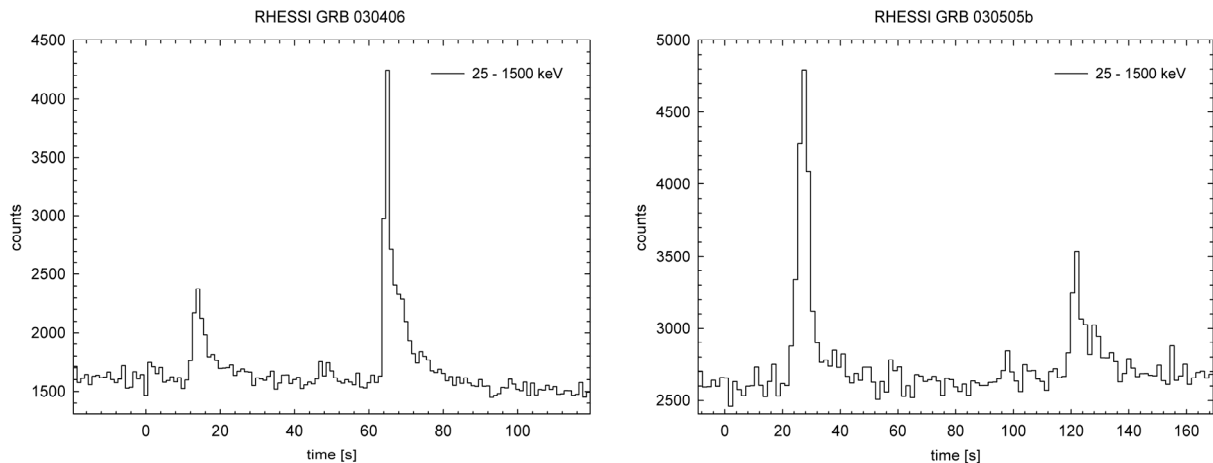
*Druhá skupina:* U mnoha těchto hladkých záblesků s několika peaky jsou „rise time“ a „fall time“ podobně dlouhé. Tento typ je zobrazen na Obrázku 12.2.

*Třetí skupina:* Tato skupina představuje záblesky, u nichž jsou dvě emisní části odděleny relativně dlouhým časovým intervalem, v němž není detekovatelná emise (resp. je na úrovni pozadí). Tato mezera může být mnohem delší, než je délka okrajových emisí. Rovněž příklady záblesků z této třetí skupiny jsou uvedeny, a to na Obrázku 12.3.

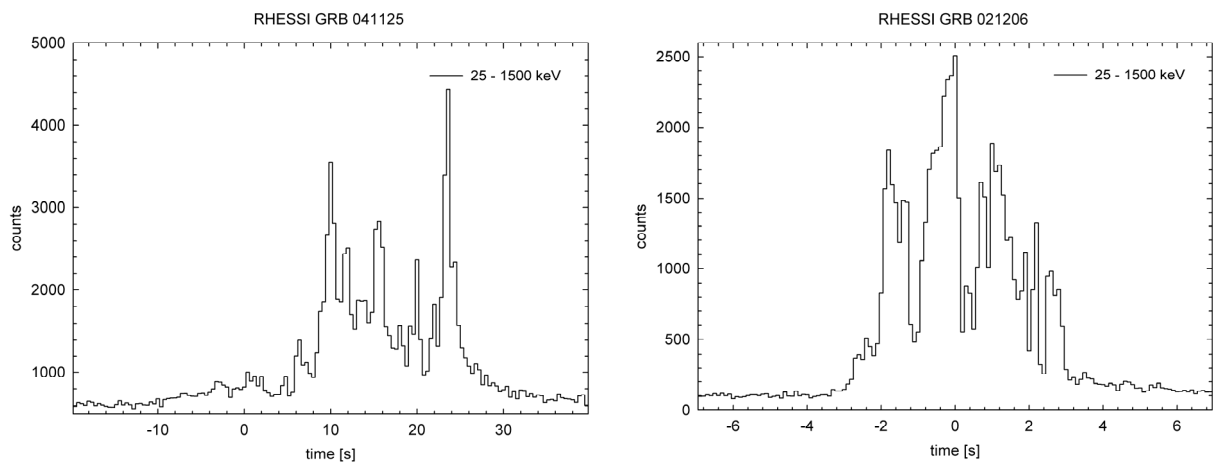
*Čtvrtá skupina* je zastoupena nepravidelnými záblesky, jejichž časový profil je velmi členitý s mnoha složitými vzájemně se překrývajícími peaky. S úzkými hroty, jejichž délka je menší než 0,1 s. Mnoha takovými záblesky lze proložit jakousi obálku, ze které vystupují jednotlivé peaky. Jejich příklady jsou uvedeny na Obrázku 12.4.



Obrázek 12.2. Obrázek ukazuje časové profily gama záblesků zachycených družicí RHESSI. Tyto dva záblesky patří do II. morfologické skupiny (viz výše); hladké záblesky s více dobře patrnými peaky, tak jak ji zavedl Fishman & Meegan (1995b). U záblesku GRB 030329a je na časové ose nula ztotožněná s časem 11:37:29 UTC a u záblesku GRB 031111 s časem 16:45:18 UTC.



Obrázek 12.3. Obrázek ukazuje časové profily gama záblesků zachycených družicí RHESSI. Tyto dva záblesky patří do III. morfologické skupiny (viz výše); záblesky v nichž je odděleno více emisí relativně dlouhým intervalem, ve kterém není téměř detekovatelný signál (respektive je na úrovni pozadí). Podle klasifikace zavedené Fishmanem & Meeganem (1995b). U záblesku GRB 030406 je na časové ose nula ztotožněná s časem 22:41:53 UTC a u záblesku GRB 030505b s časem 09:03:00 UTC.



Obrázek 12.4. Obrázek ukazuje časové profily gama záblesků zachycených družicí RHESSI. Tyto dva záblesky patří do IV. morfologické skupiny (viz výše); záblesky nepravidelné, velmi členité s velkým množstvím úzkých hrotů. Podle klasifikace zavedené Fishmanem & Meeganem (1995b). U záblesku GRB 021206 je na časové ose nula ztotožněná s časem 22:49:17 UTC a u záblesku GRB 041125 s časem 16:07:04 UTC.

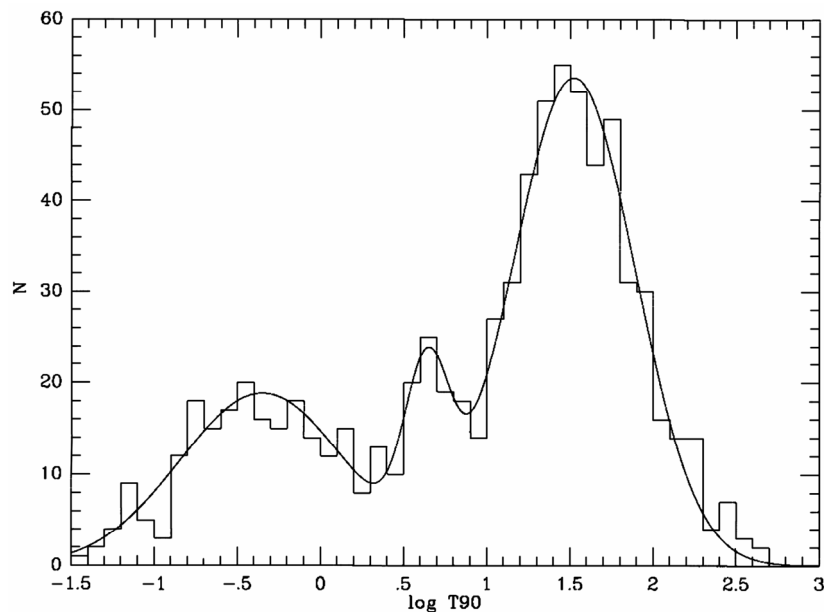
Minimálně u jednoho  $\gamma$ -záblesku byla nalezena struktura kratší než jedna milisekunda (Bhat *et al.* 1992). Velká část záblesků vykazuje asymetrii v časovém profilu. Náběžná fáze bývá kratší než pozdější klesající (Link *et al.* 1993, Nemiroff *et al.* 1994b). Některé práce o gama záblescích se zaměřovaly na hledání periodických struktur ve „světelných“ křivkách. Kouveliotou *et al.* (1992) použila metodu rychlé Fourierovy analýzy na data z přístroje BATSE, avšak žádné periodické struktury nenalezla. Norris (1994) a Meredith *et al.* (1994) používali pro studium časových profilů waveletovou analýzu. Takto může být komplikovaný profil gama záblesku rozložen do poměrně malého počtu parametrů. Waveletová analýza je vhodnější než Fourierův rozklad, a to díky tomu, že profily záblesků mají konečnou délku.

Vzhledem k tomu, že profily některých gama záblesků mohou být na hranici mezi dvěma morfologickými skupinami a vzhledem k tomu, že v naší databázi je mnoho záblesků s relativně malým poměrem signálu ku šumu, může být jednoznačné zařazení do konkrétní skupiny obtížné. A ačkoliv není dělení výše popsané příliš exaktní, bylo přesto provedeno pro část GRB (detekovaných družicí RHESSI) a výsledek je uveden v databázi tabulce 16.1.

## 13 Statistická analýza rozdělení časů $T_{90}$ pro GRB detekované družicí RHESSI

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1, pokud sestavíme histogram dob trvání gama záblesků, tak zjistíme, že v něm lze identifikovat dvě podskupiny. Identifikaci těchto dvou podskupin provedla Kouveliotou *et al.* (1993a) na datech z prvního BATSE katalogu. Její práce popisuje existenci tzv. krátkých GRB ( $T_{90} < 2$  s) a dlouhých GRB ( $T_{90} > 2$  s). Toto bimodální rozdělení bylo dále podrobněji studováno ve člancích McBreen *et al.* (1994), Kouveliotou *et al.* (1996) a Koshut *et al.* (1996), kde byl proveden dvou-lognormální fit a uvedeny jeho parametry (vše na datech z přístroje BATSE). Dalším postupem je určení pravděpodobnosti spojené s tímto bimodálním nebo obecně multimodálním rozdělením. Určení této pravděpodobnosti se provádí statistickým testem dobré shody ( $\chi^2$  testem).

Proložení dvou-lognormálního a tří-lognormálního rozdělení histogramem vzorku dat ze BATSE 3B katalogu a ohodnocení tohoto fitu lze nalézt v článku Horváth (1998). V onom článku bylo použito 797 gama záblesků a zjištěné výsledky  $\chi^2$  testu byly následující. Pro jedno-lognormální fit byla vypočtena hladina významnosti  $\alpha$  (plynoucí z hodnoty  $\chi^2$ ) jako méně než 0,1 %. Nulová hypotéza, tvrdící, že dané rozdělení dob  $T_{90}$  je jedno-logaritmicke-normální, může být zamítnuta. Dvou-lognormální fit dával hladinu významnosti 40 %. Toto ukázalo na to, že nulová hypotéza platnosti onoho fitu nemůže být zamítnuta (Press *et al.* 1992). Nicméně ukázalo se, že tří-lognormální fit dává ještě vyšší hladinu významnosti  $\alpha = 98$  %. Ačkoliv tato vysoká pravděpodobnost mluví ve prospěch třetí podskupiny GRB (z hlediska jejich časových délek), je její existence stále předmětem debaty. Toto rozdělení délek  $T_{90}$  gama záblesků a zmíněný fit je uveden na Obrázku 13.1. Možná existence třetí podskupiny gama záblesků než jaké určila Kouveliotou *et al.* (1993a) je dále diskutována v textu Horváth (2002a). Jiný přístup k problému hledání počtu podskupin gama záblesků byl pojat v článku Mukherjee (1998), kde je problém řešen metodou mnoha-parametrické analýzy.



Obrázek 13.1. Rozdělení logaritmů časů  $T_{90}$  pro 797 GRB z BATSE katalogu 3B. Hladká křivka představuje tří-lognormální fit. Hodnota  $\chi^2$  tohoto fitu vedla k hladině významnosti  $\alpha$  rovné 98 %. Zatímco dvou-lognormální fit vedl k  $\alpha$  rovné 40 %. Převzato z článku Horváth 1998.

Podle vzoru analýzy provedené Horváthem (1998) bylo rozhodnuto provést podobné statistické zpracování GRB pozorovaných družicí RHESSI. Databáze (viz kapitola 16) obsahuje 228 GRB detekovaných od 14. února 2002 do 24. ledna 2006. Histogram časů  $T_{90}$  (viz následující obrázky) je sestaven ze 14-ti různě širokých binů tak, aby byla zajištěna dostatečná obsazenost binů v oblasti krátkých GRB a přitom dostatečná přesnost v oblastech, kde připadá na jeden bin více GRB. Postupně jsou zde ukázány jedno, dvou a tří-lognormální fity a ty jsou poté vyhodnoceny statistickým  $\chi^2$  testem dobré shody (Zvára & Štěpán 2002). Pro větší kontrolu byl ten samý test udělán na dvou různých „binováních“ (č. 1 a č. 2).

### 13.1 $\chi^2$ test

$\chi^2$  test spočívá v porovnání empirických (naměřených) četností  $n_i$  s četnostmi očekávanými  $n_i^p$ , a to pomocí hodnoty  $\chi^2$ , která je daná vztahem:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - n_i^p)^2}{n_i^p}. \quad (13.1)$$

Přičemž teoretické četnosti  $n_i^p$  jsou dané určitými integrály z fitované funkce hustoty  $y = y(\log T_{90})$  přes šířku daného binu:

$$n_i^p = \int_{T_i}^{T_{i+1}} y(\log T_{90}) dT. \quad (13.2)$$

Někdy se můžeme setkat s tím, že se při výpočtu  $\chi^2$  ve vzorci dělí naměřenou četností potom:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - n_i^p)^2}{n_i}. \quad (13.3)$$

V následujících tabulkách jsou uvedeny obě hodnoty  $\chi^2$ , vypočítané jak pomocí (13.1) tak (13.3). Hodnota  $\chi^2$  implikuje při daném počtu stupňů volnosti  $f$  (= počet binů – počet parametrů) hodnotu hladiny významnosti  $\alpha$ .

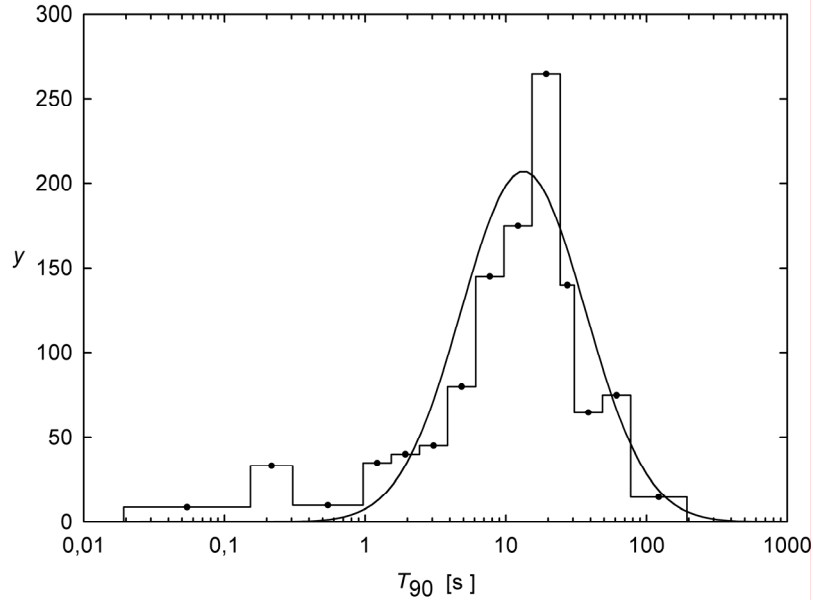
### 13.2 Jedno-lognormální fit

Prvním krokem při hledání případných podskupin v rozdělení  $T_{90}$  bylo proložení jedné lognormální funkce:

$$y(\log T_{90}) = N \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log T_{90} - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (13.4)$$

kde  $N$  je počet všech GRB (= 228) a  $\mu$  je střední hodnota. Toto rozdělení i s příslušným fitem je zobrazeno na Obrázku 13.2. Změnou parametrů  $\sigma$  a  $\mu$  bylo docíleno takového fitu, při němž je  $\chi^2$  minimální. Prokládaná funkce má dva volné parametry  $\sigma$  a  $\mu$  ( $N$  je pevné), tudíž počet st. volnosti je  $f=12$ . Výsledné hladiny významnosti  $\alpha$  (pro  $\chi^2$  spočítané jak z (13.1) tak z (13.3))

jsou pro použité binování č. 1.  $\alpha \ll 0,01 \%$ . Z tohoto výsledku jednoznačně vyplývá, že lze v našem rozdělení GRB zamítnout hypotézu existence jediné skupiny gama záblesků reprezentované jedním lognormálním rozdělením (13.4). Tento výsledek souhlasí se závěry měření provedených v minulosti pomocí jiných přístrojů (např. KONUS, BATSE), kde byla existence minimálně dvou podskupin GRB potvrzena.



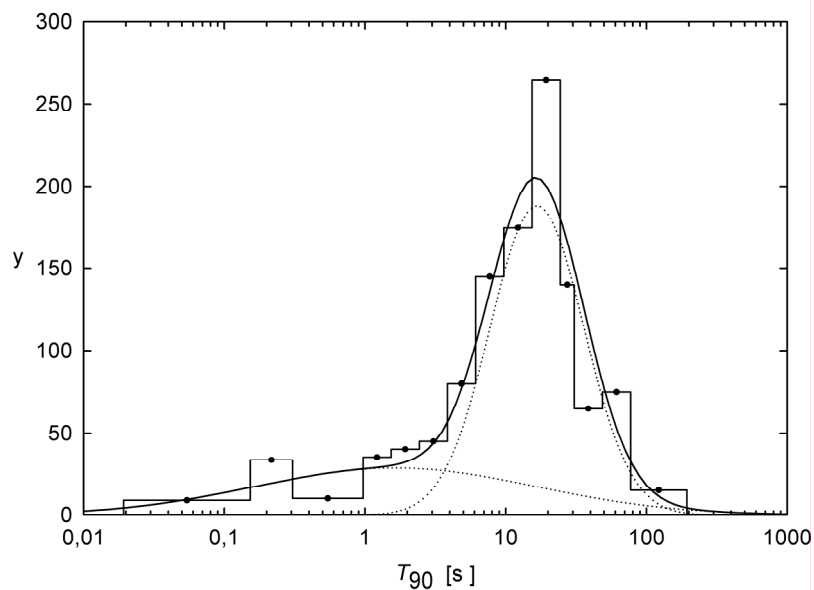
Obrázek 13.2. Rozdělení časů  $T_{90}$  pro 228 GRB detekovaných pomocí RHESSI. Rozdělení je ve 14 binech („binování“ číslo 1). Hladká křivka znázorňuje proložené lognormální rozdělení s ohledem na minimalizaci  $\chi^2$  vypočítané podle (13.3).

### 13.3 Dvou-lognormální fit

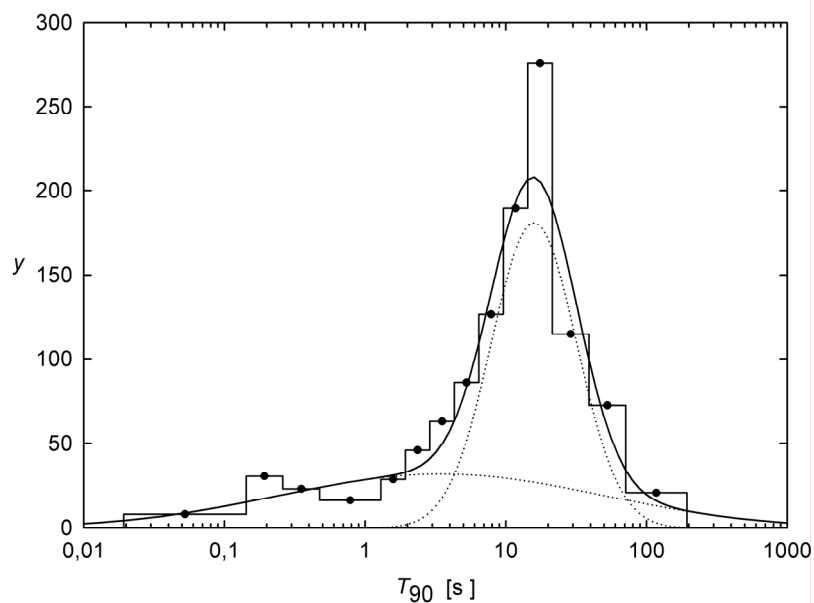
Z výsledku předchozí podkapitoly je vidět, že jedno-logaritmicke-normální rozdělení má jen nepatrnou hladinu významnosti  $\alpha$ , nebo-li je to špatný fit. Už pouhým pohledem je na histogramu časů  $T_{90}$  vidět, že není symetrický. Proto jsme udělali fit dvou-lognormální funkcí hustoty:

$$y(\log T_{90}) = N_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\log T_{90} - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] + (N - N_1) \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\log T_{90} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right], \quad (13.4)$$

kde  $N_{1,2}$  je počet GRB v dané podskupině,  $\sigma$  a  $\mu$  mají opět stejný význam jako výše. Indexy 1 a 2 značí podskupiny krátkých a dlouhých GRB. Opět bylo použito  $N = 228$  gama záblesků ve 14 binech („binování“ č.1 a jiné č.2). Změnou pěti parametrů  $N_1, \mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$  bylo docíleno takového fitu, při kterém je  $\chi^2$  vypočítané podle (13.1) a (13.3) minimální. Výsledek prokládání dvou-lognormální funkce je uveden na Obrázku 13.3, 13.4 a v tabulce 13.1.



Obrázek 13.3. Rozdělení časů  $T_{90}$  pro 228 GRB detekovaných pomocí RHESSI. Rozdělení je ve 14 binech („binování“ číslo 1). Hladká křivka znázorňuje proložené dvou-lognormální rozdělení s ohledem na minimalizaci  $\chi^2$  vypočítané podle (13.1).



Obrázek 13.4. Rozdělení časů  $T_{90}$  pro 228 GRB detekovaných pomocí RHESSI. Rozdělení je ve 14 binech („binování“ číslo 2). Hladká křivka znázorňuje proložené dvou-lognormální rozdělení s ohledem na minimalizaci  $\chi^2$  vypočítané podle (13.1).

dvou-lognormální fit	14 binů	$\chi^2$ podle vztahu	$\mu_1(\log T_{90})$	$\mu_2(\log T_{90})$	$\sigma_1(\log T_{90})$	$\sigma_2(\log T_{90})$	$w_1$	$w_2 (= 1 - w_1)$	$\chi^2$	$\alpha$ [%]
	binování č.1	(13.1)	0,22	1,22	0,99	0,33	0,31	0,69	19,7	<b>2,0</b>
(13.3)		0,67	1,15	1,58	0,32	0,34	0,66	18,8	<b>2,7</b>	
binování č.2	(13.1)	0,54	1,20	1,13	0,30	0,40	0,60	13,1	<b>15,9</b>	
	(13.3)	0,68	1,18	1,30	0,32	0,38	0,62	10,9	<b>28,6</b>	

Tabulka 13.1. Výsledky dvou-lognormálního fitu a  $\chi^2$  testu v rozdělení časů  $T_{90}$ . V tabulce je váha  $w_1 = N_1/N$  ( $N = 228$ ) a počet stupňů volnosti  $f = 9$ .

Porovnáme-li výsledné hladiny významnosti  $\alpha$  v tabulce 13.1 s výsledky uvedenými v předchozí podkapitole, zjistíme, že zavedením další podskupiny došlo k jejímu významnému zvýšení. Z tohoto pohledu má smysl mluvit o existenci dvou podskupin (krátkých a dlouhých GRB), spíše než o pouze jedné skupině.

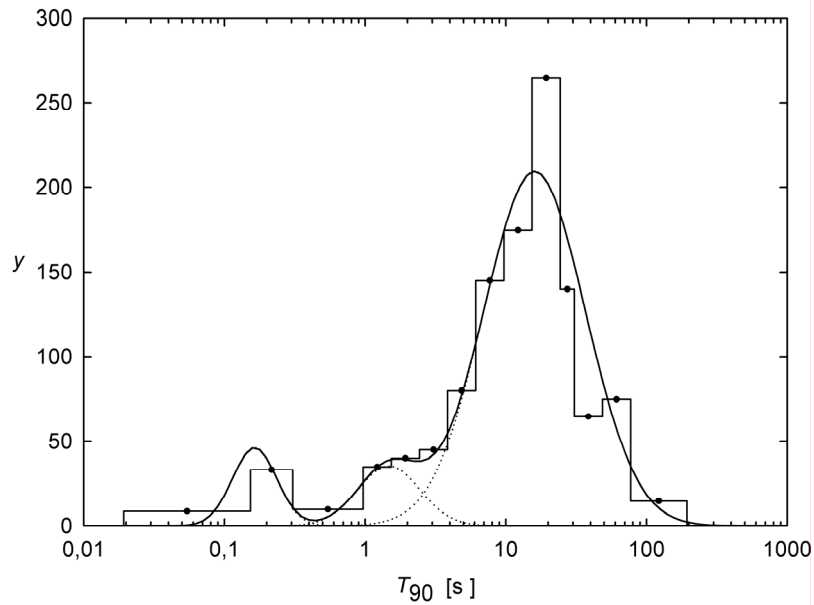
### 13.4 Tří-lognormální fit

Stejný postup jako v předchozích dvou podkapitolách byl proveden i pro tří-lognormální fit:

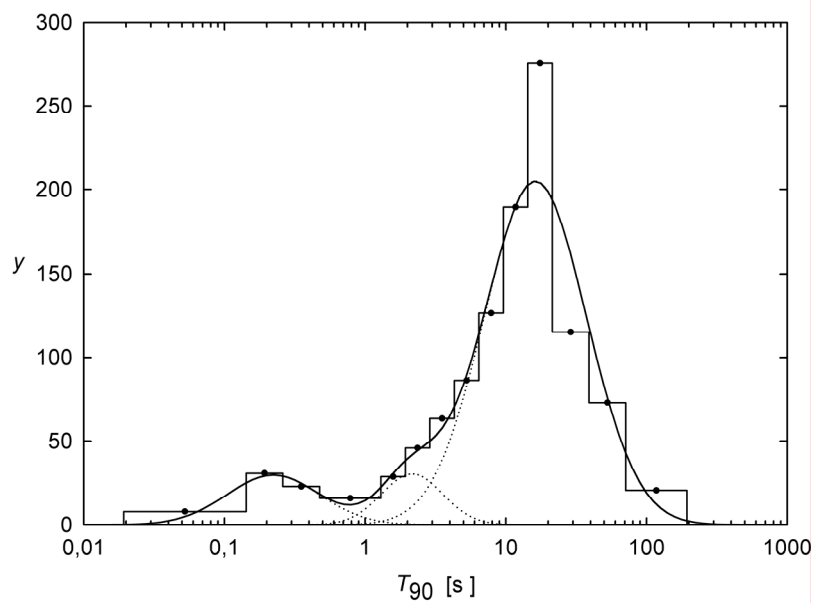
$$\begin{aligned}
y(\log T_{90}) = & N_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log T_{90} - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + N_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log T_{90} - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] + \\
& + (N - N_1 - N_2) \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\log T_{90} - \mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right], \quad (13.5)
\end{aligned}$$

kde uvedené veličiny mají svůj již zavedený význam a indexy 1, 2 a 3 značí postupně krátkou, dlouhou a prostřední podskupinu. Stejně jako v předchozích případech byly voleny parametry (tentokrát 8 veličin) prokládané funkce tak, aby byla minimalizována hodnota  $\chi^2$ . Výsledek je zobrazen v grafech na Obrázcích 13.5 a 13.6 a výsledné hodnoty parametrů a hladin významnosti v Tabulce 13.2.





Obrázek 13.5. Rozdělení časů  $T_{90}$  pro 228 GRB detekovaných pomocí RHESSI. Rozdělení je ve 14 binech („binování“ číslo 1). Hladká křivka znázorňuje proložené tří-lognormální rozdělení s ohledem na minimalizaci  $\chi^2$  vypočítané podle (13.1).



Obrázek 13.6. Rozdělení časů  $T_{90}$  pro 228 GRB detekovaných pomocí RHESSI. Rozdělení je ve 14 binech („binování“ číslo 2). Hladká křivka znázorňuje proložené tří-lognormální rozdělení s ohledem na minimalizaci  $\chi^2$  vypočítané podle (13.1).

tří-lognormální fit	14 binů	$\chi^2$ podle vztahu	$\mu_1(\log T_{90})$	$\mu_2(\log T_{90})$	$\mu_3(\log T_{90})$	$\sigma_1(\log T_{90})$	$\sigma_2(\log T_{90})$	$\sigma_3(\log T_{90})$
	binování č. 1	(13.1)	-0,79	1,20	0,17	0,16	0,36	0,22
		(13.3)	-0,76	1,17	0,16	0,21	0,37	0,17
	binování č. 2	(13.1)	-0,65	1,21	0,33	0,33	0,36	0,22
		(13.3)	-0,67	1,19	0,30	0,32	0,38	0,22
	tří-lognormální fit	14 binů	$\chi^2$ podle vztahu	$w_1$	$w_2$	$w_3 (= 1-w_1-w_2)$	$\chi^2$	$\alpha$ [%]
binování č. 1		(13.1)	0,08	0,83	0,09	11,1	<b>8,6</b>	
		(13.3)	0,09	0,83	0,07	12,6	<b>4,9</b>	
binování č. 2		(13.1)	0,11	0,82	0,07	9,2	<b>16,4</b>	
		(13.3)	0,11	0,82	0,07	8,6	<b>20,0</b>	

Tabulka 13.2. Výsledky tří-lognormálního fitu a  $\chi^2$  testu v rozdělení časů  $T_{90}$ . V tabulce je váha  $w_1 = N_1/N$ ,  $w_2 = N_2/N$  a  $f=6$ .

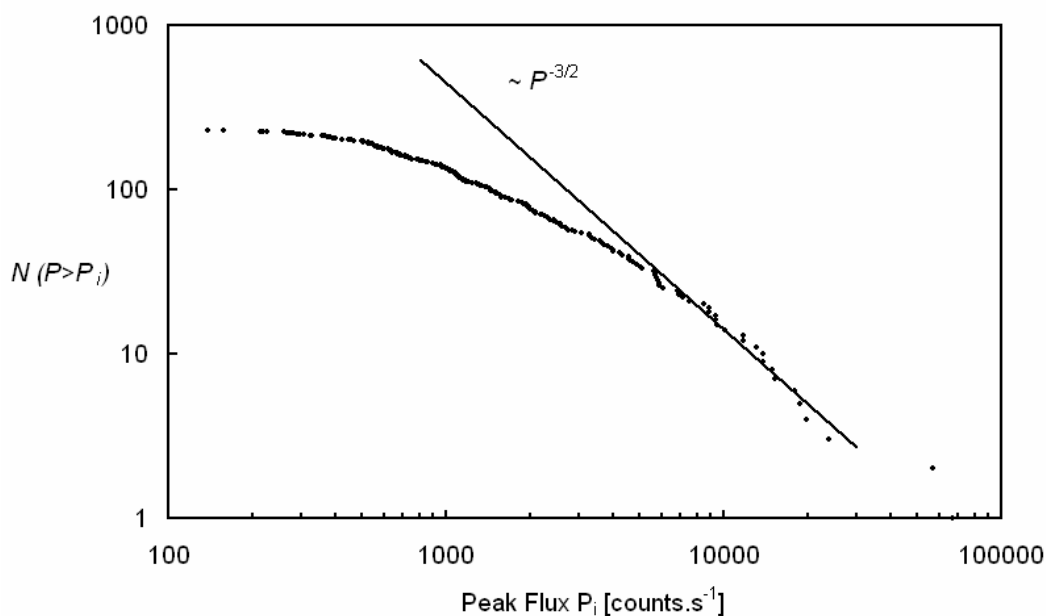
Porovnáme-li výsledné hladiny významnosti  $\alpha$  v tabulce 13.2 s výsledky uvedenými v tabulce 13.1, zjistíme, že zavedením další podskupiny (prostřední) došlo sice ke zvýšení hladiny významnosti, ale pouze nepatrně. Závěry práce Horvátha (1998) ukázaly, že tří-lognormální fit dává hladinu významnosti 98%, což je mnohem více než dávají výsledky pro data z RHESSI. Proto nelze v našem souboru dat jednoznačně prokázat existenci třetí podskupiny tzv. prostředních gama záblesků. Důvodem může být fakt, že náš soubor GRB (228) není příliš velký v porovnání se souborem 797 GRB použitých v již zmíněné práci Horváth (1998).

Nicméně zavedení druhé podskupiny (kapitola 13.3) v databázi gama záblesků pozorovaných pomocí RHESSI se ukázalo být oproti zavedení pouze jedné skupiny (kapitola 13.2), reprezentované jedním lognormálním rozdělením, jako oprávněné.

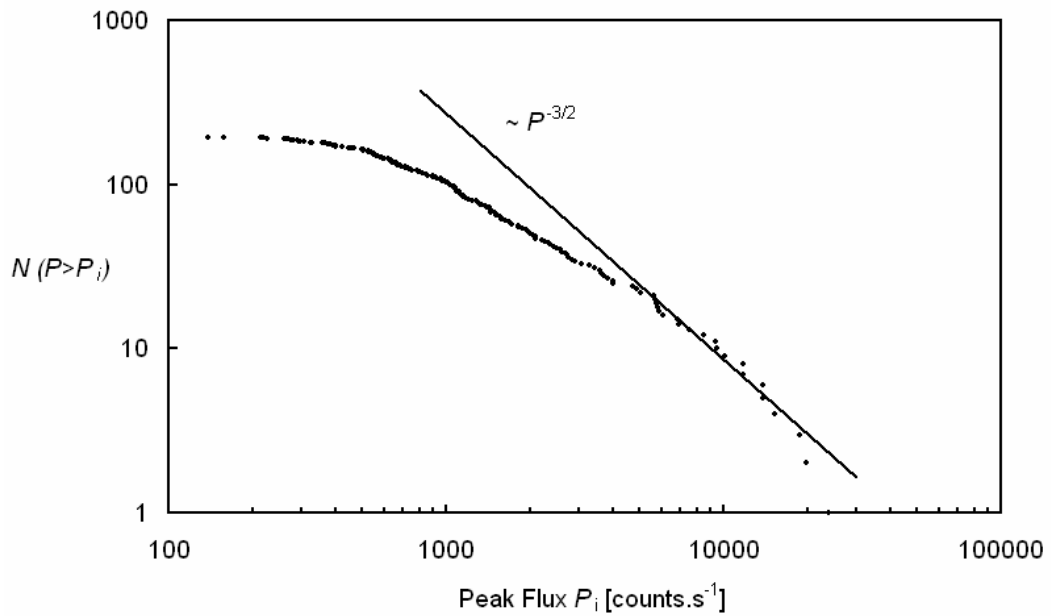
Podívám-li se na procento GRB s  $T_{90} < 2$  s (což bývá pokládáno za hranici mezi krátkými a dlouhými gama záblesky), zjistíme, že pro databázi z družice RHESSI je to přibližně 15 %. Zatímco v BATSE katalogu 4Br je tento podíl asi 33 % (Paciesas *et al.* 1999). Jiné družice naměřily poměr: u přístroje SIGNE (na družici Venera 11/12) 25%, ISEE 3 dalo poměr 29 % (i když na omezeném vzorku dat), z přístroje Phebus (na družici Granat) byl získán poměr 27 %, experiment KONUS na družicích Venera 11/12 respektive 13/14 ukázal významně menší poměr 7 % respektive 16 %, jak uvádí Kouveliotou *et al.* (1993a). Jedním vysvětlením diskrepance podílu krátkých GRB u KONUSu s jinými družicemi by podle Mazetse *et al.* (1981b) mohl být určitý instrumentální rys; souvislost detekčního prahu s délkou gama záblesku. Ukazuje se, že i nová gama družice Swift pozoruje poměrně málo krátkých GRB; jen asi 8%. Na konci této kapitoly je třeba uvést, že databáze GRB RHESSI a tudíž i histogram dob trvání gama záblesků může být zatížen výběrovým jevem vzniklým způsobem sestavování této databáze (více viz kapitola 16).

## 14 Nepřímé pozorování prostorového rozdělení gama záblesků a test $V/V_{\max}$ pro data z RHESSI

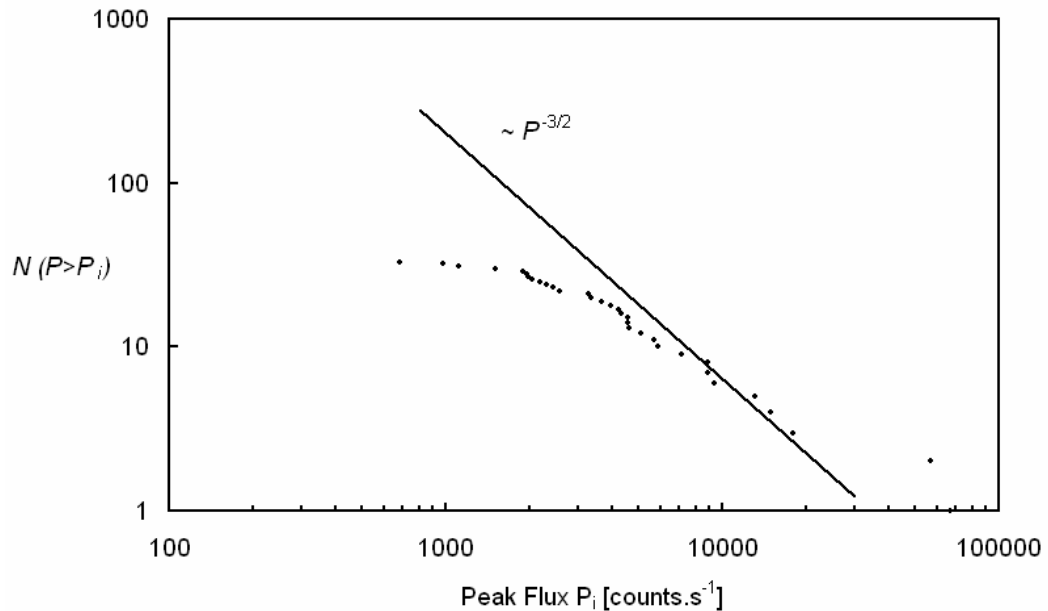
V kapitole 8.3, kde je diskutováno prostorové rozdělení gama záblesků, je i stručně popsána závislost  $\log [N(P>P_i)]$  vs.  $\log P_i$ . Tato závislost mezi počtem  $\gamma$ -záblesků, jejichž maximální hustota zářivého toku  $P$  je větší než daná hodnota  $P_i$  a onou hodnotou  $P_i$ , nepřímo vypovídá o prostorovém rozdělení zdrojů GRB. Konkrétně o rozložení jejich radiálních vzdáleností od pozorovatele. Ve zmíněné kapitole 8.3 je tato závislost pro data z BATSE 3B katalogu vynesena a porovnána s třípolovinovým zákonem, který značí homogenní rozdělení GRB v Euklidovském prostoru bez absorpce. V této kapitole je popsána ta samá závislost sestavená z dat získaných družicí RHESSI. Dále je zde popsán test  $V/V_{\max}$ , který číselně ohodnocuje odchylku od homogenního rozdělení zdrojů gama záblesků v prostoru. Nejprve se podíváme na závislost  $\log N$  vs.  $\log P$  (Obrázky 14.1. až 14.3.), ve které bylo použito všech 228 GRB uvedených v katalogu v kapitole 16, a kde byla ona závislost provedena zvlášť pro krátké ( $T_{90} < 2$  s) a zvlášť pro dlouhé ( $T_{90} > 2$  s) záblesky. V následujících grafech je vynášena veličina  $P$  „peak flux“ či spíše maximální „count rate“ v jednotkách „counts“ $\cdot$ s $^{-1}$  integrovaná přes energetický obor 25 – 1500 keV.



Obrázky 14.1. Závislost počtu  $\gamma$ -záblesků, jejichž maximální hustota zářivého toku  $P$  je větší než daná hodnota  $P_i$  pro všech 228 GRB ze sestaveného RHESSI katalogu. Rovná přímka představuje tzv. třípolovinový zákon. V logaritmické škále je její sklon roven  $-3/2$ . Na grafu je vidět patrný odklon od této přímky.



Obrázky 14.2. Závislost počtu  $\gamma$ -záblesků, jejichž maximální hustota zářivého toku  $P$  je větší než daná hodnota  $P_i$  pro 195 dlouhých ( $T_{90} > 2$  s) GRB ze sestaveného RHESSI katalogu. Rovná přímka představuje tzv. třípolovinový zákon.



Obrázky 14.3. Závislost počtu  $\gamma$ -záblesků, jejichž maximální hustota zářivého toku  $P$  je větší než daná hodnota  $P_i$  pro 33 krátkých ( $T_{90} < 2$  s) GRB ze sestaveného RHESSI katalogu. Rovná přímka představuje tzv. třípolovinový zákon.

Odchylka slabých gama záblesků (tedy těch vzdálenějších za předpokladu standardní svíčky) od třípolovinového zákona by moha být vysvětlena hned několika jevy. Za prvé pokud by nebyl splněn některý výše zmíněný předpoklad např., že nedochází k absorpci. Tento předpoklad je však podle Salamona & Steckera (1998) velmi dobře splněn, neboť jak

tvrdí, absorpce  $\gamma$ -gama záření o energiích menších než 10 GeV (což je mnohem více, než energie fotonů detekovaných pomocí RHESSI) je v mezigalaktickém prostředí naprosto zanedbatelná. Dalším faktem, jenž může být za odchylkou slabých gama záblesků od třípolovinového zákona, může být to, že na velkých vzdálenostech řádu miliard světelných let nemůže být brán prostor za Euklidovský. S tím souvisí i ten fakt, že energie velmi vzdálených gama záblesků může být díky kosmologickému rudému posuvu posunuta k nižším hodnotám, v nichž nemá detektor potřebnou citlivost. Dále si musíme uvědomit, že pokud současně pozorujeme dvě skupiny astronomických objektů, které jsou od nás různě vzdáleny, potom ovšem pozorujeme vzdálenější objekty jak „vypadaly“ (včetně jejich četnosti) v dálnější minulosti než objekty bližší. Svoji roli může tedy hrát i evoluce zdrojů GRB. Odklon od třípolovinového zákona by také mohlo být způsobeno i instrumentálním efektem a sice, že se nedaří detekovat všechny slabší záblesky díky dané úrovni spouštěcího prahu detektoru, či díky veliké úrovni pozadí. Který z těchto jevů převažuje, je otázkou podrobnějšího studia.

V následující části je popsán  $V/V_{\max}$  test, který poprvé navrhl Schmidt (1968) pro quasary a poté použil i pro gama záblesky (Schmidt *et al.* 1988). Tento test umožňuje kvantitativně ohodnotit rovnoměrnost rozdělení radiálních vzdáleností objektů od pozorovatele. Test je založen na porovnávání veličin „peak fluxes“ (či spíše „peak count“) v jednotkách počtu registrovaných fotonů („counts“) v daném časovém intervalu. Idea tohoto testu spočívá v určení poměru kulového objemu  $V$  (jehož poloměr odpovídá skutečné, avšak námi neznámé radiální vzdálenosti  $r$ ) a maximálního objemu  $V_{\max}$  (jehož poloměr je  $r_{\max}$ ), ve kterém by byl daný záblesk ještě detekovatelný. Mějme „peak flux“ („peak count“)  $P$  integrovaný přes daný časový interval (jím bývá časové rozlišení profilu gama záblesku) a mějme minimální (prahovou) detekovatelnou hustotu toku  $P_{\lim}$ . Pokud je  $r$  neznámá vzdálenost zdroje, tak se ptáme, v jaké maximální vzdálenosti  $r_{\max}$  může být daný gama záblesk pozorovatelný. V podstatě pomyslně umístíme daný zdroj (podél zorného paprsku) do vzdálenosti  $r_{\max}$ , pak bude jeho „peak flux“ rovno  $P_{\lim}$ . Za předpokladu Euklidovského prostoru bude pozorovaná hustota toku klesat s  $r^{-2}$ , a tak bude  $r_{\max}$  rovno:

$$r_{\max} = r \left( \frac{P}{P_{\lim}} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14.1)$$

Rozdělení radiálních vzdáleností poměřujeme poměrem objemem  $V$  (daného poloměrem  $r$ ) a maximálního objemu  $V_{\max}$  (daného maximální vzdáleností  $r_{\max}$ ). Poměr těchto dvou objemů je úměrný  $(r/r_{\max})^3$ , a tak:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left( \frac{P}{P_{\lim}} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (14.2)$$

Pokud máme soubor gama záblesků, jejichž zdroje jsou v prostoru rozděleny homogenně, potom  $V/V_{\max}$  dají rovnoměrné rozdělení od 0 do 1 se střední hodnotou:

$$\left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle = \frac{1}{2} \quad (14.3)$$

a standardní odchylkou  $\sigma$ :

$$\sigma = (12N)^{-\frac{1}{2}}, \quad (14.4)$$

kde  $N$  je počet zkoumaných objektů.

Pokud jsou objekty rozmístěny v prostoru nehomogenně tak, že jsou nakupeny spíše v blízké části maximálního dosažitelného objemu  $V_{\max}$ , tak budou převládat malé hodnoty poměru  $V/V_{\max}$ . Naopak pokud jsou nakupeny spíše ve vzdálené oblasti maximálního objemu  $V_{\max}$  (jak bylo pozorováno pro quasary (Schmidt 1968)), tak budou převládat větší hodnoty poměru  $V/V_{\max}$ . Jak uvádí Guetta & Piran (2006) výsledek tohoto testu pro gama záblesky pozorované aparaturou BATSE je:

$$\text{pro krátké GRB } \left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle_{\text{short}} = 0,39 \pm 0,02 \quad (14.5)$$

$$\text{pro dlouhé GRB } \left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle_{\text{long}} = 0,29 \pm 0,01 .$$

Z výsledků (14.5) je vidět, že pokud lze považovat prostor do vzdáleností výskytu zdrojů GRB Euklidovský, tak v něm nejsou tyto objekty rozmístěny homogenně. Více nehomogenní se podle tohoto testu jeví rozložení dlouhých gama záblesků než krátkých.

Pro gama záblesky pozorované pomocí družice RHESSI byly obdrženy tyto výsledky:

$$\text{pro krátké GRB } \left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle_{\text{short}} = 0,14 \pm 0,05 \quad (14.6)$$

$$\text{pro dlouhé GRB } \left\langle \frac{V}{V_{\max}} \right\rangle_{\text{long}} = 0,09 \pm 0,02 ,$$

kde za limitní  $P_{\text{lim}}$  byl brán „peak flux“ od nejslabšího detekovaného záblesku v dané podskupině. Porovnáním (14.5) a (14.6) zjistíme, že výsledky z družice RHESSI nejsou v tomto testu ve shodě s výsledky z přístroje BATSE, a to ani v rámci uvedených chyb.

Neshoda může být způsobena tím, že naše databáze GRB RHESSI (viz kapitola 16) obsahuje hodnoty  $P$  v jednotkách „counts“.s<sup>-1</sup>, ačkoliv přesně vzato by peak flux měl být přepočítán na efektivní plochu detektoru (tedy v jednotkách „counts“.s<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>). Efektivní plocha detektoru ovšem není konstantní. Je funkcí jak směru příchodu gama záření do detektoru, tak energii samotných detekovaných gama fotonů. Tento technický problém by mohl zkreslit výsledek (14.6). Další vliv na výsledek může mít vlastní volba  $P_{\text{lim}}$ . Vzhledem k tomu, že signál na detektoru RHESSI byl složen z vlastního signálu GRB a šumu pozadí, které se měnilo v řádu desítek minut a které bylo místy relativně veliké (vzhledem k velikosti signálu od GRB), lze očekávat, že se měnil i samotný detekční práh.

I přes okolnosti výše popsané, lze na výsledku RHESSI pozorovat jednu shodu s výsledkem z přístroje BATSE, a sice to, že v obou případech se jeví prostorové rozdělení dlouhých gama záblesků více nehomogenní než u krátkých.

## 15 Hardness ratio vs. $T_{90}$

V této kapitole se pojdme krátce podívat na závislost mezi veličinami hardness ratio  $H$  a časem  $T_{90}$ . Pomocí hardness ratio se vyjadřuje tvrdost spektra GRB. Je to podíl dvou různých hustot detekovaných zářivých toků během času  $T_{90}$  integrovaných přes dva různé energetické kanály. Zkráceně je to podíl dvou různých fluence  $F$ . Na hardness ratio lze pohlížet jako na analogii barevnému indexu např.  $-(B - V)$  známém z fotometrie v optickém oboru. Konkrétně zde máme tři energetické kanály:

$F_{1\_T90}$  je fluence v energetickém kanálu 25 – 120 keV

$F_{2\_T90}$  je fluence v energetickém kanálu 120 – 400 keV

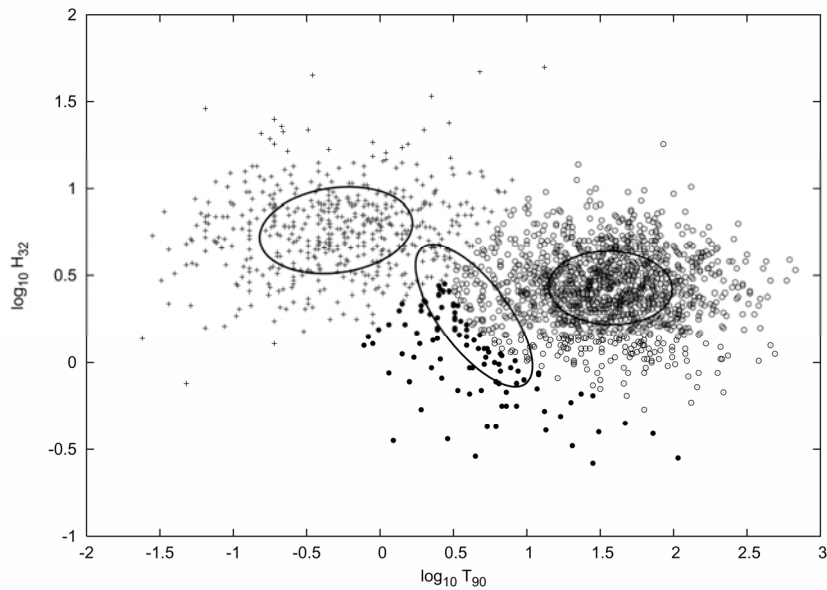
$F_{3\_T90}$  je fluence v energetickém kanálu 400 – 1500 keV

Příslušné hardness ratio jsou definovány následovně:

$$H_{21} = \frac{F_{2\_T90}}{F_{1\_T90}}, \quad H_{31} = \frac{F_{3\_T90}}{F_{1\_T90}}$$

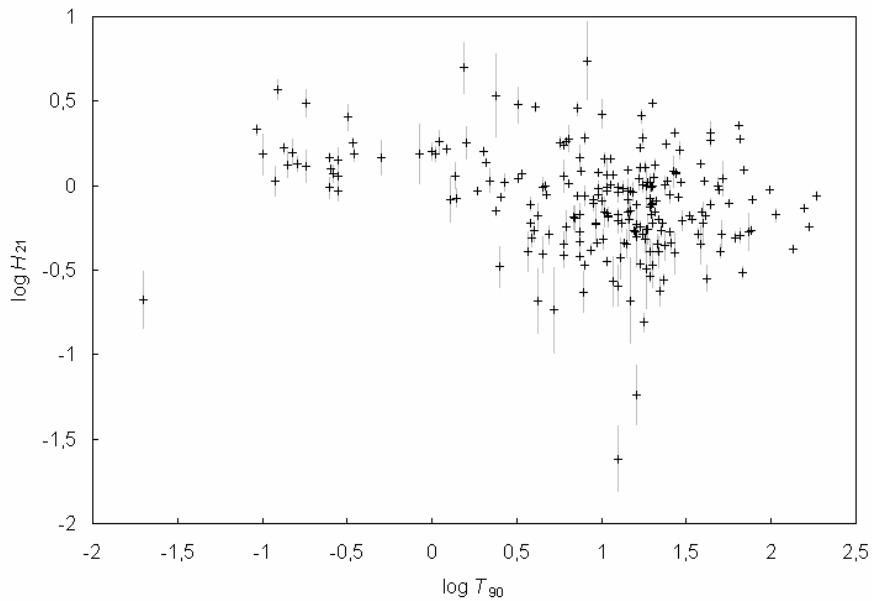
$$H_{32} = \frac{F_{3\_T90}}{F_{2\_T90}}, \quad H_{23\_1} = \frac{F_{2\_T90} + F_{3\_T90}}{F_{1\_T90}}.$$
(15.1)

Pokud vyneseme do grafu závislost hardness ratio na času  $T_{90}$  charakterizující délku gama záblesku, zjistíme, že různé podskupiny GRB (z hlediska jejich délek) mají i jiné vlastnosti z pohledu veličiny hardness ratio. Jak ukázal Horváth *et al.* (2004) či později v článku Horváth *et al.* (2006) na datech z BATSE Current katalogu, lze v tomto 2D prostoru statistickou metodou (Maximum Likelihood procedure) nalézt tři podskupiny GRB (viz Obrázek 15.1).

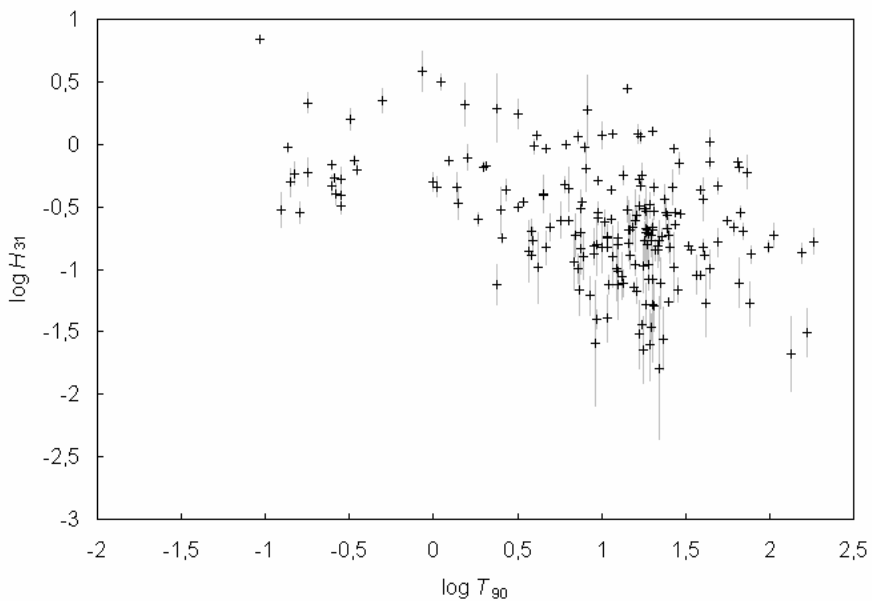


Obrázek 15.1. Ukázka rozdělení 1956 GRB z BATSE Current katalogu v  $\{\log T_{90}; \log H_{32}\}$  prostoru. V grafu jsou zobrazeny  $1-\sigma$  elipsy tří-Gaussovského rozdělení, které bylo získáno metodou ML (Maximum Likelihood). Různé symboly značí gama záblesky patřící do různých podskupin. Graf byl převzat z článku Horváth *et al.* (2006).

Na následujících Obrázcích 15.2 až 15.5 jsou vyneseny údaje pro gama záblesky pozorované družicí RHESSI z tabulky 16.1 na konci této práce. Na první pohled je patrné rozdělení podobné rozdělení na Obrázku 15.1. Pro detailnější studium tohoto rozdělení v 2D prostoru se doporučuje použít např. clusterovou analýzu či metodu použitou Horváthem *et al.* (2006), která by jasně určila počet podskupin gama záblesků a případně i jejich další vlastnosti, jako např. střední hardness ratio. Vzhledem k tomu, že databáze GRB RHESSI stále narůstá (toho času), bylo by vhodné (z důvodů přesnosti) použít případnou další detailnější analýzu pro větší soubor naměřených gama záblesků.

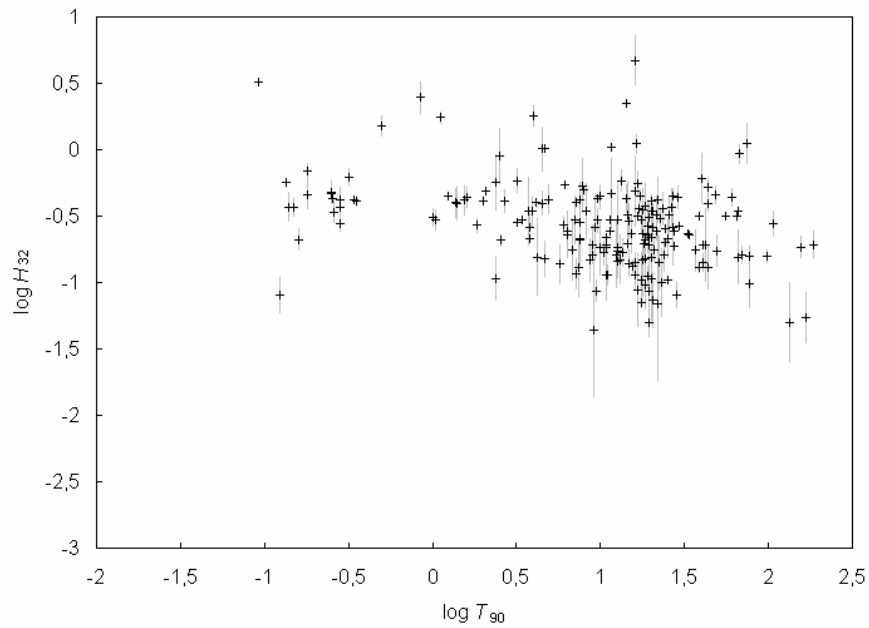


Obrázek 15.2. Rozdělení hardness ratio  $H_{21}$  na času  $T_{90}$  pro soubor gama záblesků pozorovaných pomocí RHESSI. Na grafu jsou pro  $H_{21}$  uvedeny chyby měření.

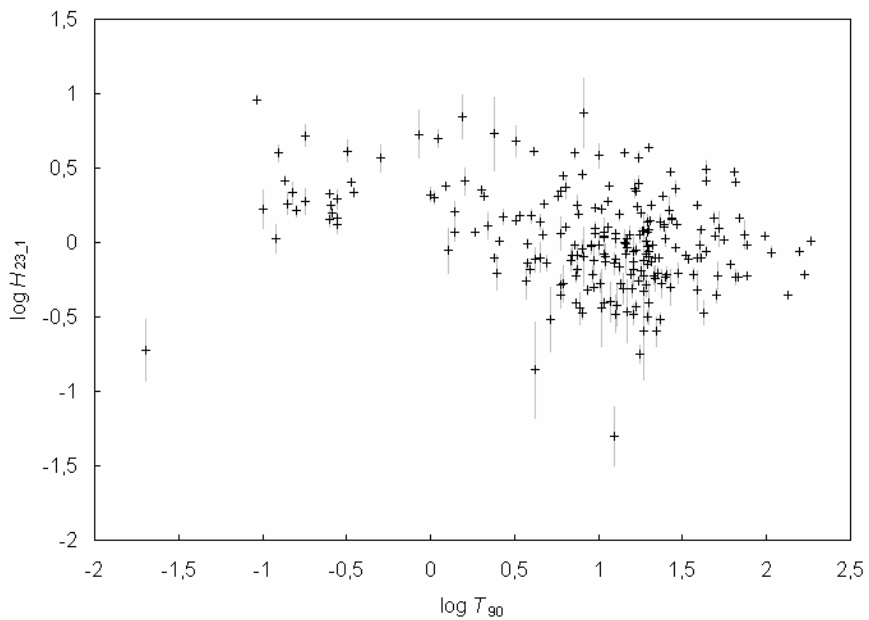


Obrázek 15.3. Rozdělení hardness ratio  $H_{31}$  na času  $T_{90}$  pro soubor gama záblesků pozorovaných pomocí RHESSI. Na grafu jsou pro  $H_{31}$  uvedeny chyby měření.





Obrázek 15.4. Rozdělení hardness ratio  $H_{32}$  na času  $T_{90}$  pro soubor gama záblesků pozorovaných pomocí RHESSI. Na grafu jsou pro  $H_{32}$  uvedeny chyby měření.



Obrázek 15.5. Rozdělení hardness ratio  $H_{23,1}$  na času  $T_{90}$  pro soubor gama záblesků pozorovaných pomocí RHESSI. Na grafu jsou pro  $H_{23,1}$  uvedeny chyby měření.

## 16 Databáze GRB RHESSI

Kromě prostudování různých závislostí mezi veličinami popisujících gama záblesky a prostudování různých podskupin GRB, bylo součástí této práce i obstarání si potřebných dat. Příslušnými daty jsou myšleny veličiny jako peak flux, fluence, hardness ratio, časy  $T_{90}$  atd. pro soubor gama záblesků detekovaných družicí RHESSI. Hodnoty všech těchto veličin jsou sestaveny v Tabulce 16.1. Obstaráním dat je taktéž myšleno získání světelných křivek, a to ve třech energetických kanálech (popsaných níže). Katalog těchto světelných křivek však není v této práci z úsporných důvodů uveden, nicméně jsou zde uvedeny jejich morfologické typy. Potřebná data byla získávána pomocí programu SSW IDL a příslušnými procedurami ze souborů fits (obsahujících měření), které byly poskytnuty ústavem PSI, Villigen, Švýcarsko.

Sestavený katalog (uvedený na několika následujících stranách), obsahuje celkem 228 zábleskových zdrojů záření gama. Jde o soubor naměřený od poloviny února 2002 do konce ledna 2006. Na tomto místě je třeba říci, jakým způsobem byl zmíněný katalog sestaven. Pokud bylo zjištěno, že globální síť sledující gama záblesky GCN<sup>1</sup> (jde o síť shromažďující informace o GRB z družic: Swift, HETE-II, Integral, Ulysses a XTE) nebo IPN<sup>2</sup> zaznamenala v určitém čase gama záblesk, tak byl onen záblesk dohledáván v měřeních družice RHESSI. Pokud bylo zjištěno, že i družice RHESSI onen gama záblesk pozorovala, tak byly informace o něm získané uvedeny do seznamu<sup>3</sup> záblesků pozorovaných touto družicí. Podle tohoto seznamu byl používán výše zmíněný program SSW IDL, a tak získávány další hodnoty veličin uvedených v našem katalogu GRB RHESSI (Tabulka 16.1).

Jak světelné křivky tak veličiny fluence a hardness ratio byly vysčítány ve třech energetických kanálech: první kanál – 25 až 120 keV, druhý kanál – 120 až 400 keV a třetí kanál – 400 až 1500 keV. Před dalším zpracováním, tedy před určením hodnot následujících veličin, bylo fitováno pozadí (buď lineární či kvadratickou funkcí) a odečítáno.

Popis veličin v Tabulce 16.1 je následující:

Peak flux  $P$  je vysčítán přes energie od 25 až 1500 keV.

Fluence  $F_{1\_T90}$  je vysčítán přes čas  $T_{90}$  a první kanál (25 až 120 keV).

Fluence  $F_{2\_T90}$  je vysčítán přes čas  $T_{90}$  a druhý kanál (120 až 400 keV).

Fluence  $F_{3\_T90}$  je vysčítán přes čas  $T_{90}$  a třetí kanál (400 až 1500 keV).

Fluence  $F_{T90}$  je vysčítán přes čas  $T_{90}$  a všechny tři kanály (25 až 1500 keV).

Veličiny Hardness ratio jsou definované v kapitole 15.

Dále jsou v katalogu uvedeny pro každý gama záblesk hodnoty signálu ku šumu  $S/N$  (přes celý rozsah 25 až 1500 keV) a je zde uvedena i morfologická skupina  $MT$ , klasifikovaná podle tvaru světelné křivky a podle dělení uvedeném v kapitole 12. U některých gama záblesků nebylo možné jednoznačně určit, do které morfologické skupiny patří, a tak není v tabulce uvedena. Chybějící hodnoty některých veličin jsou zapříčiněny malým poměrem signálu ku šumu v určitém energetickém kanálu.

---

<sup>1</sup> The Gamma ray bursts Coordinates Network (bližší informace na webové adrese: [gcn.gsfc.nasa.gov](http://gcn.gsfc.nasa.gov) )

<sup>2</sup> The Third InterPlanetary Network (bližší informace na webové adrese: [www.ssl.berkeley.edu/ipn3](http://www.ssl.berkeley.edu/ipn3) )

<sup>3</sup> tento seznam je dostupný na internetové adrese: [grb.web.psi.ch](http://grb.web.psi.ch)

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 020214	14,20	14-Feb-2002 18:49:37,80	14-Feb-2002 18:49:47,70	8 532,0	2 274,1 ± 77,3	2 810,4 ± 77,8
GRB 020218b	34,00	18-Feb-2002 19:49:11,00	18-Feb-2002 19:49:41,75	3 571,3	11 993,9 ± 157,3	7 546,1 ± 127,4
GRB 020302	48,80	2-Mar-2002 12:23:19,60	2-Mar-2002 12:23:54,40	597,5	3 042,1 ± 310,8	3 046,7 ± 282,5
GRB 020306	0,14	6-Mar-2002 18:58:02,84	6-Mar-2002 18:58:02,89	8 875,1	263,8 ± 22,3	439,6 ± 24,8
GRB 020311	10,80	11-Mar-2002 01:21:31,10	11-Mar-2002 01:21:31,55	1 490,0	2 397,8 ± 158,4	2 354,6 ± 142,1
GRB 020313	23,20	13-Mar-2002 01:17:39,60	13-Mar-2002 01:17:53,40	912,6	6 630,0 ± 217,8	1 834,8 ± 181,5
GRB 020315	12,60	15-Mar-2002 15:42:45,00	15-Mar-2002 15:42:47,55	499,1	1 229,0 ± 145,8	1 124,2 ± 125,1
GRB 020407	21,00	7-Apr-2002 04:14:34,40	7-Apr-2002 04:14:44,30	796,5	4 945,9 ± 199,5	4 045,2 ± 182,3
GRB 020413	9,00	13-Apr-2002 16:20:14,40	13-Apr-2002 16:20:15,50	1 051,4	1 520,0 ± 132,1	1 191,2 ± 117,7
GRB 020418	3,40	18-Apr-2002 17:43:07,50	18-Apr-2002 17:43:08,85	5 616,8	2 854,1 ± 114,5	3 333,2 ± 91,8
GRB 020430	13,50	30-Apr-2002 21:21:51,60	30-Apr-2002 21:22:01,65	1 138,6	4 578,8 ± 158,5	2 087,0 ± 128,5
GRB 020515	0,02	15-May-2002 01:26:41,07	15-May-2002 01:26:41,07	4 230,8	48,4 ± 8,6	10,2 ± 4,7
GRB 020525	0,18	25-May-2002 04:26:53,18	25-May-2002 04:26:53,21	3 291,8	97,6 ± 20,1	126,5 ± 20,3
GRB 020603	1,40	3-Jun-2002 17:50:34,70	3-Jun-2002 17:50:34,88	1 519,9	322,0 ± 36,5	272,4 ± 28,7
GRB 020604	7,20	4-Jun-2002 14:13:37,30	4-Jun-2002 14:13:42,85	1 151,5	2 206,6 ± 114,7	1 915,0 ± 94,6
GRB 020625	18,40	25-Jun-2002 11:25:45,80	25-Jun-2002 11:25:48,60	227,3	688,8 ± 181,8	682,5 ± 157,1
GRB 020708	27,00	8-Jul-2002 04:34:11,00	8-Jul-2002 04:34:12,50	393,3	1 370,9 ± 204,6	544,5 ± 166,5
GRB 020715	6,40	15-Jul-2002 19:21:03,00	15-Jul-2002 19:21:09,10	10 067,1	7 602,1 ± 134,1	7 785,9 ± 121,4
GRB 020801	4,50	1-Aug-2002 11:52:33,60	1-Aug-2002 11:52:41,55	393,1	453,4 ± 54,7	178,3 ± 48,9
GRB 020819	9,20	19-Aug-2002 14:57:36,00	19-Aug-2002 14:57:38,60	1 029,7	1 974,0 ± 136,4	1 158,0 ± 127,7
GRB 020910	16,50	10-Sep-2002 19:57:28,00	10-Sep-2002 19:57:43,25	640,4	691,6 ± 92,5	755,9 ± 87,4
GRB 020926	22,40	26-Sep-2002 04:52:40,20	26-Sep-2002 04:52:54,20	616,6	3 549,9 ± 210,9	1 940,1 ± 192,1
GRB 021008a	11,60	8-Oct-2002 07:00:50,80	8-Oct-2002 07:01:03,50	18 864,1	17 012,9 ± 164,8	19 810,4 ± 155,1
GRB 021008b	14,20	8-Oct-2002 14:29:58,20	8-Oct-2002 14:30:04,50	555,7	1 329,3 ± 156,7	934,3 ± 130,1
GRB 021016	74,00	16-Oct-2002 10:28:32,00	16-Oct-2002 10:29:25,00	138,3	1 193,3 ± 194,4	634,0 ± 164,9
GRB 021020	14,40	20-Oct-2002 20:12:48,80	20-Oct-2002 20:12:57,35	2 275,4	6 626,7 ± 182,9	5 463,0 ± 166,7
GRB 021023	13,40	23-Oct-2002 02:53:41,40	23-Oct-2002 02:53:47,30	626,4	1 089,0 ± 88,9	1 053,2 ± 83,5
GRB 021025	18,60	25-Oct-2002 20:18:21,90	25-Oct-2002 20:18:30,15	666,3	1 249,5 ± 174,3	687,9 ± 143,6
GRB 021102	10,80	2-Nov-2002 15:58:30,80	2-Nov-2002 15:58:31,85	1 729,0	4 258,9 ± 146,5	1 509,3 ± 118,9
GRB 021108	22,00	8-Nov-2002 05:39:55,20	8-Nov-2002 05:39:55,80	1 072,1	3 211,8 ± 200,7	757,5 ± 165,7
GRB 021109	19,60	9-Nov-2002 08:42:34,80	9-Nov-2002 08:42:49,00	894,1	2 251,0 ± 184,4	1 726,1 ± 155,9

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3-T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23-1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 020214	6 301,6 ± 149,5	11 386,1 ± 185,4	4,007 ± 0,155	2,771 ± 0,115	2,242 ± 0,082	1,236 ± 0,054	61,4	II
GRB 020218b	1 730,8 ± 149,9	21 270,8 ± 251,8	0,773 ± 0,019	0,144 ± 0,013	0,229 ± 0,020	0,629 ± 0,013	84,5	II
GRB 020302	1 401,8 ± 226,0	7 490,6 ± 477,0	1,462 ± 0,191	0,461 ± 0,088	0,460 ± 0,086	1,002 ± 0,138	15,7	
GRB 020306	248,2 ± 20,3	951,7 ± 39,1	2,607 ± 0,251	0,941 ± 0,111	0,565 ± 0,056	1,666 ± 0,169	24,4	I
GRB 020311	433,6 ± 116,9	5 186,0 ± 242,8	1,163 ± 0,109	0,181 ± 0,050	0,184 ± 0,051	0,982 ± 0,088	21,4	II
GRB 020313	183,6 ± 153,2	8 648,4 ± 322,3	0,304 ± 0,037	0,028 ± 0,023	0,100 ± 0,084	0,277 ± 0,029	26,8	II
GRB 020315	191,6 ± 109,8	2 544,9 ± 221,2	1,071 ± 0,186	0,156 ± 0,091	0,170 ± 0,099	0,915 ± 0,149	11,5	
GRB 020407	708,3 ± 165,9	9 699,3 ± 317,2	0,961 ± 0,063	0,143 ± 0,034	0,175 ± 0,042	0,818 ± 0,049	30,6	IV
GRB 020413	231,0 ± 93,6	2 942,2 ± 200,2	0,936 ± 0,128	0,152 ± 0,063	0,194 ± 0,081	0,784 ± 0,103	14,7	
GRB 020418	994,4 ± 65,8	7 181,7 ± 160,8	1,516 ± 0,073	0,348 ± 0,027	0,298 ± 0,021	1,168 ± 0,057	44,7	II
GRB 020430	353,6 ± 104,8	7 019,4 ± 229,4	0,533 ± 0,041	0,077 ± 0,023	0,169 ± 0,051	0,456 ± 0,032	30,6	II
GRB 020515		57,6 ± 10,2	0,188 ± 0,119			0,210 ± 0,103	5,6	
GRB 020525	58,5 ± 15,6	282,6 ± 32,6	1,896 ± 0,471	0,599 ± 0,202	0,462 ± 0,144	1,296 ± 0,339	8,7	
GRB 020603	108,2 ± 39,5	702,6 ± 61,0	1,182 ± 0,202	0,336 ± 0,128	0,397 ± 0,151	0,846 ± 0,131	11,5	
GRB 020604	222,9 ± 72,8	4 344,6 ± 165,6	0,969 ± 0,074	0,101 ± 0,033	0,116 ± 0,038	0,868 ± 0,062	26,2	
GRB 020625	144,3 ± 128,2	1 515,5 ± 272,3	1,200 ± 0,432	0,210 ± 0,194	0,211 ± 0,194	0,991 ± 0,347	5,6	
GRB 020708	142,7 ± 134,4	2 058,2 ± 296,0	0,501 ± 0,173	0,104 ± 0,099	0,262 ± 0,260	0,397 ± 0,135	7,0	
GRB 020715	1 884,6 ± 82,9	17 272,6 ± 199,0	1,272 ± 0,030	0,248 ± 0,012	0,242 ± 0,011	1,024 ± 0,024	86,8	II
GRB 020801	180,8 ± 76,0	812,5 ± 105,7	0,792 ± 0,221	0,399 ± 0,174	1,014 ± 0,509	0,393 ± 0,118	7,7	
GRB 020819	50,9 ± 114,8	3 182,9 ± 219,3	0,612 ± 0,097	0,026 ± 0,058	0,044 ± 0,099	0,587 ± 0,076	14,5	
GRB 020910	837,4 ± 133,2	2 284,9 ± 184,3	2,304 ± 0,385	1,211 ± 0,252	1,108 ± 0,218	1,093 ± 0,193	12,4	
GRB 020926	272,8 ± 172,2	5 762,7 ± 333,2	0,623 ± 0,082	0,077 ± 0,049	0,141 ± 0,090	0,547 ± 0,063	17,3	IV
GRB 021008a	20 726,1 ± 175,5	57 549,4 ± 286,4	2,383 ± 0,027	1,218 ± 0,016	1,046 ± 0,012	1,164 ± 0,015	201,0	II
GRB 021008b	397,7 ± 106,9	2 661,3 ± 230,0	1,002 ± 0,173	0,299 ± 0,088	0,426 ± 0,129	0,703 ± 0,128	11,6	
GRB 021016	712,6 ± 257,2	2 539,9 ± 362,1	1,128 ± 0,315	0,597 ± 0,236	1,124 ± 0,500	0,531 ± 0,163	7,0	
GRB 021020	1 067,3 ± 145,6	13 157,1 ± 287,1	0,985 ± 0,043	0,161 ± 0,022	0,195 ± 0,027	0,824 ± 0,034	45,8	II
GRB 021023	617,3 ± 130,9	2 759,5 ± 179,0	1,534 ± 0,190	0,567 ± 0,129	0,586 ± 0,133	0,967 ± 0,110	15,4	
GRB 021025	256,3 ± 122,5	2 193,7 ± 256,9	0,756 ± 0,184	0,205 ± 0,102	0,373 ± 0,194	0,551 ± 0,138	8,5	
GRB 021102	172,0 ± 99,0	5 940,2 ± 213,1	0,395 ± 0,039	0,040 ± 0,023	0,114 ± 0,066	0,354 ± 0,030	27,9	II
GRB 021108	51,9 ± 145,5	4 021,2 ± 298,1	0,252 ± 0,070	0,016 ± 0,045	0,068 ± 0,193	0,236 ± 0,054	13,5	III
GRB 021109	381,0 ± 136,0	4 358,1 ± 277,2	0,936 ± 0,120	0,169 ± 0,062	0,221 ± 0,081	0,767 ± 0,094	15,7	

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1-T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2-T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 021115	12,60	15-Nov-2002 13:32:58,10	15-Nov-2002 13:33:04,25	504,5	1 389,9 ± 146,5	355,7 ± 119,5
GRB 021119	16,80	19-Nov-2002 12:53:53,20	19-Nov-2002 12:54:07,80	550,2	1 727,8 ± 98,5	992,4 ± 87,7
GRB 021125	67,50	25-Nov-2002 17:57:30,00	25-Nov-2002 17:58:30,75	373,9	6 425,7 ± 209,5	1 967,8 ± 190,0
GRB 021201	0,34	1-Dec-2002 05:30:04,07	1-Dec-2002 05:30:04,18	9 399,0	388,1 ± 29,6	692,3 ± 31,6
GRB 021205	76,50	5-Dec-2002 03:17:17,00	5-Dec-2002 03:18:29,75	578,2	8 251,0 ± 353,5	4 495,4 ± 282,9
GRB 021206	4,70	6-Dec-2002 22:49:14,00	6-Dec-2002 22:49:16,95	23 849,1	19 210,1 ± 149,6	16 983,8 ± 138,9
GRB 021211	2,50	11-Dec-2002 11:18:32,50	11-Dec-2002 11:18:34,85	585,4	317,3 ± 38,2	105,0 ± 33,1
GRB 021214	30,00	14-Dec-2002 03:27:14,00	14-Dec-2002 03:27:25,50	281,7	2 180,5 ± 219,3	1 345,9 ± 173,4
GRB 021223	6,00	23-Dec-2002 01:09:55,10	23-Dec-2002 01:10:01,55	308,3	388,9 ± 59,1	443,1 ± 92,3
GRB 021226	0,35	26-Dec-2002 14:53:38,85	26-Dec-2002 14:53:39,68	5 646,1	338,6 ± 30,7	518,3 ± 31,2
GRB 030102	13,20	2-Jan-2003 23:18:52,30	2-Jan-2003 23:18:59,35	1 064,1	1 983,3 ± 149,4	1 182,1 ± 123,5
GRB 030105	1,23	5-Jan-2003 14:34:11,29	5-Jan-2003 14:34:12,00	4 572,0	572,0 ± 48,8	938,9 ± 45,6
GRB 030110	0,10	10-Jan-2003 09:39:30,15	10-Jan-2003 09:39:30,23	977,9	34,9 ± 8,9	53,7 ± 12,5
GRB 030115b	64,80	15-Jan-2003 06:24:29,60	15-Jan-2003 06:25:21,80	680,5	3 807,1 ± 182,4	8 692,2 ± 281,1
GRB 030115c	23,50	15-Jan-2003 08:15:31,50	15-Jan-2003 08:15:45,25	297,5	1 274,8 ± 110,3	1 283,5 ± 156,3
GRB 030204	56,00	4-Feb-2003 12:45:27,00	4-Feb-2003 12:45:36,50	2 093,1	17 651,9 ± 380,7	13 859,8 ± 315,3
GRB 030206	0,14	6-Feb-2003 11:00:31,98	6-Feb-2003 11:00:32,01	3 945,8	105,6 ± 18,4	140,5 ± 17,7
GRB 030208	16,00	8-Feb-2003 07:51:55,20	8-Feb-2003 07:52:06,20	367,2	619,8 ± 173,6	310,2 ± 141,1
GRB 030216	9,30	16-Feb-2003 16:13:39,50	16-Feb-2003 16:13:44,15	545,0	741,7 ± 126,2	445,5 ± 110,0
GRB 030223	20,50	23-Feb-2003 09:44:51,00	23-Feb-2003 09:45:15,25	925,2	2 518,8 ± 202,7	3 337,0 ± 198,9
GRB 030225	20,00	25-Feb-2003 15:02:44,50	25-Feb-2003 15:02:53,75	527,7	2 914,9 ± 180,9	1 749,8 ± 146,7
GRB 030227	18,50	27-Feb-2003 08:41:58,00	27-Feb-2003 08:42:08,25	214,3	838,1 ± 174,5	
GRB 030228	29,00	28-Feb-2003 20:26:39,00	28-Feb-2003 20:26:47,25	859,3	1 295,3 ± 134,6	2 084,4 ± 211,1
GRB 030301	52,00	1-Mar-2003 20:27:13,00	1-Mar-2003 20:27:24,50	158,4	1 066,1 ± 172,2	1 173,0 ± 271,6
GRB 030306	12,60	6-Mar-2003 03:38:01,90	6-Mar-2003 03:38:16,15	2 719,1	6 158,0 ± 172,1	4 122,2 ± 157,2
GRB 030307	3,80	7-Mar-2003 14:31:56,60	7-Mar-2003 14:31:58,95	7 539,4	5 859,1 ± 108,0	3 541,4 ± 85,4
GRB 030320a	44,00	20-Mar-2003 10:11:31,00	20-Mar-2003 10:12:34,50	661,2	1 833,7 ± 157,4	3 397,6 ± 206,0
GRB 030320b	156,00	20-Mar-2003 18:48:58,00	20-Mar-2003 18:49:35,50	634,4	12 350,6 ± 517,8	9 002,0 ± 427,0
GRB 030329a	17,40	29-Mar-2003 11:37:25,70	29-Mar-2003 11:37:40,85	11 819,3	41 361,7 ± 270,2	21 249,4 ± 219,5
GRB 030329b	61,00	29-Mar-2003 15:34:10,00	29-Mar-2003 15:34:18,50	563,1	6 294,1 ± 325,5	3 107,6 ± 268,8
GRB 030331	10,00	31-Mar-2003 05:38:36,00	31-Mar-2003 05:38:49,25	399,4	357,7 ± 75,2	947,2 ± 102,1

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 021115	105,1 ± 97,9	1 850,8 ± 212,9	0,332 ± 0,117	0,076 ± 0,071	0,296 ± 0,293	0,256 ± 0,090	8,7	
GRB 021119	554,1 ± 134,4	3 274,3 ± 188,3	0,895 ± 0,106	0,321 ± 0,080	0,558 ± 0,144	0,574 ± 0,060	17,4	IV
GRB 021125	1 825,0 ± 308,9	10 218,5 ± 418,9	0,590 ± 0,060	0,284 ± 0,049	0,927 ± 0,181	0,306 ± 0,031	24,4	
GRB 021201	289,5 ± 22,9	1 369,9 ± 49,0	2,530 ± 0,218	0,746 ± 0,082	0,418 ± 0,038	1,784 ± 0,159	28,0	
GRB 021205	437,6 ± 232,8	13 184,0 ± 509,1	0,598 ± 0,051	0,053 ± 0,028	0,097 ± 0,052	0,545 ± 0,041	25,9	
GRB 021206	17 539,7 ± 154,1	53 733,6 ± 255,8	1,797 ± 0,018	0,913 ± 0,011	1,033 ± 0,012	0,884 ± 0,010	210,1	IV
GRB 021211	93,5 ± 52,8	515,8 ± 73,0	0,626 ± 0,210	0,295 ± 0,170	0,890 ± 0,575	0,331 ± 0,112	7,1	
GRB 021214		3 533,7 ± 313,6	0,621 ± 0,120			0,617 ± 0,101	11,3	
GRB 021223		832,7 ± 140,0	1,141 ± 0,369			1,139 ± 0,294	5,9	
GRB 021226	212,9 ± 23,4	1 069,8 ± 49,7	2,160 ± 0,227	0,629 ± 0,090	0,411 ± 0,052	1,531 ± 0,167	21,5	I
GRB 030102	175,3 ± 97,4	3 340,7 ± 216,9	0,684 ± 0,095	0,088 ± 0,050	0,148 ± 0,084	0,596 ± 0,077	15,4	
GRB 030105	422,4 ± 35,1	1 933,3 ± 75,5	2,380 ± 0,227	0,738 ± 0,088	0,450 ± 0,043	1,642 ± 0,161	25,6	IV
GRB 030110		93,7 ± 18,5	1,681 ± 0,631			1,536 ± 0,531	5,1	
GRB 030115b	2 734,0 ± 276,9	15 233,3 ± 434,7	3,001 ± 0,177	0,718 ± 0,080	0,315 ± 0,033	2,283 ± 0,132	35,0	IV
GRB 030115c	459,7 ± 152,5	3 018,0 ± 244,6	1,367 ± 0,208	0,361 ± 0,124	0,358 ± 0,127	1,007 ± 0,150	12,3	
GRB 030204	4 364,6 ± 266,7	35 876,3 ± 561,7	1,032 ± 0,032	0,247 ± 0,016	0,315 ± 0,021	0,785 ± 0,025	63,9	II
GRB 030206	52,3 ± 14,3	298,3 ± 29,3	1,826 ± 0,385	0,495 ± 0,161	0,372 ± 0,112	1,331 ± 0,287	10,2	
GRB 030208	152,2 ± 113,3	1 082,1 ± 250,8	0,746 ± 0,359	0,246 ± 0,195	0,491 ± 0,428	0,500 ± 0,267	4,3	
GRB 030216	116,8 ± 92,5	1 304,0 ± 191,3	0,758 ± 0,233	0,157 ± 0,128	0,262 ± 0,217	0,601 ± 0,180	6,8	
GRB 030223	1 147,3 ± 188,3	7 003,0 ± 340,8	1,780 ± 0,180	0,455 ± 0,083	0,344 ± 0,060	1,325 ± 0,133	20,6	
GRB 030225	607,2 ± 120,3	5 272,0 ± 262,1	0,809 ± 0,082	0,208 ± 0,043	0,347 ± 0,075	0,600 ± 0,063	20,1	
GRB 030227	241,8 ± 146,4	1 233,2 ± 275,0	0,472 ± 0,272	0,289 ± 0,185			4,5	
GRB 030228	907,9 ± 202,4	4 287,6 ± 321,9	2,310 ± 0,330	0,701 ± 0,172	0,436 ± 0,107	1,609 ± 0,233	13,3	
GRB 030301		2 385,1 ± 417,4	1,237 ± 0,409			1,100 ± 0,311	5,7	
GRB 030306	595,7 ± 134,8	10 875,9 ± 269,3	0,766 ± 0,040	0,097 ± 0,022	0,145 ± 0,033	0,669 ± 0,032	40,4	IV
GRB 030307	759,2 ± 57,0	10 159,7 ± 149,0	0,734 ± 0,022	0,130 ± 0,010	0,214 ± 0,017	0,604 ± 0,018	68,2	I
GRB 030320a	1 336,0 ± 195,4	6 567,2 ± 324,6	2,581 ± 0,270	0,729 ± 0,124	0,393 ± 0,062	1,853 ± 0,195	20,2	III
GRB 030320b	1 660,9 ± 363,5	23 013,5 ± 763,3	0,863 ± 0,058	0,134 ± 0,030	0,185 ± 0,041	0,729 ± 0,046	30,2	
GRB 030329a	1 498,3 ± 158,6	64 109,3 ± 382,6	0,550 ± 0,007	0,036 ± 0,004	0,071 ± 0,007	0,514 ± 0,006	167,6	II
GRB 030329b	1 351,1 ± 233,3	10 752,9 ± 482,4	0,708 ± 0,067	0,215 ± 0,039	0,435 ± 0,084	0,494 ± 0,050	22,3	
GRB 030331	420,8 ± 95,6	1 725,8 ± 158,8	3,824 ± 0,894	1,176 ± 0,364	0,444 ± 0,112	2,648 ± 0,625	10,9	

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 030406	66,00	6-Apr-2003 22:42:04,00	6-Apr-2003 22:42:57,50	2 695,2	4 175,2 ± 200,8	7 842,5 ± 309,7
GRB 030410	1,60	10-Apr-2003 11:23:40,75	10-Apr-2003 11:23:42,28	2 307,9	260,2 ± 63,7	464,2 ± 49,0
GRB 030413	20,40	13-Apr-2003 07:34:37,90	13-Apr-2003 07:34:45,55	1 118,2	3 135,0 ± 199,8	3 501,7 ± 179,6
GRB 030414	28,50	14-Apr-2003 13:48:26,00	14-Apr-2003 13:48:28,25	2 496,2	8 826,3 ± 239,1	7 510,2 ± 204,2
GRB 030419	15,50	19-Apr-2003 01:12:08,00	19-Apr-2003 01:12:14,25	5 766,6	13 493,7 ± 219,2	7 325,9 ± 175,9
GRB 030421	7,20	21-Apr-2003 00:36:31,60	21-Apr-2003 00:36:32,30	2 061,0	919,6 ± 97,4	2 629,1 ± 118,0
GRB 030422a	14,70	22-Apr-2003 09:01:22,30	22-Apr-2003 09:01:30,85	664,9	1 846,9 ± 164,9	1 311,0 ± 148,6
GRB 030422b	8,10	22-Apr-2003 17:26:22,60	22-Apr-2003 17:26:28,15	268,9	247,6 ± 59,1	
GRB 030428	9,60	28-Apr-2003 22:31:22,80	28-Apr-2003 22:31:23,30	5 049,7	6 128,1 ± 144,9	5 397,4 ± 128,2
GRB 030501a	7,40	1-May-2003 01:17:17,20	1-May-2003 01:17:22,30	1 832,0	1 938,6 ± 123,2	1 030,4 ± 107,2
GRB 030501b	11,70	1-May-2003 03:10:09,30	1-May-2003 03:10:23,85	447,2	1 172,4 ± 144,6	317,8 ± 126,4
GRB 030501c	1,55	1-May-2003 20:44:48,65	1-May-2003 20:44:49,53	1 968,9	67,1 ± 27,8	333,4 ± 40,2
GRB 030505a	44,00	5-May-2003 07:38:54,00	5-May-2003 07:39:13,50	219,2	955,4 ± 142,6	1 951,0 ± 207,2
GRB 030505b	106,50	5-May-2003 09:03:21,50	5-May-2003 09:03:26,75	1 449,2	5 823,0 ± 429,7	3 919,1 ± 345,8
GRB 030506	24,00	6-May-2003 02:04:08,50	6-May-2003 02:04:26,75	505,0	1 757,4 ± 111,5	3 100,3 ± 168,9
GRB 030518a	20,00	18-May-2003 01:23:40,50	18-May-2003 01:23:53,75	1 954,2	4 005,0 ± 114,5	12 220,3 ± 177,4
GRB 030518b	17,40	18-May-2003 03:12:15,40	18-May-2003 03:12:23,05	553,4	864,8 ± 90,1	1 670,9 ± 129,2
GRB 030519a	3,20	19-May-2003 09:32:22,20	19-May-2003 09:32:22,70	564,8	156,9 ± 43,2	471,5 ± 62,2
GRB 030519b	9,00	19-May-2003 14:04:53,60	19-May-2003 14:05:00,10	15 276,2	29 071,2 ± 209,8	24 037,7 ± 190,4
GRB 030523	0,12	23-May-2003 14:10:53,18	23-May-2003 14:10:53,19	2 589,7	89,7 ± 16,3	95,4 ± 15,6
GRB 030528	21,50	28-May-2003 13:02:50,00	28-May-2003 13:03:07,75	423,6	2 426,4 ± 196,6	1 092,7 ± 165,5
GRB 030601	18,30	1-Jun-2003 22:11:59,90	1-Jun-2003 22:12:06,05	1 096,6	2 821,8 ± 188,1	2 811,9 ± 144,8
GRB 030614	168,00	14-Jun-2003 01:28:26,00	14-Jun-2003 01:30:42,50	823,8	25 120,7 ± 543,1	14 397,2 ± 492,0
GRB 030626	38,50	26-Jun-2003 01:46:44,10	26-Jun-2003 01:46:54,95	1 346,4	8 553,3 ± 280,5	11 441,7 ± 279,6
GRB 030706	4,50	6-Jul-2003 00:02:14,90	6-Jul-2003 00:02:17,75	1 021,0	790,7 ± 91,8	775,5 ± 81,8
GRB 030710	17,70	10-Jul-2003 23:04:56,50	10-Jul-2003 23:05:02,35	1 129,6	5 770,9 ± 177,4	897,1 ± 136,3
GRB 030714	10,20	14-Jul-2003 22:14:43,20	14-Jul-2003 22:14:50,30	1 511,9	1 605,4 ± 130,2	775,5 ± 107,5
GRB 030721	26,80	21-Jul-2003 23:41:04,00	21-Jul-2003 23:41:10,20	3 606,3	4 139,9 ± 285,7	8 535,2 ± 271,8
GRB 030725	18,40	25-Jul-2003 11:46:24,40	25-Jul-2003 11:46:27,80	1 029,4	5 649,0 ± 195,8	3 096,3 ± 173,2
GRB 030726	27,50	26-Jul-2003 06:38:13,50	26-Jul-2003 06:38:41,75	1 990,1	12 859,7 ± 246,0	15 513,7 ± 233,8
GRB 030827	1,85	27-Aug-2003 16:08:39,40	27-Aug-2003 16:08:40,33	3 672,7	1 572,6 ± 71,5	1 465,8 ± 68,3

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 030406	2 733,6 ± 291,9	14 751,3 ± 470,6	2,533 ± 0,159	0,655 ± 0,077	0,349 ± 0,040	1,878 ± 0,117	31,3	III
GRB 030410	204,6 ± 38,3	929,0 ± 89,1	2,570 ± 0,674	0,786 ± 0,242	0,441 ± 0,095	1,784 ± 0,476	10,4	
GRB 030413	911,1 ± 152,3	7 547,8 ± 308,8	1,408 ± 0,117	0,291 ± 0,052	0,260 ± 0,045	1,117 ± 0,091	24,4	
GRB 030414	602,9 ± 165,9	16 939,4 ± 355,5	0,919 ± 0,039	0,068 ± 0,019	0,080 ± 0,022	0,851 ± 0,033	47,7	I
GRB 030419	970,6 ± 129,8	21 790,1 ± 309,6	0,615 ± 0,019	0,072 ± 0,010	0,132 ± 0,018	0,543 ± 0,016	70,4	IV
GRB 030421	1 052,0 ± 117,0	4 600,7 ± 192,6	4,003 ± 0,461	1,144 ± 0,176	0,400 ± 0,048	2,859 ± 0,329	23,9	II
GRB 030422a	379,9 ± 140,0	3 537,7 ± 262,5	0,915 ± 0,137	0,206 ± 0,078	0,290 ± 0,112	0,710 ± 0,102	13,5	
GRB 030422b	157,4 ± 78,3	447,3 ± 125,2	0,807 ± 0,486	0,636 ± 0,351			3,6	
GRB 030428	1 590,7 ± 101,7	13 116,2 ± 218,6	1,140 ± 0,038	0,260 ± 0,018	0,295 ± 0,020	0,881 ± 0,030	60,0	II
GRB 030501a	134,0 ± 88,8	3 103,0 ± 185,9	0,601 ± 0,081	0,069 ± 0,046	0,130 ± 0,087	0,532 ± 0,065	16,7	II
GRB 030501b	149,1 ± 117,6	1 639,3 ± 225,3	0,398 ± 0,155	0,127 ± 0,102	0,469 ± 0,415	0,271 ± 0,113	7,3	
GRB 030501c	138,9 ± 39,9	539,4 ± 63,1	7,042 ± 3,037	2,071 ± 1,044	0,417 ± 0,130	4,971 ± 2,145	8,5	
GRB 030505a	1 007,8 ± 204,5	3 914,1 ± 324,2	3,097 ± 0,554	1,055 ± 0,266	0,517 ± 0,118	2,042 ± 0,374	12,1	
GRB 030505b	1 091,2 ± 286,6	10 833,2 ± 621,5	0,860 ± 0,100	0,187 ± 0,051	0,278 ± 0,077	0,673 ± 0,077	17,4	III
GRB 030506	501,2 ± 173,6	5 358,9 ± 266,6	2,049 ± 0,189	0,285 ± 0,100	0,162 ± 0,057	1,764 ± 0,148	20,1	
GRB 030518a	5 037,4 ± 155,9	21 262,6 ± 262,5	4,309 ± 0,137	1,258 ± 0,053	0,412 ± 0,014	3,051 ± 0,098	81,0	IV
GRB 030518b	493,7 ± 123,5	3 029,4 ± 200,1	2,503 ± 0,333	0,571 ± 0,155	0,295 ± 0,077	1,932 ± 0,251	15,1	IV
GRB 030519a	276,2 ± 59,3	904,6 ± 96,2	4,767 ± 1,423	1,761 ± 0,615	0,586 ± 0,148	3,006 ± 0,918	9,4	
GRB 030519b	3 844,6 ± 119,4	56 953,4 ± 307,4	0,959 ± 0,010	0,132 ± 0,004	0,160 ± 0,005	0,827 ± 0,009	185,3	II
GRB 030523		184,2 ± 24,9	1,053 ± 0,283			1,064 ± 0,260	7,4	
GRB 030528	350,0 ± 145,9	3 869,2 ± 295,5	0,595 ± 0,103	0,144 ± 0,061	0,320 ± 0,142	0,450 ± 0,077	13,1	
GRB 030601	548,4 ± 113,5	6 182,0 ± 263,1	1,191 ± 0,103	0,194 ± 0,042	0,195 ± 0,042	0,996 ± 0,084	23,5	II
GRB 030614	782,5 ± 455,9	40 300,4 ± 863,1	0,604 ± 0,030	0,031 ± 0,018	0,054 ± 0,032	0,573 ± 0,023	46,7	II
GRB 030626	3 643,2 ± 252,8	23 638,1 ± 469,9	1,764 ± 0,073	0,426 ± 0,033	0,318 ± 0,023	1,338 ± 0,055	50,3	II
GRB 030706	306,5 ± 70,5	1 872,7 ± 141,7	1,368 ± 0,210	0,388 ± 0,100	0,395 ± 0,100	0,981 ± 0,154	13,2	
GRB 030710	131,3 ± 117,8	6 799,4 ± 252,8	0,178 ± 0,032	0,023 ± 0,020	0,146 ± 0,133	0,155 ± 0,024	26,9	I
GRB 030714		2 461,8 ± 191,1	0,533 ± 0,097			0,483 ± 0,078	12,9	I
GRB 030721	3 851,2 ± 201,2	16 526,3 ± 442,7	2,992 ± 0,222	0,930 ± 0,081	0,451 ± 0,028	2,062 ± 0,157	37,3	
GRB 030725	293,4 ± 151,0	9 038,6 ± 301,9	0,600 ± 0,046	0,052 ± 0,027	0,095 ± 0,049	0,548 ± 0,036	29,9	II
GRB 030726	2 917,3 ± 196,3	31 290,7 ± 392,0	1,433 ± 0,036	0,227 ± 0,016	0,188 ± 0,013	1,206 ± 0,029	79,8	IV
GRB 030827	394,5 ± 56,7	3 432,9 ± 114,0	1,183 ± 0,078	0,251 ± 0,038	0,269 ± 0,041	0,932 ± 0,061	30,1	II



Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 030830	20,50	30-Aug-2003 18:37:30,50	30-Aug-2003 18:37:46,25	1 818,6	4 171,8 ± 189,0	2 896,4 ± 161,9
GRB 030831	19,60	31-Aug-2003 15:07:03,20	31-Aug-2003 15:07:22,60	2 614,6	14 242,2 ± 196,2	9 680,7 ± 161,8
GRB 030916	2,38	16-Sep-2003 21:59:16,89	16-Sep-2003 21:59:18,40	528,9	45,7 ± 33,4	156,4 ± 49,5
GRB 030921	14,70	21-Sep-2003 08:38:19,90	21-Sep-2003 08:38:23,65	2 374,9	3 482,1 ± 174,2	3 215,3 ± 158,0
GRB 030922a	22,80	22-Sep-2003 08:43:16,30	22-Sep-2003 08:43:35,95	1 428,4	5 317,9 ± 212,7	3 185,2 ± 185,9
GRB 030922b	10,80	22-Sep-2003 18:30:47,00	22-Sep-2003 18:30:56,90	3 993,2	6 372,7 ± 152,6	5 957,2 ± 130,8
GRB 030926	0,28	26-Sep-2003 16:52:28,10	26-Sep-2003 16:52:28,29	1 990,8	134,8 ± 22,5	191,5 ± 20,9
GRB 031019	7,50	19-Oct-2003 22:00:55,90	19-Oct-2003 22:00:57,18	1 240,5	756,0 ± 126,9	1 107,1 ± 110,5
GRB 031024	4,00	24-Oct-2003 09:24:11,70	24-Oct-2003 09:24:14,35	689,8	494,0 ± 43,1	266,0 ± 41,0
GRB 031027	39,00	27-Oct-2003 17:07:09,00	27-Oct-2003 17:07:50,25	4 003,8	22 361,9 ± 309,5	15 638,3 ± 259,3
GRB 031107	19,20	7-Nov-2003 18:23:51,20	7-Nov-2003 18:24:07,40	1 182,8	5 506,1 ± 193,0	4 589,3 ± 158,3
GRB 031108	27,50	8-Nov-2003 14:11:04,00	8-Nov-2003 14:11:19,25	5 729,7	15 233,2 ± 507,8	17 983,2 ± 292,4
GRB 031111	3,20	11-Nov-2003 16:45:18,64	11-Nov-2003 16:45:20,92	13 879,4	8 909,7 ± 121,1	9 803,9 ± 117,4
GRB 031118	0,26	18-Nov-2003 06:26:16,22	18-Nov-2003 06:26:16,41	4 569,0	232,5 ± 25,4	275,8 ± 25,7
GRB 031120	97,50	20-Nov-2003 05:51:07,50	20-Nov-2003 05:52:38,25	991,2	15 689,7 ± 685,3	14 924,3 ± 433,9
GRB 031127	19,20	27-Nov-2003 18:58:48,30	27-Nov-2003 18:58:55,05	634,1	2 139,7 ± 188,7	872,0 ± 159,9
GRB 031130	4,65	30-Nov-2003 02:04:49,35	30-Nov-2003 02:04:53,78	1 327,9	1 285,4 ± 94,9	1 267,6 ± 86,5
GRB 031218	0,32	18-Dec-2003 06:28:09,16	18-Dec-2003 06:28:09,21	2 450,5	95,4 ± 18,0	242,3 ± 26,9
GRB 031219	6,00	19-Dec-2003 05:39:04,90	19-Dec-2003 05:39:05,85	1 403,7	1 105,6 ± 71,9	1 932,2 ± 100,8
GRB 031220	14,70	20-Dec-2003 03:29:53,90	20-Dec-2003 03:30:07,25	266,5	767,4 ± 153,5	160,0 ± 125,7
GRB 031226	44,00	26-Dec-2003 17:51:03,00	26-Dec-2003 17:51:29,75	640,2	4 473,9 ± 278,6	3 472,4 ± 236,9
GRB 040102	7,80	2-Jan-2004 19:35:22,40	2-Jan-2004 19:35:26,98	1 158,7	1 170,9 ± 115,7	274,9 ± 92,3
GRB 040113	6,40	13-Jan-2004 01:36:40,00	13-Jan-2004 01:36:45,90	535,1	380,8 ± 65,0	723,8 ± 84,8
GRB 040115	21,90	15-Jan-2004 18:30:02,10	15-Jan-2004 18:30:11,55	466,7	1 545,3 ± 181,9	627,2 ± 143,7
GRB 040205	26,50	5-Feb-2004 09:27:29,00	5-Feb-2004 09:27:45,75	323,5	1 085,3 ± 221,1	1 311,7 ± 208,7
GRB 040207	24,40	7-Feb-2004 22:11:57,20	7-Feb-2004 22:12:22,60	3 283,6	7 281,8 ± 210,5	7 765,1 ± 186,5
GRB 040211	3,70	11-Feb-2004 15:02:04,50	11-Feb-2004 15:02:08,05	756,3	614,3 ± 82,9	250,2 ± 76,6
GRB 040215	50,00	15-Feb-2004 00:28:01,00	15-Feb-2004 00:28:02,50	382,1	5 304,0 ± 286,6	2 169,9 ± 231,8
GRB 040220	17,20	20-Feb-2004 00:55:05,20	20-Feb-2004 00:55:15,80	823,7	1 054,5 ± 102,3	2 718,7 ± 156,6
GRB 040225	14,00	25-Feb-2004 10:02:06,80	25-Feb-2004 10:02:12,20	712,9	1 584,1 ± 156,3	715,1 ± 151,6
GRB 040228a	41,00	28-Feb-2004 00:08:39,00	28-Feb-2004 00:09:08,50	9 513,5	51 804,2 ± 361,3	34 324,6 ± 304,5

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 030830	214,4 ± 137,5	7 282,7 ± 284,3	0,746 ± 0,061	0,051 ± 0,033	0,074 ± 0,048	0,694 ± 0,050	25,6	
GRB 030831	487,9 ± 152,0	24 410,8 ± 296,3	0,714 ± 0,018	0,034 ± 0,011	0,050 ± 0,016	0,680 ± 0,015	82,4	
GRB 030916	89,1 ± 49,3	291,3 ± 77,5	5,367 ± 4,206	1,948 ± 1,785	0,570 ± 0,363	3,419 ± 2,721	3,8	
GRB 030921	450,2 ± 131,9	7 147,6 ± 269,7	1,053 ± 0,079	0,129 ± 0,038	0,140 ± 0,042	0,923 ± 0,065	26,5	III
GRB 030922a	974,4 ± 160,8	9 477,4 ± 325,1	0,782 ± 0,056	0,183 ± 0,031	0,306 ± 0,054	0,599 ± 0,042	29,2	II
GRB 030922b	1 132,6 ± 93,1	13 462,4 ± 221,5	1,113 ± 0,037	0,178 ± 0,015	0,190 ± 0,016	0,935 ± 0,030	60,8	II
GRB 030926	70,8 ± 15,6	397,1 ± 34,4	1,946 ± 0,378	0,525 ± 0,145	0,370 ± 0,091	1,421 ± 0,283	11,5	
GRB 031019	232,4 ± 95,7	2 095,5 ± 193,6	1,772 ± 0,355	0,307 ± 0,137	0,210 ± 0,089	1,464 ± 0,286	10,8	
GRB 031024	477,0 ± 73,9	1 237,0 ± 94,8	1,504 ± 0,216	0,965 ± 0,172	1,793 ± 0,392	0,538 ± 0,095	13,0	
GRB 031027	2 017,0 ± 203,0	40 017,2 ± 451,9	0,790 ± 0,018	0,090 ± 0,009	0,129 ± 0,013	0,699 ± 0,015	88,6	III
GRB 031107	1 047,0 ± 128,4	11 142,4 ± 280,7	1,024 ± 0,052	0,190 ± 0,024	0,228 ± 0,029	0,834 ± 0,041	39,7	II
GRB 031108	4 376,0 ± 188,6	37 592,4 ± 615,6	1,468 ± 0,054	0,287 ± 0,016	0,243 ± 0,011	1,181 ± 0,044	61,1	IV
GRB 031111	2 777,7 ± 74,3	21 491,3 ± 184,3	1,412 ± 0,025	0,312 ± 0,009	0,283 ± 0,008	1,100 ± 0,020	116,6	II
GRB 031118	94,0 ± 20,5	602,3 ± 41,6	1,590 ± 0,224	0,404 ± 0,099	0,341 ± 0,081	1,186 ± 0,170	14,5	
GRB 031120	2 372,9 ± 318,8	32 987,0 ± 871,5	1,102 ± 0,059	0,151 ± 0,021	0,159 ± 0,022	0,951 ± 0,050	37,9	IV
GRB 031127	230,3 ± 136,0	3 242,1 ± 282,2	0,515 ± 0,108	0,108 ± 0,064	0,264 ± 0,163	0,408 ± 0,083	11,5	
GRB 031130	191,9 ± 74,6	2 744,9 ± 148,5	1,135 ± 0,122	0,149 ± 0,059	0,151 ± 0,060	0,986 ± 0,099	18,5	
GRB 031218	149,9 ± 23,7	487,6 ± 40,1	4,110 ± 0,861	1,570 ± 0,386	0,618 ± 0,120	2,539 ± 0,556	12,2	
GRB 031219	524,4 ± 91,8	3 562,2 ± 154,1	2,222 ± 0,190	0,474 ± 0,089	0,271 ± 0,050	1,748 ± 0,146	23,1	II
GRB 031220		1 031,9 ± 225,9	0,345 ± 0,227			0,208 ± 0,169	4,6	
GRB 031226	447,9 ± 211,3	8 394,1 ± 422,4	0,876 ± 0,090	0,100 ± 0,048	0,129 ± 0,061	0,776 ± 0,072	19,9	
GRB 040102	147,7 ± 78,3	1 593,5 ± 167,4	0,361 ± 0,109	0,126 ± 0,068	0,537 ± 0,337	0,235 ± 0,082	9,5	
GRB 040113	167,0 ± 84,5	1 271,6 ± 136,2	2,339 ± 0,508	0,438 ± 0,234	0,231 ± 0,120	1,900 ± 0,393	9,3	
GRB 040115	261,1 ± 119,7	2 433,7 ± 260,9	0,575 ± 0,139	0,169 ± 0,080	0,416 ± 0,213	0,406 ± 0,105	9,3	
GRB 040205	486,9 ± 174,6	2 883,9 ± 350,6	1,657 ± 0,421	0,449 ± 0,185	0,371 ± 0,146	1,209 ± 0,312	8,2	
GRB 040207	1 545,5 ± 156,0	16 592,3 ± 321,6	1,279 ± 0,050	0,212 ± 0,022	0,199 ± 0,021	1,066 ± 0,040	51,6	IV
GRB 040211	86,3 ± 67,9	950,9 ± 131,7	0,548 ± 0,182	0,141 ± 0,112	0,345 ± 0,291	0,407 ± 0,136	7,2	
GRB 040215		7 636,2 ± 415,0	0,440 ± 0,061			0,409 ± 0,049	18,4	II
GRB 040220	1 211,5 ± 149,0	4 984,8 ± 239,2	3,727 ± 0,416	1,149 ± 0,180	0,446 ± 0,061	2,578 ± 0,291	20,8	
GRB 040225		2 356,9 ± 260,9	0,488 ± 0,140			0,451 ± 0,106	9,0	
GRB 040228a	6 632,8 ± 212,5	92 761,6 ± 518,1	0,791 ± 0,009	0,128 ± 0,004	0,193 ± 0,006	0,663 ± 0,007	179,0	II

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1-T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2-T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 040228b	134,00	28-Feb-2004 00:11:18,00	28-Feb-2004 00:12:51,00	1 083,7	14 741,9 ± 481,0	6 201,1 ± 396,0
GRB 040302a	23,70	2-Mar-2004 04:14:18,90	2-Mar-2004 04:14:35,25	747,2	1 766,3 ± 200,9	787,3 ± 172,0
GRB 040302b	10,80	2-Mar-2004 12:23:59,60	2-Mar-2004 12:24:03,90	13 903,6	21 741,5 ± 204,8	14 949,1 ± 171,9
GRB 040312	0,16	12-Mar-2004 00:02:36,50	12-Mar-2004 00:02:36,55	7 158,5	255,5 ± 23,5	344,2 ± 24,3
GRB 040316	16,80	16-Mar-2004 18:16:06,60	16-Mar-2004 18:16:14,25	1 574,3	2 673,2 ± 106,1	4 477,1 ± 143,7
GRB 040323	10,80	23-Mar-2004 13:02:56,80	23-Mar-2004 13:03:02,05	296,1	409,4 ± 78,3	474,3 ± 105,6
GRB 040324	0,26	24-Mar-2004 10:21:12,86	24-Mar-2004 10:21:12,91	15 043,5	672,1 ± 33,8	841,7 ± 33,8
GRB 040327	20,00	27-Mar-2004 16:19:13,00	27-Mar-2004 16:19:27,50	401,4	1 496,1 ± 211,0	508,8 ± 176,0
GRB 040329	2,07	29-Mar-2004 11:10:51,62	29-Mar-2004 11:10:51,97	19 948,7	3 455,0 ± 81,1	4 695,6 ± 83,1
GRB 040404	4,90	4-Apr-2004 10:58:51,40	4-Apr-2004 10:58:52,15	1 094,3	1 235,5 ± 95,5	632,0 ± 83,9
GRB 040413	0,28	13-Apr-2004 13:09:56,26	13-Apr-2004 13:09:56,49	5 106,4	203,0 ± 25,8	189,2 ± 23,0
GRB 040414	77,00	14-Apr-2004 11:07:57,00	14-Apr-2004 11:09:22,50	969,4	11 098,8 ± 388,0	9 233,3 ± 354,0
GRB 040421	11,40	21-Apr-2004 02:30:17,60	21-Apr-2004 02:30:27,30	6 897,0	11 065,0 ± 174,5	15 966,3 ± 180,8
GRB 040423	4,20	23-Apr-2004 02:23:30,20	23-Apr-2004 02:23:30,35	715,5	860,0 ± 94,6	569,7 ± 92,4
GRB 040425	4,10	25-Apr-2004 16:23:33,50	25-Apr-2004 16:23:34,25	3 414,2	1 057,2 ± 83,3	3 092,4 ± 99,4
GRB 040427	8,00	27-Apr-2004 20:12:28,40	27-Apr-2004 20:12:37,70	636,3	963,6 ± 117,6	841,0 ± 95,8
GRB 040429	25,20	29-Apr-2004 10:52:39,80	29-Apr-2004 10:53:04,40	548,9	2 128,8 ± 217,1	1 872,9 ± 187,6
GRB 040502	18,60	2-May-2004 06:36:55,60	2-May-2004 06:37:06,85	1 311,7	2 527,5 ± 108,7	2 639,6 ± 157,9
GRB 040506	65,60	6-May-2004 23:44:14,40	6-May-2004 23:45:18,80	806,3	5 099,8 ± 336,6	2 573,8 ± 283,6
GRB 040510	6,00	10-May-2004 09:59:35,20	10-May-2004 09:59:37,30	1 096,5	1 171,9 ± 107,8	531,1 ± 88,2
GRB 040511	18,50	11-May-2004 16:45:40,00	11-May-2004 16:46:21,25	423,2	660,1 ± 174,6	213,2 ± 148,7
GRB 040526	12,90	26-May-2004 20:21:10,80	26-May-2004 20:21:13,35	525,3	1 168,4 ± 152,9	433,6 ± 133,8
GRB 040528	21,60	28-May-2004 16:55:36,70	28-May-2004 16:55:58,15	1 713,4	6 037,2 ± 207,8	3 810,0 ± 182,1
GRB 040531	42,00	31-May-2004 23:15:01,50	31-May-2004 23:15:04,75	1 024,4	3 792,5 ± 267,1	1 072,4 ± 215,9
GRB 040603	12,40	3-Jun-2004 15:40:50,00	3-Jun-2004 15:40:58,70	731,1	1 524,8 ± 186,9	945,6 ± 145,6
GRB 040605a	8,20	5-Jun-2004 04:31:39,20	5-Jun-2004 04:31:44,50	457,4	93,6 ± 66,2	514,4 ± 109,6
GRB 040605b	0,18	5-Jun-2004 18:46:16,28	5-Jun-2004 18:46:16,39	4 589,3	70,0 ± 14,1	216,1 ± 21,2
GRB 040605c	16,80	5-Jun-2004 23:58:44,40	5-Jun-2004 23:58:45,80	1 208,5	4 062,5 ± 169,8	1 386,6 ± 133,7
GRB 040611	18,00	11-Jun-2004 13:35:55,60	11-Jun-2004 13:36:00,60	739,9	2 260,7 ± 192,1	2 913,5 ± 171,0
GRB 040619	5,70	19-Jun-2004 15:15:48,00	19-Jun-2004 15:15:52,35	952,6	958,7 ± 84,7	1 724,9 ± 105,7
GRB 040701	9,60	1-Jul-2004 22:46:43,60	1-Jul-2004 22:46:45,25	1 012,1	1 372,5 ± 132,2	1 309,5 ± 114,6

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 040228b	312,0 ± 324,2	21 254,9 ± 702,4	0,442 ± 0,038	0,021 ± 0,022	0,050 ± 0,052	0,421 ± 0,030	30,3	II
GRB 040302a		2 702,4 ± 306,6	0,530 ± 0,144			0,446 ± 0,110	8,8	
GRB 040302b	3 257,5 ± 119,6	39 948,2 ± 292,9	0,837 ± 0,012	0,150 ± 0,006	0,218 ± 0,008	0,688 ± 0,010	136,4	III
GRB 040312	72,8 ± 16,6	672,5 ± 37,7	1,632 ± 0,189	0,285 ± 0,070	0,212 ± 0,051	1,347 ± 0,156	17,8	
GRB 040316	1 405,3 ± 130,1	8 555,6 ± 221,0	2,201 ± 0,114	0,526 ± 0,053	0,314 ± 0,031	1,675 ± 0,085	38,7	II
GRB 040323		852,7 ± 165,5	1,083 ± 0,412			1,158 ± 0,340	5,2	
GRB 040324	363,8 ± 23,1	1 877,6 ± 53,0	1,794 ± 0,109	0,541 ± 0,044	0,432 ± 0,032	1,252 ± 0,081	35,4	IV
GRB 040327	78,4 ± 156,1	2 083,3 ± 316,0	0,392 ± 0,167	0,052 ± 0,105	0,154 ± 0,311	0,340 ± 0,127	6,6	
GRB 040329	2 295,8 ± 61,8	10 446,4 ± 131,6	2,024 ± 0,056	0,665 ± 0,024	0,489 ± 0,016	1,359 ± 0,040	79,4	III
GRB 040404	267,8 ± 76,2	2 135,3 ± 148,2	0,728 ± 0,108	0,217 ± 0,064	0,424 ± 0,133	0,512 ± 0,079	14,4	
GRB 040413	79,2 ± 19,1	471,5 ± 39,5	1,322 ± 0,224	0,390 ± 0,107	0,419 ± 0,113	0,932 ± 0,164	11,9	I
GRB 040414	1 457,2 ± 302,9	21 789,2 ± 606,3	0,963 ± 0,054	0,131 ± 0,028	0,158 ± 0,033	0,832 ± 0,043	35,9	IV
GRB 040421	4 767,5 ± 139,2	31 798,8 ± 287,2	1,874 ± 0,036	0,431 ± 0,014	0,299 ± 0,009	1,443 ± 0,028	110,7	II
GRB 040423	88,6 ± 85,9	1 518,3 ± 157,6	0,765 ± 0,169	0,103 ± 0,100	0,156 ± 0,153	0,662 ± 0,130	9,6	
GRB 040425	1 234,2 ± 88,1	5 383,8 ± 156,8	4,092 ± 0,346	1,167 ± 0,124	0,399 ± 0,031	2,925 ± 0,249	34,3	I
GRB 040427		1 831,3 ± 169,9	0,900 ± 0,168			0,873 ± 0,146	10,8	
GRB 040429	400,2 ± 156,8	4 401,8 ± 327,0	1,068 ± 0,158	0,188 ± 0,076	0,214 ± 0,086	0,880 ± 0,126	13,5	
GRB 040502	395,5 ± 162,8	5 562,5 ± 251,5	1,201 ± 0,104	0,156 ± 0,065	0,150 ± 0,062	1,044 ± 0,077	22,1	II
GRB 040506	398,9 ± 249,5	8 072,4 ± 506,0	0,583 ± 0,083	0,078 ± 0,049	0,155 ± 0,098	0,505 ± 0,065	16,0	IV
GRB 040510		1 776,7 ± 157,4	0,516 ± 0,109			0,453 ± 0,086	11,3	
GRB 040511		828,8 ± 263,6	0,256 ± 0,307			0,323 ± 0,241	3,1	
GRB 040526		1 613,3 ± 235,4	0,381 ± 0,161			0,371 ± 0,124	6,9	
GRB 040528	923,8 ± 164,5	10 771,0 ± 321,5	0,784 ± 0,049	0,153 ± 0,028	0,242 ± 0,045	0,631 ± 0,037	33,5	II
GRB 040531	204,6 ± 183,9	5 069,5 ± 389,6	0,337 ± 0,078	0,054 ± 0,049	0,191 ± 0,176	0,283 ± 0,060	13,0	III
GRB 040603	153,8 ± 124,9	2 624,2 ± 267,8	0,721 ± 0,154	0,101 ± 0,083	0,163 ± 0,134	0,620 ± 0,122	9,8	
GRB 040605a	177,3 ± 111,5	785,2 ± 169,8	7,390 ± 5,490	1,894 ± 1,793	0,345 ± 0,229	5,496 ± 4,061	4,6	
GRB 040605b	150,2 ± 20,1	436,3 ± 32,4	5,236 ± 1,132	2,147 ± 0,518	0,695 ± 0,115	3,089 ± 0,691	13,5	
GRB 040605c	121,9 ± 111,1	5 571,1 ± 243,0	0,371 ± 0,046	0,030 ± 0,027	0,088 ± 0,081	0,341 ± 0,036	22,9	II
GRB 040611	684,1 ± 148,9	5 858,2 ± 297,2	1,591 ± 0,168	0,303 ± 0,071	0,235 ± 0,053	1,289 ± 0,133	19,7	
GRB 040619	236,7 ± 98,7	2 920,3 ± 167,6	2,046 ± 0,235	0,247 ± 0,105	0,137 ± 0,058	1,799 ± 0,193	17,4	
GRB 040701	385,2 ± 96,4	3 067,2 ± 199,8	1,235 ± 0,161	0,281 ± 0,075	0,294 ± 0,078	0,954 ± 0,124	15,4	

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 040719	7,50	19-Jul-2004 01:16:26,60	19-Jul-2004 01:16:31,25	1 455,2	1 109,5 ± 109,6	520,4 ± 87,1
GRB 040723	10,40	23-Jul-2004 04:06:30,20	23-Jul-2004 04:06:38,10	1 133,6	1 962,2 ± 197,4	2 817,4 ± 140,8
GRB 040731	24,50	31-Jul-2004 10:24:19,00	31-Jul-2004 10:24:42,75	1 686,9	7 132,8 ± 221,9	7 553,4 ± 203,3
GRB 040810	19,20	10-Aug-2004 14:15:33,50	10-Aug-2004 14:15:42,65	1 636,9	6 817,0 ± 196,4	5 111,4 ± 161,3
GRB 040818	8,00	18-Aug-2004 01:29:04,20	18-Aug-2004 01:29:04,25	2 445,9	1 320,6 ± 121,8	2 530,4 ± 120,4
GRB 040822	1,38	22-Aug-2004 21:21:54,48	22-Aug-2004 21:21:55,13	2 202,9	287,5 ± 49,2	329,8 ± 43,6
GRB 040921	0,85	21-Sep-2004 16:06:20,10	21-Sep-2004 16:06:20,13	1 118,0	47,2 ± 20,8	72,8 ± 20,6
GRB 040926	7,60	26-Sep-2004 04:03:10,00	26-Sep-2004 04:03:18,10	5 646,9	7 172,6 ± 148,2	8 712,0 ± 146,6
GRB 041005a	12,40	5-Oct-2004 13:56:48,00	5-Oct-2004 13:56:56,10	2 762,9	4 395,9 ± 90,4	106,5 ± 61,7
GRB 041005b	16,20	5-Oct-2004 13:59:45,60	5-Oct-2004 13:59:49,50	2 095,6	2 664,7 ± 94,7	153,6 ± 80,3
GRB 041006	10,40	6-Oct-2004 12:18:35,40	6-Oct-2004 12:18:40,30	291,9	404,1 ± 60,3	282,9 ± 56,7
GRB 041007	2,00	7-Oct-2004 02:02:07,60	7-Oct-2004 02:02:08,35	3 087,4	844,4 ± 65,1	1 341,9 ± 66,0
GRB 041009	7,50	9-Oct-2004 06:38:10,30	9-Oct-2004 06:38:21,25	1 278,5	1 065,8 ± 114,8	719,6 ± 103,2
GRB 041010	0,25	10-Oct-2004 00:14:57,44	10-Oct-2004 00:14:57,56	8 828,3	191,1 ± 23,2	186,1 ± 22,5
GRB 041013	184,00	13-Oct-2004 02:34:36,00	13-Oct-2004 02:35:25,00	500,1	9 954,4 ± 600,6	8 584,4 ± 542,4
GRB 041015	3,90	15-Oct-2004 10:22:16,50	15-Oct-2004 10:22:18,95	1 587,6	1 103,5 ± 85,5	540,8 ± 71,5
GRB 041016	18,00	16-Oct-2004 04:39:22,40	16-Oct-2004 04:39:37,00	503,5	1 726,2 ± 176,6	825,1 ± 150,1
GRB 041102	2,70	2-Nov-2004 11:12:23,60	2-Nov-2004 11:12:23,75	1 447,2	623,4 ± 70,3	653,3 ± 65,7
GRB 041117	16,20	17-Nov-2004 15:17:44,30	17-Nov-2004 15:18:00,95	1 172,5	6 518,4 ± 185,2	3 857,8 ± 161,8
GRB 041120	8,60	20-Nov-2004 19:23:39,20	20-Nov-2004 19:23:41,30	1 111,6	2 935,4 ± 126,8	1 223,2 ± 105,6
GRB 041125	25,20	25-Nov-2004 16:06:54,40	25-Nov-2004 16:07:27,40	9 392,0	37 632,1 ± 278,4	19 903,9 ± 213,6
GRB 041211a	20,00	11-Dec-2004 11:31:44,00	11-Dec-2004 11:31:53,40	1 077,1	3 094,1 ± 177,5	3 064,4 ± 151,6
GRB 041211b	11,00	11-Dec-2004 07:49:52,40	11-Dec-2004 07:49:56,50	784,4	663,0 ± 66,4	430,8 ± 57,2
GRB 041211c	6,15	11-Dec-2004 23:57:41,95	11-Dec-2004 23:57:42,93	11 805,4	11 285,9 ± 153,6	20 423,9 ± 181,5
GRB 041218	51,00	18-Dec-2004 15:45:30,00	18-Dec-2004 15:45:50,50	358,6	2 780,5 ± 305,1	1 439,8 ± 280,8
GRB 041219	10,00	19-Dec-2004 01:42:10,40	19-Dec-2004 01:42:19,40	546,2	948,5 ± 123,5	777,0 ± 104,1
GRB 041223	40,50	23-Dec-2004 14:06:13,50	23-Dec-2004 14:06:42,25	1 569,9	8 262,5 ± 295,6	8 811,4 ± 267,1
GRB 041224	38,50	24-Dec-2004 20:20:33,50	24-Dec-2004 20:20:58,25	330,3	1 846,1 ± 261,2	824,9 ± 235,0
GRB 041231	1,00	31-Dec-2004 21:50:47,30	31-Dec-2004 21:50:48,05	2 047,9	374,1 ± 44,1	595,5 ± 43,1
GRB 050124	6,20	24-Jan-2005 11:29:58,60	24-Jan-2005 11:30:03,30	594,8	671,3 ± 98,4	381,2 ± 84,5
GRB 050203	3,80	3-Feb-2005 17:22:00,30	3-Feb-2005 17:22:00,85	2 864,8	1 341,0 ± 94,4	1 044,2 ± 86,6

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3-T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23-1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 040719	217,7 ± 73,5	1 847,7 ± 158,1	0,665 ± 0,122	0,196 ± 0,069	0,418 ± 0,158	0,469 ± 0,091	11,7	I
GRB 040723	470,7 ± 117,9	5 250,3 ± 269,6	1,676 ± 0,193	0,240 ± 0,065	0,167 ± 0,043	1,436 ± 0,161	19,5	
GRB 040731	1 912,1 ± 172,4	16 598,4 ± 346,8	1,327 ± 0,056	0,268 ± 0,026	0,253 ± 0,024	1,059 ± 0,044	47,9	IV
GRB 040810	563,7 ± 126,2	12 492,1 ± 283,7	0,832 ± 0,038	0,083 ± 0,019	0,110 ± 0,025	0,750 ± 0,032	44,0	IV
GRB 040818	1 249,9 ± 105,7	5 100,8 ± 201,2	2,863 ± 0,291	0,946 ± 0,118	0,494 ± 0,048	1,916 ± 0,199	25,3	I
GRB 040822	131,1 ± 35,8	748,3 ± 74,9	1,603 ± 0,337	0,456 ± 0,147	0,398 ± 0,121	1,147 ± 0,248	10,0	
GRB 040921	179,4 ± 34,7	299,5 ± 45,4	5,347 ± 2,503	3,803 ± 1,828	2,463 ± 0,845	1,544 ± 0,808	6,6	
GRB 040926	2 479,2 ± 110,9	18 363,9 ± 236,1	1,560 ± 0,041	0,346 ± 0,017	0,285 ± 0,014	1,215 ± 0,032	77,8	IV
GRB 041005a		4 614,2 ± 162,0	0,050 ± 0,031			0,024 ± 0,014	28,5	IV
GRB 041005b	724,8 ± 155,2	3 543,1 ± 198,7	0,330 ± 0,067	0,272 ± 0,059	4,718 ± 2,664	0,058 ± 0,030	17,8	IV
GRB 041006		551,4 ± 135,8	0,365 ± 0,306			0,700 ± 0,175	4,1	
GRB 041007	556,2 ± 53,0	2 742,5 ± 106,8	2,248 ± 0,200	0,659 ± 0,081	0,414 ± 0,044	1,589 ± 0,145	25,7	I
GRB 041009	154,6 ± 93,9	1 940,1 ± 180,7	0,820 ± 0,158	0,145 ± 0,090	0,215 ± 0,134	0,675 ± 0,121	10,7	
GRB 041010	88,9 ± 17,4	466,1 ± 36,7	1,439 ± 0,230	0,465 ± 0,107	0,478 ± 0,110	0,974 ± 0,167	12,7	
GRB 041013	1 665,1 ± 470,6	20 203,9 ± 936,1	1,030 ± 0,095	0,167 ± 0,048	0,194 ± 0,056	0,862 ± 0,075	21,6	IV
GRB 041015	185,6 ± 58,0	1 830,0 ± 125,7	0,658 ± 0,098	0,168 ± 0,054	0,343 ± 0,117	0,490 ± 0,075	14,6	
GRB 041016	289,6 ± 133,4	2 840,9 ± 267,5	0,646 ± 0,134	0,168 ± 0,079	0,351 ± 0,174	0,478 ± 0,100	10,6	
GRB 041102	267,0 ± 58,2	1 543,7 ± 112,5	1,476 ± 0,218	0,428 ± 0,105	0,409 ± 0,098	1,048 ± 0,158	13,7	
GRB 041117	439,2 ± 128,4	10 815,4 ± 277,4	0,659 ± 0,037	0,067 ± 0,020	0,114 ± 0,034	0,592 ± 0,030	39,0	II
GRB 041120	181,1 ± 84,6	4 339,7 ± 185,4	0,478 ± 0,051	0,062 ± 0,029	0,148 ± 0,070	0,417 ± 0,040	23,4	II
GRB 041125	2 057,2 ± 141,4	59 593,2 ± 378,3	0,584 ± 0,008	0,055 ± 0,004	0,103 ± 0,007	0,529 ± 0,007	157,5	IV
GRB 041211a	672,9 ± 121,8	6 831,4 ± 263,3	1,208 ± 0,094	0,217 ± 0,041	0,220 ± 0,041	0,990 ± 0,075	25,9	
GRB 041211b		1 195,8 ± 136,5	0,804 ± 0,197			0,650 ± 0,108	8,8	
GRB 041211c	11 108,6 ± 151,9	42 818,3 ± 282,1	2,794 ± 0,043	0,984 ± 0,019	0,544 ± 0,009	1,810 ± 0,029	151,8	IV
GRB 041218		4 447,6 ± 487,8	0,600 ± 0,152			0,518 ± 0,116	9,1	
GRB 041219	143,1 ± 89,2	1 868,6 ± 184,5	0,970 ± 0,192	0,151 ± 0,096	0,184 ± 0,117	0,819 ± 0,153	10,1	
GRB 041223	1 249,8 ± 223,7	18 323,6 ± 456,9	1,218 ± 0,061	0,151 ± 0,028	0,142 ± 0,026	1,066 ± 0,050	40,1	IV
GRB 041224		2 726,8 ± 410,9	0,477 ± 0,185			0,447 ± 0,142	6,6	
GRB 041231	185,9 ± 33,1	1 155,5 ± 70,0	2,089 ± 0,286	0,497 ± 0,106	0,312 ± 0,060	1,592 ± 0,220	16,5	II
GRB 050124		1 028,5 ± 147,7	0,532 ± 0,182			0,568 ± 0,151	7,0	
GRB 050203	270,8 ± 75,7	2 656,0 ± 148,8	0,981 ± 0,110	0,202 ± 0,058	0,259 ± 0,076	0,779 ± 0,085	17,9	

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 050209	14,50	9-Feb-2005 01:31:16,50	9-Feb-2005 01:31:38,25	276,9	682,8 ± 143,6	428,3 ± 121,4
GRB 050213	17,00	13-Feb-2005 19:24:02,50	13-Feb-2005 19:24:04,75	2 017,9	2 725,0 ± 201,4	3 497,7 ± 183,4
GRB 050214	40,00	14-Feb-2005 11:37:57,00	14-Feb-2005 11:38:33,50	377,7	1 509,5 ± 279,2	904,2 ± 284,4
GRB 050216	0,50	16-Feb-2005 07:26:34,20	16-Feb-2005 07:26:34,28	1 900,4	77,8 ± 18,0	114,2 ± 18,0
GRB 050219	9,40	19-Feb-2005 21:05:49,60	19-Feb-2005 21:05:51,65	4 724,0	9 833,1 ± 158,8	4 522,5 ± 123,9
GRB 050312	0,15	12-Mar-2005 05:40:13,55	12-Mar-2005 05:40:13,58	4 334,9	161,4 ± 30,9	254,6 ± 22,8
GRB 050314	8,00	14-Mar-2005 08:33:08,00	14-Mar-2005 08:33:08,90	1 977,4	4 322,9 ± 135,4	1 467,9 ± 116,7
GRB 050320	15,40	20-Mar-2005 08:04:18,20	20-Mar-2005 08:04:26,90	851,4	1 330,8 ± 153,4	1 224,7 ± 130,5
GRB 050321	7,00	21-Mar-2005 22:11:48,60	21-Mar-2005 22:11:51,50	895,9	943,9 ± 116,2	602,9 ± 102,9
GRB 050404	11,40	4-Apr-2005 17:27:47,20	4-Apr-2005 17:27:48,50	6 024,9	6 020,4 ± 203,1	6 128,0 ± 153,5
GRB 050408	4,20	8-Apr-2005 16:22:50,20	8-Apr-2005 16:22:50,30	657,3	728,2 ± 86,9	151,5 ± 84,3
GRB 050409	1,11	9-Apr-2005 01:18:34,99	9-Apr-2005 01:18:36,06	5 842,4	170,7 ± 27,0	308,9 ± 30,8
GRB 050411	6,80	11-Apr-2005 21:51:0,20	11-Apr-2005 21:51:09,50	848,2	1 029,7 ± 115,8	666,8 ± 102,0
GRB 050412	19,40	12-Apr-2005 18:58:39,00	12-Apr-2005 18:58:45,90	1 386,6	5 955,2 ± 218,1	1 722,5 ± 170,7
GRB 050429	19,40	29-Apr-2005 14:09:49,40	29-Apr-2005 14:09:50,90	1 874,6	1 561,7 ± 181,7	1 625,2 ± 170,1
GRB 050430	14,20	30-Apr-2005 09:13:08,40	30-Apr-2005 09:13:09,10	961,4	1 161,6 ± 161,4	1 071,2 ± 161,9
GRB 050501	2,20	1-May-2005 08:19:32,30	1-May-2005 08:19:39,35	567,8	240,3 ± 34,2	256,0 ± 34,1
GRB 050509	20,00	9-May-2005 09:31:10,20	9-May-2005 09:31:26,70	2 216,1	8 815,6 ± 196,4	6 878,4 ± 176,0
GRB 050525a	7,40	25-May-2005 00:02:52,50	25-May-2005 00:02:54,45	4 859,5	6 361,9 ± 131,7	2 433,6 ± 107,8
GRB 050525b	12,60	25-May-2005 00:49:50,40	25-May-2005 00:50:00,50	6 795,4	8 526,4 ± 163,3	8 362,3 ± 150,0
GRB 050531	33,20	31-May-2005 04:27:05,20	31-May-2005 04:27:26,70	5 868,7	12 721,6 ± 244,7	8 504,4 ± 204,4
GRB 050717	9,60	17-Jul-2005 10:30:52,20	17-Jul-2005 10:30:55,10	2 343,1	2 714,4 ± 124,9	3 275,6 ± 113,0
GRB 050726	16,00	26-Jul-2005 20:22:07,60	26-Jul-2005 20:22:19,80	1 435,6	4 973,0 ± 165,3	3 815,3 ± 144,6
GRB 050805	1,05	5-Aug-2005 13:29:47,45	5-Aug-2005 13:29:47,63	3 367,3	405,3 ± 43,5	622,1 ± 44,8
GRB 050814	0,12	14-Aug-2005 04:35:19,39	14-Aug-2005 04:35:19,45	67 058,5	100,6 ± 14,7	371,2 ± 22,7
GRB 050820	6,00	20-Aug-2005 23:50:28,70	20-Aug-2005 23:50:36,05	680,6	1 406,0 ± 106,6	540,6 ± 97,4
GRB 050824	0,25	24-Aug-2005 11:57:42,46	24-Aug-2005 11:57:42,54	18 094,8	377,0 ± 26,7	551,9 ± 28,2
GRB 050829	1,28	29-Aug-2005 06:52:10,02	29-Aug-2005 06:52:10,62	682,4	167,0 ± 45,2	138,7 ± 40,1
GRB 051012	2,55	12-Oct-2005 12:00:09,45	12-Oct-2005 12:00:11,93	3 717,8	2 382,1 ± 75,6	2 024,2 ± 68,4
GRB 051031	49,50	31-Oct-2005 22:00:39,50	31-Oct-2005 22:01:05,75	633,2	4 766,7 ± 286,8	4 502,6 ± 278,2
GRB 051103	0,092	3-Nov-2005 09:25:42,18	3-Nov-2005 09:25:42,19	56 926,5	163,3 ± 13,4	350,8 ± 19,2

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 050209	139,3 ± 107,1	1 250,3 ± 216,4	0,831 ± 0,295	0,204 ± 0,163	0,325 ± 0,267	0,627 ± 0,221	5,8	
GRB 050213	1 267,8 ± 158,3	7 490,5 ± 315,0	1,749 ± 0,157	0,465 ± 0,067	0,362 ± 0,049	1,284 ± 0,116	23,8	I
GRB 050214	550,7 ± 270,3	2 964,4 ± 481,5	0,964 ± 0,315	0,365 ± 0,191	0,609 ± 0,355	0,599 ± 0,219	6,2	
GRB 050216	172,5 ± 27,2	364,5 ± 37,3	3,684 ± 0,949	2,217 ± 0,621	1,511 ± 0,337	1,467 ± 0,411	9,8	I
GRB 050219	391,7 ± 89,2	14 747,3 ± 220,2	0,500 ± 0,017	0,040 ± 0,009	0,087 ± 0,020	0,460 ± 0,015	67,0	II
GRB 050312	94,4 ± 15,7	510,4 ± 41,5	2,163 ± 0,449	0,585 ± 0,149	0,371 ± 0,070	1,578 ± 0,334	12,3	I
GRB 050314		5 765,6 ± 202,8	0,334 ± 0,036			0,340 ± 0,029	28,4	II
GRB 050320	286,1 ± 112,0	2 841,6 ± 230,4	1,135 ± 0,184	0,215 ± 0,088	0,234 ± 0,095	0,920 ± 0,144	12,3	
GRB 050321	178,5 ± 89,5	1 725,3 ± 179,2	0,828 ± 0,177	0,189 ± 0,098	0,296 ± 0,157	0,639 ± 0,134	9,6	
GRB 050404	1 495,8 ± 112,9	13 644,3 ± 278,5	1,266 ± 0,053	0,248 ± 0,021	0,244 ± 0,019	1,018 ± 0,043	49,0	II
GRB 050408		830,0 ± 145,2	0,140 ± 0,161			0,208 ± 0,118	5,7	
GRB 050409	540,5 ± 46,1	1 020,2 ± 61,7	4,975 ± 0,850	3,166 ± 0,568	1,750 ± 0,230	1,809 ± 0,338	16,5	II
GRB 050411	117,9 ± 84,5	1 814,4 ± 175,9	0,762 ± 0,155	0,115 ± 0,083	0,177 ± 0,130	0,648 ± 0,123	10,3	
GRB 050412	147,7 ± 142,4	7 825,5 ± 311,4	0,314 ± 0,039	0,025 ± 0,024	0,086 ± 0,083	0,289 ± 0,031	25,1	II
GRB 050429	507,8 ± 141,9	3 694,6 ± 286,5	1,366 ± 0,213	0,325 ± 0,098	0,312 ± 0,093	1,041 ± 0,163	12,9	
GRB 050430		2 328,6 ± 275,8	1,005 ± 0,238			0,922 ± 0,189	8,4	
GRB 050501		550,6 ± 73,2	1,291 ± 0,326			1,065 ± 0,208	7,5	
GRB 050509	737,8 ± 136,5	16 431,7 ± 297,0	0,864 ± 0,032	0,084 ± 0,016	0,107 ± 0,020	0,780 ± 0,026	55,3	IV
GRB 050525a		8 857,6 ± 191,4	0,392 ± 0,023			0,383 ± 0,019	46,3	II
GRB 050525b	1 522,0 ± 110,7	18 410,6 ± 247,9	1,159 ± 0,031	0,179 ± 0,013	0,182 ± 0,014	0,981 ± 0,026	74,3	IV
GRB 050531	1 971,3 ± 159,1	23 197,4 ± 356,3	0,823 ± 0,026	0,155 ± 0,013	0,232 ± 0,020	0,669 ± 0,021	65,1	II
GRB 050717	1 395,5 ± 89,5	7 385,4 ± 190,7	1,721 ± 0,095	0,514 ± 0,041	0,426 ± 0,031	1,207 ± 0,069	38,7	
GRB 050726	537,6 ± 118,8	9 326,0 ± 249,7	0,875 ± 0,048	0,108 ± 0,024	0,141 ± 0,032	0,767 ± 0,039	37,4	II
GRB 050805	185,5 ± 38,8	1 212,8 ± 73,5	1,993 ± 0,259	0,458 ± 0,108	0,298 ± 0,066	1,535 ± 0,198	16,5	II
GRB 050814	30,1 ± 11,3	501,9 ± 29,3	3,989 ± 0,634	0,299 ± 0,121	0,081 ± 0,031	3,690 ± 0,583	17,2	III
GRB 050820		2 023,5 ± 167,8	0,439 ± 0,098			0,385 ± 0,075	12,1	
GRB 050824	256,7 ± 20,8	1 185,6 ± 44,0	2,145 ± 0,178	0,681 ± 0,073	0,465 ± 0,045	1,464 ± 0,128	26,9	IV
GRB 050829		314,9 ± 69,0	0,885 ± 0,394			0,831 ± 0,329	4,6	
GRB 051012	421,0 ± 48,7	4 827,3 ± 113,0	1,027 ± 0,048	0,177 ± 0,021	0,208 ± 0,025	0,850 ± 0,039	42,7	II
GRB 051031	783,1 ± 254,6	10 052,4 ± 473,8	1,109 ± 0,103	0,164 ± 0,054	0,174 ± 0,058	0,945 ± 0,081	21,2	I
GRB 051103	1 140,1 ± 34,8	1 654,2 ± 41,9	9,128 ± 0,785	6,980 ± 0,609	3,250 ± 0,204	2,148 ± 0,211	39,5	I



Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	$T_{90}$ [s]	Start Time (UTC)	Peak Time (UTC)	Peak Flux $P$ [countes/s]	Fluence $F_{1\_T90}$ 25 - 120 keV [countes]	Fluence $F_{2\_T90}$ 120 - 400 keV [countes]
GRB 051109	25,50	9-Nov-2005 16:41:14,50	9-Nov-2005 16:42:00,75	953,5	4 069,3 ± 216,7	1 873,2 ± 232,1
GRB 051124	36,80	24-Nov-2005 14:20:07,00	24-Nov-2005 14:20:11,10	2 597,9	4 543,0 ± 235,5	2 355,3 ± 218,8
GRB 051201	5,20	1-Dec-2005 09:59:28,40	1-Dec-2005 09:59:32,60	260,9	536,0 ± 87,4	98,2 ± 78,5
GRB 051211	29,40	11-Dec-2005 05:27:46,30	11-Dec-2005 05:28:13,25	1 506,6	7 043,5 ± 214,1	7 418,6 ± 198,0
GRB 051221	0,28	21-Dec-2005 01:51:15,49	21-Dec-2005 01:51:15,98	13 183,6	348,9 ± 26,6	398,8 ± 26,3
GRB 060101	19,60	1-Jan-2006 00:33:48,80	1-Jan-2006 00:34:11,80	1 578,3	3 087,8 ± 169,1	3 018,5 ± 163,9
GRB 060111	69,00	11-Jan-2006 08:48:50,50	11-Jan-2006 08:49:00,25	998,6	7 462,3 ± 307,2	9 298,1 ± 317,4
GRB 060117	15,90	17-Jan-2006 06:50:01,10	17-Jan-2006 06:50:13,85	1 293,0	3 189,8 ± 160,5	1 695,0 ± 168,1
GRB 060121	2,38	21-Jan-2006 22:24:55,11	21-Jan-2006 22:24:56,76	2 918,1	1 523,0 ± 70,5	1 080,1 ± 68,7
GRB 060123	11,00	23-Jan-2006 05:05:20,80	23-Jan-2006 05:05:24,90	3 834,0	8 375,1 ± 160,9	5 560,7 ± 157,8
GRB 060124	17,60	24-Jan-2006 16:04:08,20	24-Jan-2006 16:04:22,40	742,7	1 600,6 ± 152,1	1 625,3 ± 138,4

Tabulka 16.1. Katalog GRB RHESSI - pokračování

GRB's Name	Fluence $F_{3\_T90}$ 400 - 1500 keV [countes]	Fluence $F_{T90}$ 25 - 1500 keV [countes]	Hardness Ratio $H_{23\_1}$	Hardness Ratio $H_{31}$	Hardness Ratio $H_{32}$	Hardness Ratio $H_{21}$	$S/N$	$MT$
GRB 051109	$608,5 \pm 230,8$	$6\ 551,0 \pm 392,6$	$0,610 \pm 0,087$	$0,150 \pm 0,057$	$0,325 \pm 0,130$	$0,460 \pm 0,062$	16,7	I
GRB 051124	$409,9 \pm 185,5$	$7\ 308,2 \pm 371,1$	$0,609 \pm 0,071$	$0,090 \pm 0,041$	$0,174 \pm 0,080$	$0,518 \pm 0,055$	19,7	III
GRB 051201		$698,5 \pm 136,6$	$0,303 \pm 0,202$			$0,183 \pm 0,149$	5,1	
GRB 051211	$1\ 958,8 \pm 166,0$	$16\ 420,9 \pm 335,5$	$1,331 \pm 0,055$	$0,278 \pm 0,025$	$0,264 \pm 0,023$	$1,053 \pm 0,043$	48,9	II
GRB 051221	$111,4 \pm 17,7$	$859,1 \pm 41,3$	$1,462 \pm 0,144$	$0,319 \pm 0,056$	$0,279 \pm 0,048$	$1,143 \pm 0,115$	20,8	IV
GRB 060101	$576,7 \pm 133,2$	$6\ 683,0 \pm 270,6$	$1,164 \pm 0,094$	$0,187 \pm 0,044$	$0,191 \pm 0,045$	$0,978 \pm 0,075$	24,7	II
GRB 060111	$1\ 509,7 \pm 285,0$	$18\ 270,1 \pm 525,7$	$1,448 \pm 0,083$	$0,202 \pm 0,039$	$0,162 \pm 0,031$	$1,246 \pm 0,067$	34,8	II
GRB 060117		$4\ 740,7 \pm 278,4$	$0,486 \pm 0,075$			$0,531 \pm 0,059$	17,0	II
GRB 060121	$115,3 \pm 56,5$	$2\ 718,5 \pm 113,5$	$0,785 \pm 0,069$	$0,076 \pm 0,037$	$0,107 \pm 0,053$	$0,709 \pm 0,056$	23,9	I
GRB 060123	$633,1 \pm 136,9$	$14\ 568,9 \pm 263,6$	$0,740 \pm 0,029$	$0,076 \pm 0,016$	$0,114 \pm 0,025$	$0,664 \pm 0,023$	55,3	II
GRB 060124	$170,3 \pm 111,5$	$3\ 396,1 \pm 233,9$	$1,122 \pm 0,154$	$0,106 \pm 0,070$	$0,105 \pm 0,069$	$1,015 \pm 0,130$	14,5	II

## 17 Závěr

Na závěr shrňme, co bylo v této práci uděláno a jaké jsou výsledky. Kromě teoretické rešerše v kapitolách 3 – 11 bylo v první řadě použitím programu SSW IDL získáno množství různých veličin charakterizujících každý z 228 GRB pozorovaných pomocí RHESSI v období od poloviny února 2002 do konce ledna 2006 a z nich byla sestavena databáze uvedená v kapitole 16.

Získané světelné křivky byly klasifikovány do čtyř morfologických skupin podle dělení popsaného v kapitole 12. Vzhledem k tomu, že profily některých gama záblesků mohou být na hranici mezi dvěma morfologickými skupinami a vzhledem k tomu, že v naší databázi je mnoho záblesků s relativně malým poměrem signálu ku šumu, může být jednoznačné zařazení do konkrétní skupiny obtížné. Proto bylo toto zařazení provedeno pouze pro část GRB (detekovaných družicí RHESSI) a výsledek je uveden v databázi v kapitole 16.

Již dlouhou dobu se ví, že existují minimálně dvě podskupiny gama záblesků: dlouhé a krátké. V některých člancích se diskutuje existence i třetí podskupiny tzv. prostředních záblesků. Proto bylo v kapitole 13 prostudováno rozdělení dob trvání gama záblesků a prokládáním lognormálních funkcí ohodnocených  $\chi^2$  testem byl hledán počet případných podskupin v pozorovatelských dat z družice RHESSI. Bylo zjištěno, že hladina významnosti pro jedno-lognormální fit je mnohem menší než 0,01 %, a proto lze v našem rozdělení GRB zamítnout hypotézu existence jediné skupiny gama záblesků reprezentované jedním lognormálním rozdělením. Na druhou stranu jak ukazuje tabulka 13.1, zavedení dvou-lognormálního fitu reprezentujícího dvě podskupiny vedlo k významnému zvýšení hladiny významnosti  $\alpha$ , a z tohoto pohledu je na místě mluvit o bimodálním rozdělení. Zavedením další podskupiny (prostřední) došlo sice ke zvýšení hladiny významnosti, ale pouze nepatrně, proto nelze v našem souboru dat jednoznačně prokázat existenci třetí podskupiny tzv. prostředních gama záblesků. K této části je třeba ještě říci, že procento GRB s  $T_{90} < 2$  s (což bývá pokládáno za hranici mezi krátkými a dlouhými) je pro záblesky pozorovaných pomocí RHESSI přibližně 15 %. Srovnání s výsledky z jiných aparatur lze nalézt na konci kapitoly 13.4.

V další části této práce je diskutováno rozdělení počtu gama záblesků, jejichž maximální hustota zářivého toku  $P$  je větší než daná hodnota  $P_i$ . Pomocí této závislosti je možné nepřímo studovat prostorové rozdělení radiálních vzdáleností GRB. Pro data z družice RHESSI byla zjištěna pro slabé (vzdálenější) gama záblesky odchylka od třípolovinového zákona. Dále výsledky  $V/V_{\max}$  testu ukazují na nehomogenní rozdělení radiálních vzdáleností zdrojů GRB s tím, že záblesky patřící do podskupiny tzv. dlouhých se zdají být rozděleny více nehomogenně než tzv. krátké záblesky:  $\langle V/V_{\max} \rangle_{\text{short}} = 0,14 \pm 0,05$  a  $\langle V/V_{\max} \rangle_{\text{long}} = 0,09 \pm 0,02$  jak je uvedeno ve vzorci 14.6.

V kapitole 15 je popsána závislost veličiny hardness ratio na době trvání gama záblesků a toto rozdělení pro GRB pozorovaných pomocí RHESSI je porovnáno s podobným rozdělením pro pozorování z přístroje BATSE.

## 18 Seznam referenci

- Balázs L. G., *et al.* (1998): Anisotropy of Sky Distribution of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics* **339**, 1.
- Balázs L.G., *et al.* (1999): An Intrinsic Anisotropy in the Angular Distribution of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **138**, 417.
- Balázs L. G., *et al.* (2003): On the Difference between the Short and Long Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics* **401**, 129 – 140.
- Balastegui A., *et al.* (2001): Reclassification of Gamma-Ray Bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **328**, 283 – 290.
- Band D. L. (1996): Gamma-Ray Burst Continua: A Review. *AIP Conference Proceedings* **384**, 123.
- Barat C., *et al.* (1981): A Review of Recent Results from the Franco-Soviet Gamma-Burst Experiments. *Astrophysics and Space Science* **75**, 83 – 91.
- Bhat P. N., *et al.* (1992): Evidence of Sub-Millisecond Structure in a Gamma-Ray Burst. *Nature* **359**, 217 – 218.
- Bhat P. N., *et al.* (1994): Spectral Evolution of a Subclass of Gamma-Ray Bursts Observed by BATSE. *The Astrophysical Journal* **426**, 604 – 611.
- Boer M., *et al.* (1986): The SIGNE II Gamma-Ray Burst Experiment Aboard the Prognoz 9 Satellite. *Advances in Space Research* **6**, 97 – 102.
- Brandt S., *et al.* (1994): Gamma Ray Burst Observed with WATCH-EURECA. *AIP Conference Proceedings* **307**, 13 – 16.
- Castro-Tirado A. J., *et al.* (1994): WATCH Observations of Gamma Ray Bursts During 1990–1992. *AIP Conference Proceedings* **307**, 17 – 21.
- Duncan R. C. (1992): Formation of Very Strongly Magnetized Neutron Stars: Implications for Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **392**, 9 – 13.
- Evans W. D., *et al.* (1981): Gamma-Burst Observations from the Pioneer Venus Orbiter. *Astrophysics and Space Science* **75**, 35 – 46.
- Fan Y., *et al.* (2006): The Interpretation and Implication of the Afterglow of GRB 060218. *astro-ph/0604016*.
- Fishman G. (1993): *Proc. Compton Gamma Ray Obs. Symp. 1992, St Louis*, 669 – 680.
- Fishman G. J., *et al.* (1994): Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin. *Science* **264**, 1313.

- Fishman G. J. (1995a): Gamma-Ray Bursts: An Overview. *Publications of Astronomical Society of the Pacific* **107**, 1145 – 1151.
- Fishman G. J., Meegan C. A. (1995b): Gamma-Ray Bursts. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **33**, 415 – 458.
- Forrest D. J., *et al.* (1980): The Gamma Ray Spectrometer for the Solar Maximum. *Solar Physics* **65**, 15 – 23.
- Gehrels N., *et al.* (2004): The Swift Gamma-Ray Burst Mission. *The Astrophysical Journal* **611**, 1005 – 1020.
- Greiner J., Moskalenko E. I. (1994): Re-analysis of Three Archival Optical Objects on Odessa Plates. *Astronomy and Astrophysics* **283**, 693 – 697.
- Guetta D., Piran T. (2006): The BATSE-Swift Luminosity and Redshift Distributions of Short-Duration GRBs. *astro-ph/0511239 v2*.
- Horváth I. (1998): A Third Class of Gamma-Ray Burst. *The Astrophysical Journal* **508**, 757 – 759.
- Horváth I., *et al.* (2001): The Observed Sky Distribution of the Gamma-Ray Bursts. *Bolyai Szemle* Vol. 10, No.1, 50.
- Horváth I. (2002a): A Further Study of the BATSE Gamma-Ray Burst Duration Distribution. *Astronomy and Astrophysics* **392**, 791 – 793.
- Horváth I. (2002b): Likelihood Estimation of Gamma-Ray Bursts Duration Distribution. *Statistical Challenges in Modern Astronomy III*, Springer 2002, ed. by E. D. Feigelson & G. Jogesh Babu, 393 – 396.
- Horváth I., *et al.* (2004): Where is the Third Subgroup of Gamma-Ray Bursts? *Baltic Astronomy* **13**, 217 – 220.
- Horváth I. (2005): The Classification of the Gamma-Ray Bursts. *Bolyai Szemle*, Bolyai Military University Publisher, **XIV/4**, 2005, 67.
- Horváth I., *et al.* (2006): A New Definition of the Intermediate Group of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics* **447**, 23 – 30.
- Hudec R. (1998): Zábleskové zdroje záření gama: astrofyzikální záhada století. *Československý časopis pro fyziku* **48**, 3 – 18.
- Hurley K., Desai U. (1986): *AIP Conference Proceedings* **141**, 4 – 16.
- Hurley K., *et al.* (1992): The Solar X-Ray/Cosmic Gamma-Ray Burst Experiment Aboard ULYSSES. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **92**, 401 – 410.
- Hurley K. (2003): A Gamma-Ray Burst Bibliography, 1973 – 2001. *AIP Conference Proceedings* **662**, 153.

- Klebesadel R. W., *et al.* (1973): Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *The Astrophysical Journal* **182**, 85 – 88.
- Klebesadel R. W., *et al.* (1981): The LAST Gamma-Ray Burst Astronomy Program. *Astrophysics and Space Science* **75**, 5 – 13.
- Klebesadel R. (1992): *Proceedings of Los Alamos Workshop 1990, Taos*, 161 – 168.
- Knight F. K., *et al.* (1981): The Spectra and Light Curves of Two Gamma-Ray Bursts. *Astrophysics and Space Science* **75**, 21 – 30.
- Koshut T. M., *et al.* (1996): Systematic Effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **463**, 570 – 592.
- Kouveliotou C., *et al.* (1992): Fast Fourier Transformation Results from Gamma-Ray Burst Profiles. *AIP Conference Proceedings* **265**, 299 – 303.
- Kouveliotou C., *et al.* (1993a): Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **413**, 101 – 104.
- Kouveliotou C., *et al.* (1993b): Recurrent Burst Activity from the Soft Gamma-Ray Repeater SGR 1900 + 14. *Nature* **362**, 728 – 730.
- Kouveliotou C., *et al.* (1994): The Rarity of Soft Gamma-Ray Repeaters Deduced from Reactivation of SGR: 1806-20. *Nature* **368**, 125.
- Kouveliotou C., *et al.* (1996): Correlations between Duration, Hardness, and Intensity in GRBs. *AIP Conference Proceedings* **384**, 42.
- Kulkarni S. R., *et al.* (1994): The Radio Nebula of the Soft Gamma-Ray Repeater 1806-20. *Nature* **368**, 129.
- Laros J. G., *et al.* (1994): Status of Burst Detection by the Mars Observer GRS Experiment. *AIP Conference Proceedings* **307**, 32.
- Lin R. P., *et al.* (2002): The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Solar Physics* **210**, 3 – 32.
- Link B., *et al.* (1993): Prevalent Properties of Gamma-Ray Burst Variability. *The Astrophysical Journal* **408**, 81 – 84.
- Litvin V. F., *et al.* (2001): Anisotropy in the Sky Distribution of Short Gamma-Ray Bursts. *Astronomy Letters* **27**, 416 – 420.
- Mazets E. P., *et al.* (1979): Observations of a Flaring X-Ray Pulsar in Dorado. *Nature* **282**, 587 – 589.
- Mazets E. P., Golenetskii S. V. (1981a): Recent Results from the Gamma-ray Burst Studies in the KONUS Experiment. *Astrophysics and Space Science* **75**, 47 – 81.

- Mazets E. P., *et al.* (1981b): Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts from the KONUS Experiment Data. I. *Astrophysics and Space Science* **80**, 3 – 83.
- Mazets E. P., *et al.* (1983): Energy Spectra of the Cosmic Gamma-Ray Bursts. *AIP Conference Proceedings* **101**, 36 – 53.
- McBreen B., *et al.* (1994): Lognormal Distributions in Gamma-Ray Bursts and Cosmic Lightning. *MNRAS* **271**, 662 – 666.
- Meegan C. A. (1996): The BATSE 3B Catalog. *AIP Conference Proceedings* **384**, 291.
- Meredith D. C., *et al.* (1994): Wavelet Analysis of Gamma Ray Bursts. *AIP Conference Proceedings* **307**, 701 – 705.
- Mészáros A., *et al.* (2000a): On the Existence of Intrinsic Anisotropies in the Angular Distribution of Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics* **354**, 1.
- Mészáros A., *et al.* (2000b): Testing the Intrinsic Randomnesses in the Angular Distribution of Gamma-Ray Bursts. *AIP Conference Proceedings* **526**, 102 – 106.
- Mészáros A., *et al.* (2000c): A Remarkable Angular Distribution of the Intermediate Subclass of the Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **539**, 98.
- Mészáros A., *et al.* (2001): Probing the Isotropy in the Sky Distribution of the Gamma-Ray Bursts, in Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era. Proceedings of the International Workshop, Held in Rome, Italy, 17 – 20 October 2000, ESO Astrophysics Symposia Series, eds. E. Costa, F. Frontera, J. Hjorth, Springer, Berlin Heidelberg, p. 47.
- Mészáros A., Štoček J. (2003): Anisotropy in the Angular Distribution of the Long Gamma-Ray Bursts? *Astronomy and Astrophysics* **403**, 443 – 448.
- Mészáros P. (1999): Gamma-Ray Burst Afterglows and Their Implications. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **138**, 533 – 536.
- Mészáros P. (2001): Gamma-Ray Bursts: Accumulating Afterglow Implications, Progenitor Clues and Prospects. *Science* **291**, 79.
- Mészáros P. (2002): Theories of Gamma-Ray Bursts. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **40**, 137 – 169.
- Mukherjee S., *et al.* (1998): Three Types of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **508**, 314 – 327.
- Murakami T., *et al.* (1989): The Gamma-Ray Burst Detector System on Board Ginga. *Publications of the Astronomical Society of Japan* **41**, 405 – 426.
- Murthy P. V. R., Wolfendale A. W. (1993): *Gamma-Ray Astronomy, Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge.

- Nemiroff R. J. (1994a): A Century of Gamma Ray Burst Models. *Comments on Astrophysics* 7, No. 4, 189.
- Nemiroff R. J., *et al.* (1994b): Gamma-Ray Bursts Are Time-Asymmetric. *The Astrophysical Journal* **423**, 432 – 435.
- Norris J. P. (1994): Measuring the Distribution of Temporal Structure in Gamma-Ray Bursts. *AIP Conference Proceedings* **307**, 177 – 181.
- Paciesas W. S., *et al.* (1999): The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog (Revised). *The Astrophysical Journal Supplement Series* **122**, 465 – 495.
- Paul J., *et al.* (1990): *Proc. XXVIII COSPAR Meeting*, The Hague.
- Piran T., (2004): The Physics of Gamma-Ray Bursts. *Review of Modern Physics* **76**, 1143 – 1210.
- Press W. H., *et al.* (1992): *Numerical Recipes in Fortran, Second Edition*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Salamon M. H., Stecker F. W. (1998): Absorption of High-Energy Gamma Rays by Interactions with Extragalactic Starlight Photons at High Redshifts and the High-Energy Gamma-Ray Background. *The Astrophysical Journal* **493**, 547 – 554.
- Schaefer B. E. (1994): Search for Gamma Ray Burst Counterparts. *AIP Conference Proceedings* **307**, 382.
- Schaefer B. E., *et al.* (1998): Gamma-Ray Burst Counterparts: Optical Data. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **118**, 353 – 389.
- Schmidt M. (1968): Space Distribution and Luminosity Functions of Quasi-Stellar Radio Sources. *The Astrophysical Journal* **151**, 393 – 409.
- Schmidt M., *et al.* (1988): Application of the  $V/V_{\max}$  Test to Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal* **329**, 85 – 87.
- Schönfelder V. (2001): *The Universe in Gamma Rays*, Springer-Verlag, Berlin.
- Sentman D. D., *et al.* (1995): Preliminary Results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red Sprites. *Geophysical Research Letters* **22**, 1205 – 1208.
- Smith D. M., *et al.* (2000): Extra-Solar Astrophysics with the High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *AIP Conference Proceedings* **510**, 671.
- Smith D. M., *et al.* (2002a): Non-Solar Astronomy with the Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *SPIE Conference Proceedings* **4851**, 1163 – 1172.
- Smith D. M., *et al.* (2002b): The RHESSI Spectrometer. *Solar Physics* **210**, 33 – 60.



- Share G. H., *et al.* (2002): RHESSI Observation of Atmospheric Gamma Rays from Impact of Solar Energetic Particles on 21 April 2002. *Solar Physics* **210**, 357.
- Štoček J., Mészáros A. (2002): Tři desetiletí gama záblesků. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* **2**, 114 – 124.
- Teegarden B. J., Cline T. L. (1981): High-Resolution Spectroscopy of Gamma-Ray Bursts. *Astrophysics and Space Science* **75**, 181 – 191.
- Terekhov O. V., *et al.* (1994): A Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts Registered by the PHEBUS Instrument of the GRANAT Observatory, December 1989-May 1991. *Astronomy Letters* **20**, 265 – 299.
- van Paradijs J., *et al.* (1997): Transient Optical Emission from the Error Box of the Gamma-Ray Burst of 28 February 1997. *Nature* **386**, 686.
- Vavrek R., *et al.* (2001): Multiscale Statistical Methods and the Angular Distribution of Gamma-Ray Bursts, in Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, Proceedings of the International Workshop, Held in Rome, Italy, 17 – 20 October 2000, ESO Astrophysics Symposia Series, eds. E.Costa, F. Frontera, J. Hjorth, Springer, Berlin Heidelberg, p. 249.
- Vavrek R., *et al.* (2004): Sky Distribution of Gamma-Ray Bursts: an Observational Test of the Friedmannian Universe Models. *Baltic Astronomy* **13**, 231.
- Waxman E. (1997): Gamma-Ray-Burst Afterglow: Supporting the Cosmological Fireball Model, Constraining Parameters, and Making Predictions. *The Astrophysical Journal* **485**, 5 – 8.
- Wheeler J. C., *et al.* (1998): SN 1998bw/GRB 980425: Hypernova or Aspherical Explosion? *American Astronomical Society Meeting* **193**, 4206.
- Woosley S. E., MacFadyen A. I. (1999): Central Engines for Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **138**, 499 – 502.
- Zvára K., Štěpán J. (2002): *Pravděpodobnost a matematická statistika*, MATFYZPRESS, Praha.
- Zytkow A. N. (1990): Are There Optical Counterparts to Gamma-Ray Bursts? *The Astrophysical Journal* **359**, 138 – 157.