

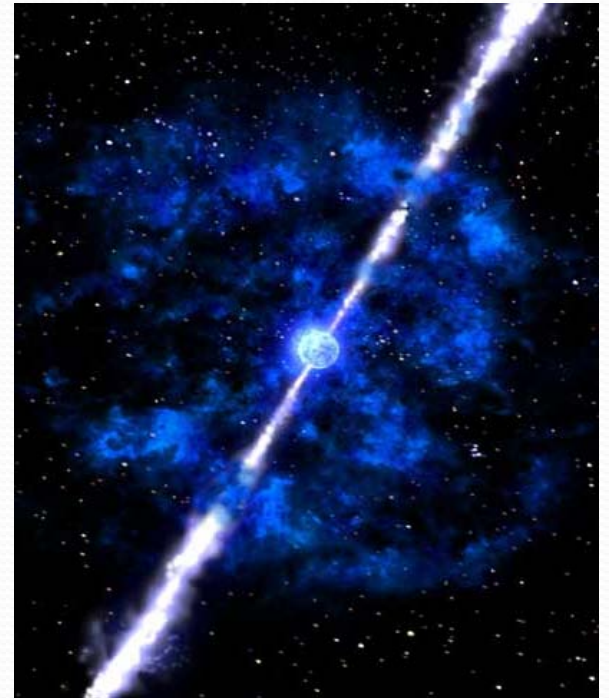
Гамма-всплески

Анализ данных детектора FERMI

Грамматикати К.С.
2016

Гамма-всплески

- **Гамма-всплески (ГВ)** — наиболее яркие ЭМ события во Вселенной, продолжительностью от миллисекунд до часа. За первоначальным всплеском обычно следует долгоживущее «послесвечение», излучаемое на более длинных волнах (рентген, УФ, оптика, ИК и радио).
- Большинство наблюдаемых («длинных») ГВ представляет собой узкий луч мощного излучения, испускаемого во время вспышки сверхновой. Подкласс ГВ — «**короткие**» всплески — побочный эффект другого процесса, возможно слияния двойных нейтронных звёзд.
- ГВ впервые был случайно зарегистрирован 2 июля 1967 года американскими военными спутниками «Vela».



Типы гамма-всплесков

- Кривые блеска ГВ разнообразны, причем наблюдались практически все возможные различия: длительность наблюдаемой эмиссии может варьироваться от миллисекунд до десятков минут, может быть один пик, а может несколько подпиков, одиночные пики могут быть симметричными, а могут иметь резкий рост яркости и медленное затухание.
- Предполагают существование двух различных групп явлений: «**короткие**» всплески со средней длительностью около 0,3 секунды и «**длинные**» всплески со средней длительностью в 30 секунд. Распределения имеют значительный перекрывающийся регионом, в котором природа явлений зависит не только от длительности.

Длинные ГВ

- Большинство ГВ (70%) имеет длительность более двух секунд и классифицируется как **длинные**. Эти явления были изучены гораздо лучше своих коротких аналогов, т.к. имеют яркие послесвечения.
- Почти каждый хорошо изученный **длинный** ГВ был соотнесен с галактикой с быстрым звездообразованием и сверхновой типа «коллапс ядра».
- **Ультрадлиннные ГВ** (с длительностью более 10000 секунд), которые было предложено объединить в самостоятельный класс, вероятно являются результатами коллапсов голубых сверхгигантов. Пока к подтвержденным ультрадлиннным ГВ относятся **GRB 091024A**, **GRB 101225A** и **GRB 111209A**.

Короткие ГВ

- **Короткие ГВ** имеют длительность менее двух секунд (примерно 30% ГВ), но до 2005 года не было зарегистрировано ни одного «послесвечения» такого ГВ и мало что можно было сказать об их природе.
- С тех пор некоторые короткие ГВ были соотнесены с регионами с малым звездообразованием (эллиптические галактики и центральные регионы больших галактических кластеров), что исключает связь с массивными звездами, подтверждая физическое различие между **короткими** и **длинными** ГВ.
- Доминирующая гипотеза о природе **коротких** ГВ состоит в том, что они происходят из слияния двойных нейтронных звезд или нейтронной звезды и черной дыры.

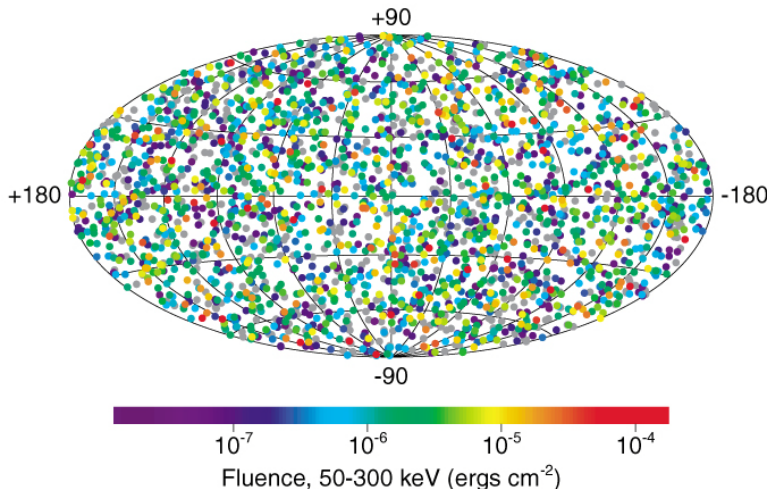
Исследование ГВ

- **Burst and Transient Source Experiment (BATSE)** — инструмент **Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)** - Обсерватории Комптон, второй из «Больших обсерваторий» НАСА после телескопа Хаббл, который был предназначен для обнаружения коротких всплесков (например, гамма всплесков), а также имел возможность проводить обзоры всего неба.
- Обсерватория была запущена на космическом челноке Атлантис (миссия STS-37) 5 апреля 1991 года и работала до 4 июня 2000 года.



CGRO

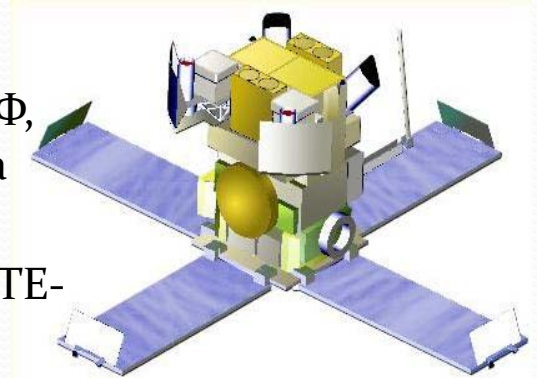
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Инструмент BATSE обнаружил более 2700 гамма всплесков (самый большой набор гамма всплесков до настоящего времени), что впервые позволило провести ряд важных статистических исследований гамма всплесков. Среди прочего удалось показать, что пространственное распределение гамма всплесков очень однородно на небе и они делятся на два больших семейства, со средней длительностью менее и более 2 секунд.

Исследование ГВ

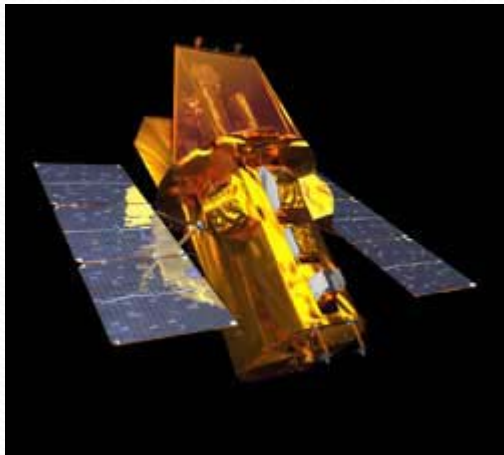
- The **High Energy Transient Explorer (HETE-2)** — американский проект при участии Японии и Франции. Приоритетным направлением миссии являлось изучение гамма-всплесков во разных диапазонах волн с помощью УФ, рентгеновского и гамма-оборудования, установленного на одном компактном спутнике.
- Первый HETE был потерян при запуске 4 ноября 1996, HETE-2 был успешно запущен 9 октября 2000 года и функционировал до марта 2008 года. Орбита спутника была на высоте 625 км.



- **INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL)** — действующая Международная астрофизическая лаборатория гамма-излучения. Была запущена Европейским космическим агентством при участии Роскосмоса и НАСА 17 октября 2002 года с космодрома Байконур с помощью ракеты Протон-К.
- Была самой чувствительной гамма-обсерваторией до запуска **Fermi**.
- В январе 2015 года миссия была продлена до декабря 2016.

Исследование ГВ

- **Swift Gamma-Ray Burst Mission (Swift)** — орбитальная обсерватория, совместный проект США, Италии и Великобритании. Предназначена для регистрации и наблюдения космических гамма-всплесков. Запущена 20 ноября 2004 года с космодрома Мыс Канаверал с помощью ракеты-носителя Дельта-2.
- 27 октября 2015 года Swift зарегистрировал свой 1000-й гамма-всплеск и продолжает успешно функционировать
- Научные приборы:
 - **BAT (Burst Alert Telescope)** Монитор гамма-всплесков, предназначен для обнаружения и определения координат гамма-всплесков. Монитор работает в рентгеновском диапазоне 15-150 кэВ. Обозреваемый телесный угол $60^\circ \times 100^\circ$, или около 1,4 стерadian ($\sim \frac{1}{9}$ от всей небесной сферы).
 - **XRT (X-ray Telescope)** Рентгеновский телескоп, предназначен для определения спектра гамма-всплесков и получения их изображения в рентгеновском диапазоне 0,3-10 кэВ.
 - **UVOT (UltraViolet/Optical Telescope)** Ультрафиолетовый/оптический телескоп, предназначен для получения изображения и спектральных характеристик гамма-всплесков, работает в диапазоне длин волн 170—650 нм. Диаметр зеркала телескопа составляет 0,3 м.



Исследование ГВ

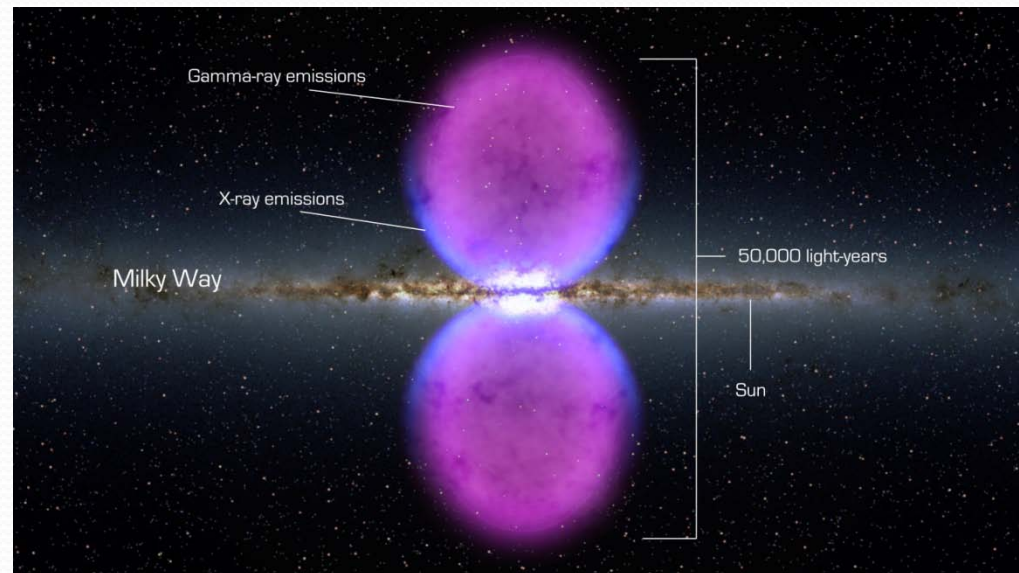
- **Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero (AGILE)** — итальянская орбитальная обсерватория для наблюдения космического пространства в рентгеновском и гамма-диапазонах.
- Спутник запущен 23 апреля 2007 года с индийского космодрома Шрихарикота с помощью ракеты-носителя PSLV-C8.



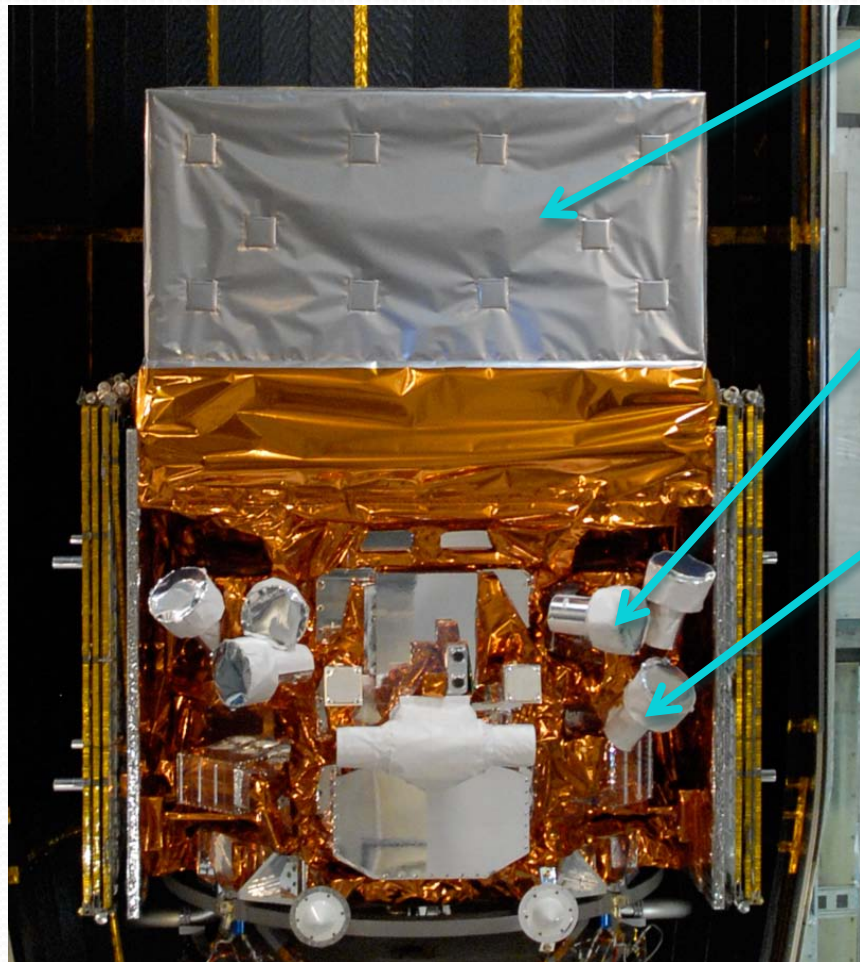
- **Fermi Gamma-ray Space Telescope** названный в честь физика Энрико Ферми, ранее (до 26 августа 2008 года) **GLAST** (англ. *Gamma-ray Large Area Space Telescope*) — космическая обсерватория на низкой земной орбите.
- **Fermi** (GLAST) был запущен на орбиту 11 июня 2008 года на борту ракеты-носителя «Дельта-2 7920H».
- Телескоп обращается вокруг Земли на высоте 565 километров.
- Научные приборы:
 - **Large Area Telescope (LAT)** — гамма-телескоп предназначен для наблюдений в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотен ГэВ. Чувствительность на энергии 100 МэВ в 50 раз выше, чем у его предшественника EGRET Комптоновской обсерватории.
 - **Gamma-ray Burst Monitor (GBM)** — прибор для регистрации гамма-всплесков.
- **Energetic X-ray Imaging Survey Telescope (EXIST)** — рентгеновский телескоп, изначально разработанный как часть МКС, но впоследствии переориентированный на самостоятельную миссию. Планируется запустить в 2017м.

FERMI

- **Fermi Gamma-ray Space Telescope** названный в честь физика Энрико Ферми, до 26 августа 2008 года **GLAST** (англ. *Gamma-ray Large Area Space Telescope*) — космическая обсерватория на низкой земной орбите, объектами наблюдения которой являются: активные ядра галактик, чёрные дыры, нейтронные звёзды, пульсары, микроквазары, космические лучи и остатки сверхновых, галактика Млечный путь, наша Солнечная система, ранняя Вселенная, тёмная материя, гамма-всплески и другие высокоэнергетические источники.
- Данная миссия является совместным проектом НАСА, Министерства энергетики США и правительственных агентств Франции, Италии, Японии и Швеции.
- Некоторые известные открытия:
- **GRB 080916C** – самый мощный зарегистрированный гамма-всплеск
- **Пузыри Ферми** – области слабого рентгеновского и гамма излучения, имеющие форму пузырей и находящиеся над и под плоскостью Млечного пути, диаметр каждого которых оценивается в 30 тысяч световых лет.

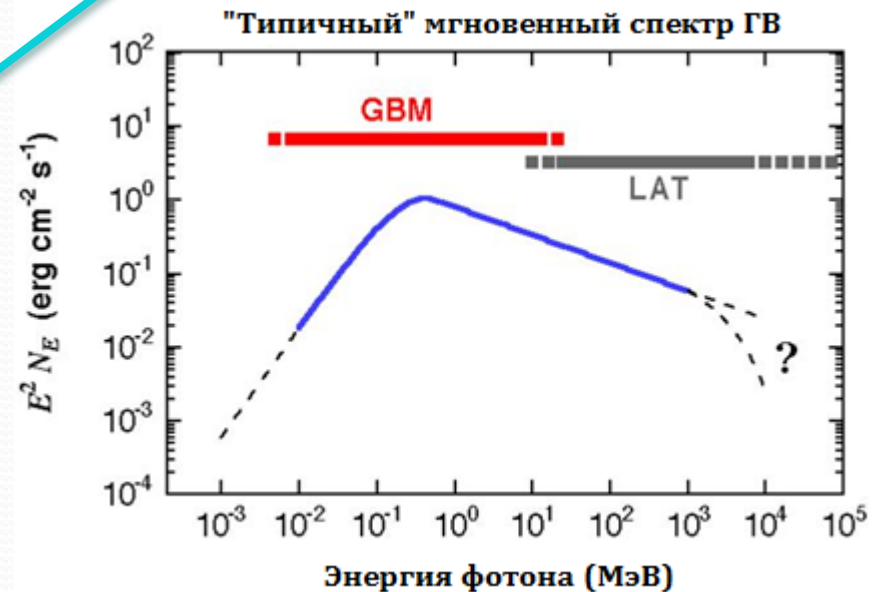


Мониторы FERMI



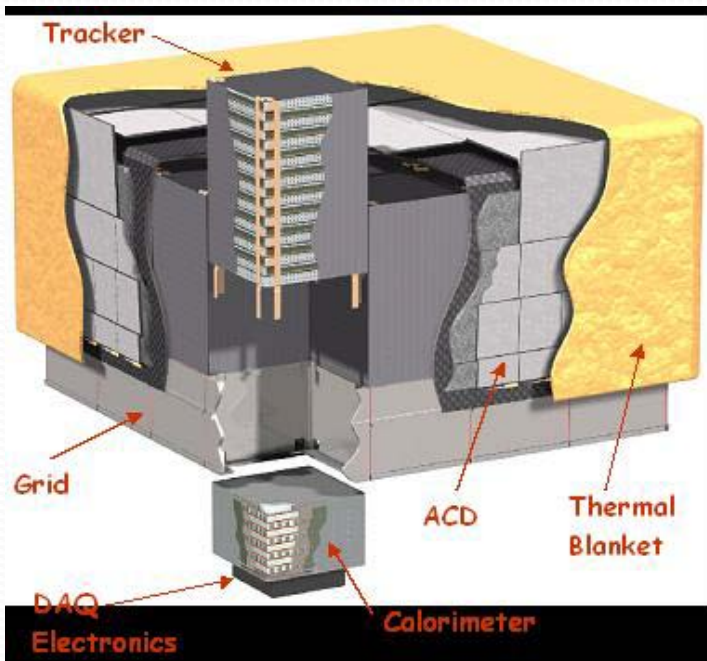
Large Area
Telescope (LAT)

Gamma-ray Burst
Monitor (GBM)



Мониторы FERMI

Large Area Telescope (LAT) — гамма-телескоп предназначен для наблюдений в диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотен ГэВ. Чувствительность на энергии 100 МэВ в 50 раз выше, чем у его предшественника **EGRET** Комптоновской обсерватории.



Параметр	Значение или диапазон
Диапазон энергий	От ~20 МэВ до >300 ГэВ
Энергетическое разрешение	<15% на энергиях >100 МэВ
Эффективная площадь	>8000 см ² при нормальном падении пучка
Угол обзора	2.4 ср
Определение положения источника	<0.5 угловой минуты для высокоширотного источника
Временное разрешение	<10 микросекунд
Отбрасывание фона (после анализа)	<10% остаточного загрязнения для высокоширотного диффузного образца с энергией E = 100 МэВ - 300 ГэВ.
Мертвое время	<100 мкс на событие

Мониторы FERMI

Gamma-ray Burst Monitor (GBM) — прибор, который регистрирует внезапные вспышки гамма излучения от ГВ и солнечных вспышек.

Его сцинтилляторы расположены по обе стороны спутника, чтобы видеть все небо, не перекрытое Землей.



Параметр	Значение или диапазон
Нижний энергетический предел	<10 кэВ
Верхний энергетический предел	>25 МэВ
Энергетическое разрешение	<10% на энергиях 0.1-1 МэВ
Угол обзора	>8 ср
Временное разрешение	<10 мкс
Среднее мертвое время	<10 мкс на отсчет
Чувствительность по всплеску (ошибка 5σ)	<0.5 см ⁻² с ⁻¹
Положение всплеска (систематическая ошибка 1σ)	<15°
Задержка регистрации всплеска	<2 с

Регистрация ГВ - GCN

Активные	Неактивные
IPN	CGRO
KONUS	BeppoSAX
INTEGRAL	NEAR
Swift	ALEXIS
AGILE	HETE
Fermi	MILAGRO
MAXI	XTE-PCA,-ASM
MOA	Suzaku
SNEWS	
Counterpart	
SIMBAD-NED	

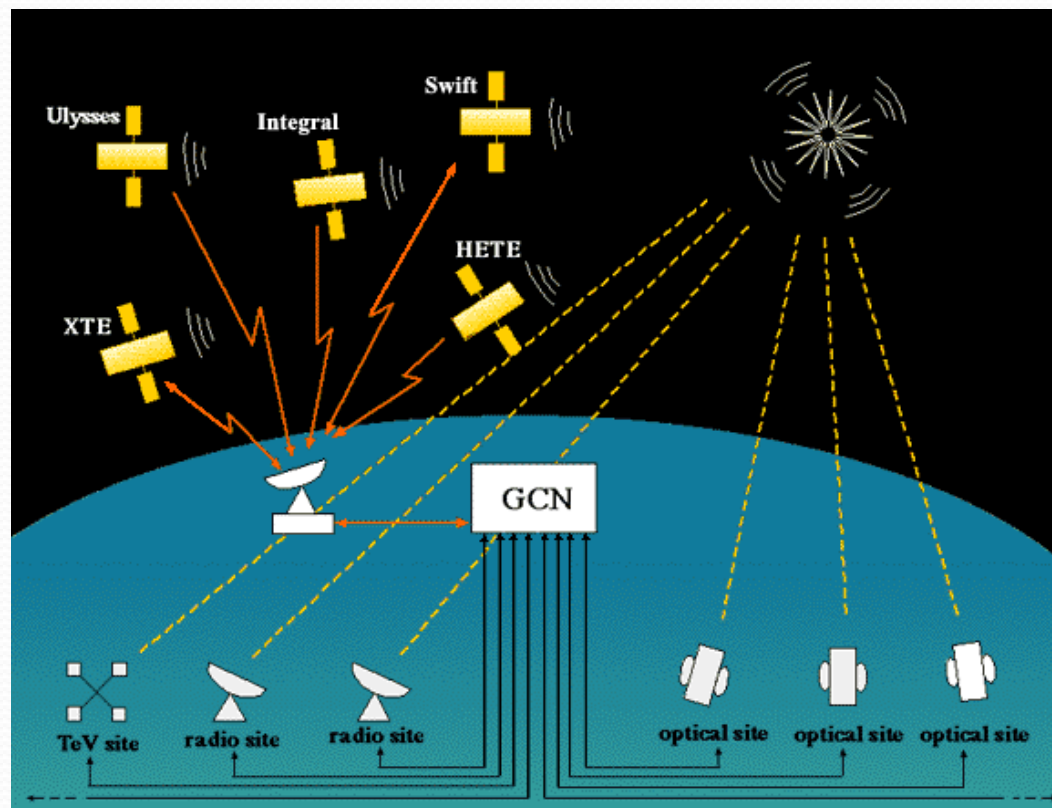


Схема работы GCN

Регистрация ГВ - GCN

- Порядок оповещений GCN:
- 1) **GBM_Alert Notice** – содержит только время и дату регистрации, а также номер триггера и некоторые сопутствующие данные
- 2) **GBM_Flight_Position Notice** - содержит координаты всплеска, автоматически рассчитанные с помощью оборудования на борту Fermi. Может быть несколько уточняющих оповещений
- 3) **GBM_Ground_Position Notice** - содержит уточненные координаты всплеска, автоматически рассчитанные с помощью наземного оборудования.
- 4) **GBM_Final_Position Notice** (отложенное) – ручная обработка имеющихся данных. Обычно проводится для 10-20% наиболее ярких ГВ.

Анализ GRB 151006413

GBM_Ground_Position Notice

TITLE: NOTICE_DATE: NOTICE_TYPE:	GCN/FERMI NOTICE Tue 06 Oct 15 09:58:36 UT Fermi-GBM Ground Position	GRB_PHI:	356.00 [deg]
TRIGGER_NUM:	465818101	GRB_THETA:	30.00 [deg]
GRB_RA:	147.210d {+09h 48m 50s} (J2000), 147.550d {+09h 50m 12s} (current), 146.120d {+09h 44m 29s} (1950)	E_RANGE:	44.032 - 279.965 [keV]
GRB_DEC:	+71.070d {+71d 04' 12"} (J2000), +70.996d {+70d 59' 46"} (current), +71.303d {+71d 18' 09"} (1950)	LOC_ALGORITHM:	41531 (Gnd S/W Version number)
GRB_ERROR:	2.26 [deg radius, statistical only]	SUN_POSTN: SUN_DIST:	191.81d {+12h 47m 14s} -5.07d {-05d 04' 05"} 81.44 [deg] Sun_angle= 3.0 [hr] (West of Sun)
DATA_SIGNIF: DATA_INTERVAL:	45.70 [sigma] 21.504 [sec]	MOON_POSTN: MOON_DIST: MOON_ILLUM:	122.05d {+08h 08m 11s} +15.41d {+15d 24' 37"} 57.68 [deg] 35 [%]
GRB_DATE:	17301 TJD; 279 DOY; 15/10/06	GAL_COORDS:	140.37, 39.28 [deg] galactic lon, lat of the burst (or transient)
GRB_TIME:	35697.83 SOD {09:54:57.83} UT	ECL_COORDS:	116.90, 52.94 [deg] ecliptic lon, lat of the burst (or transient)

Анализ GRB 151006413

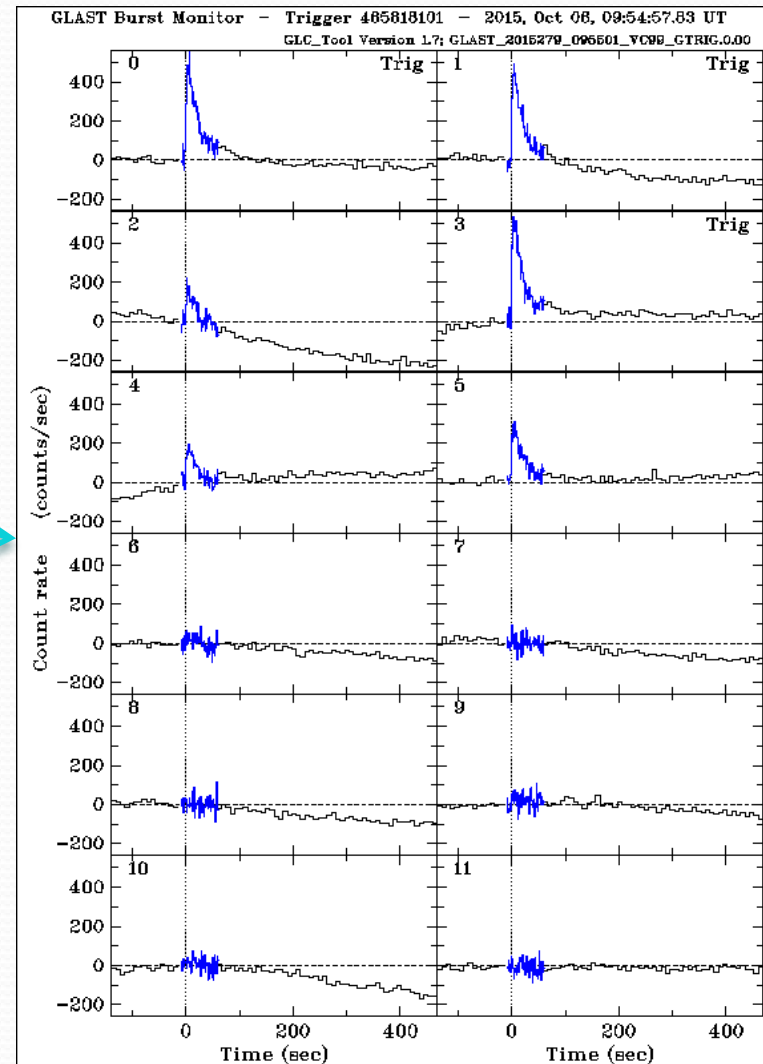
LAT-данные по всплеску

GCN Name:	--	LLE Detection:	NO
MET:	465818104.0	Likelihood Detection:	YES
Date:	2015-10-06	LLE Significance:	--
Time:	09:55:00 (UTC)	Likelihood TS:	26.38
RA:	141.777 degrees	Analysis Start:	0.0
Dec:	70.315 degrees	Analysis Stop:	1000.0
Error:	5.0 degrees	Analysis RA:	141.78 degrees
Source:	Fermi-GBM	Analysis Dec:	70.31 degrees
Theta:	29.391 degrees	Error:	1.59 degrees
Zenith:	79.101 degrees	IRFs:	P8_SOURCE

Анализ GRB 151006413

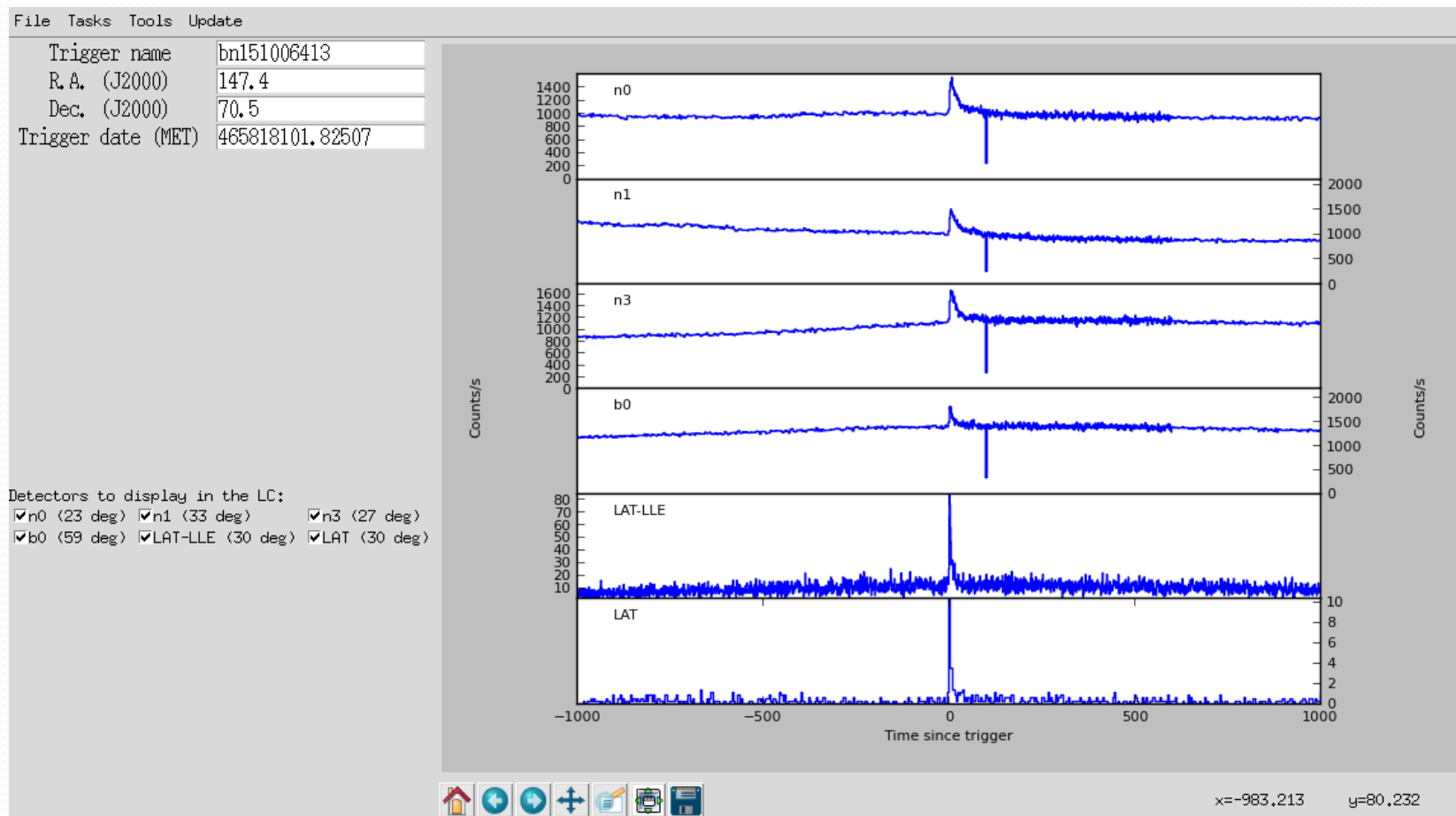
Кривые блеска и
положение детекторов
относительно ГВ

☒ n0	(23 deg)	☒ n1	(33 deg)
☐ n2	(77 deg)	☒ n3	(28 deg)
☐ n4	(72 deg)	☐ n5	(60 deg)
☐ n6	(46 deg)	☐ n7	(69 deg)
☐ n8	(104 deg)	☐ n9	(71 deg)
☐ na	(109 deg)	☐ nb	(120 deg)
☒ b0	(60 deg)	☐ b1	(120 deg)
☒ LAT	(31 deg)	☒ LAT-LLE	(31 deg)



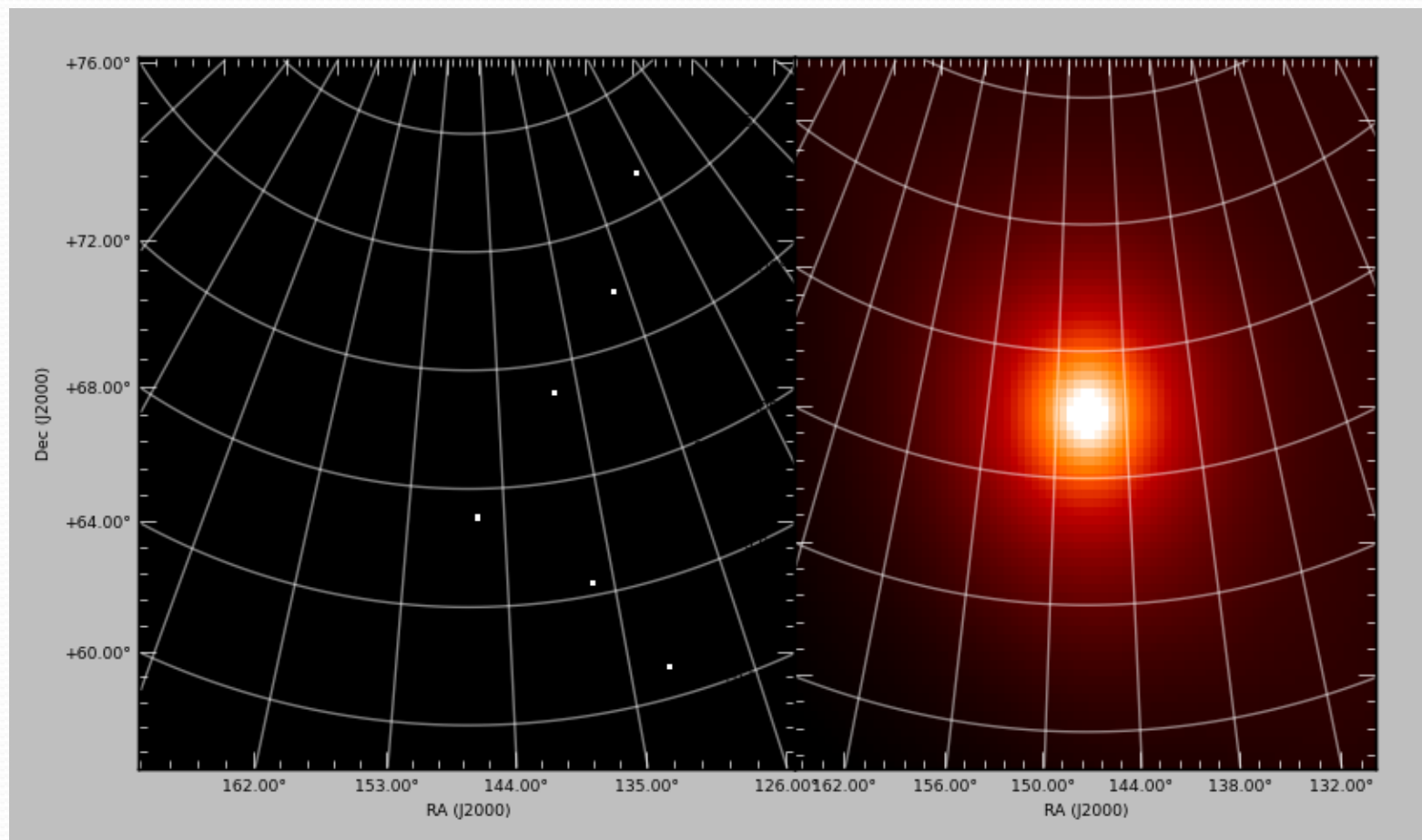
Анализ GRB 151006413

GTBurst



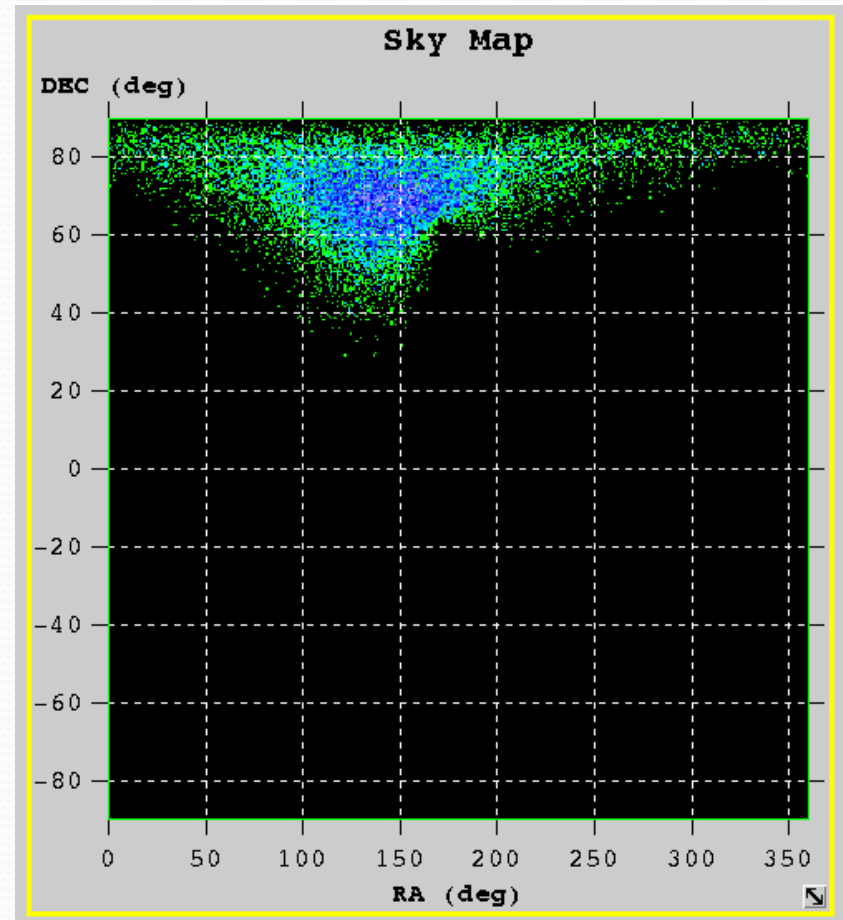
Анализ GRB 151006413

GTBurst – метод максимального правдоподобия

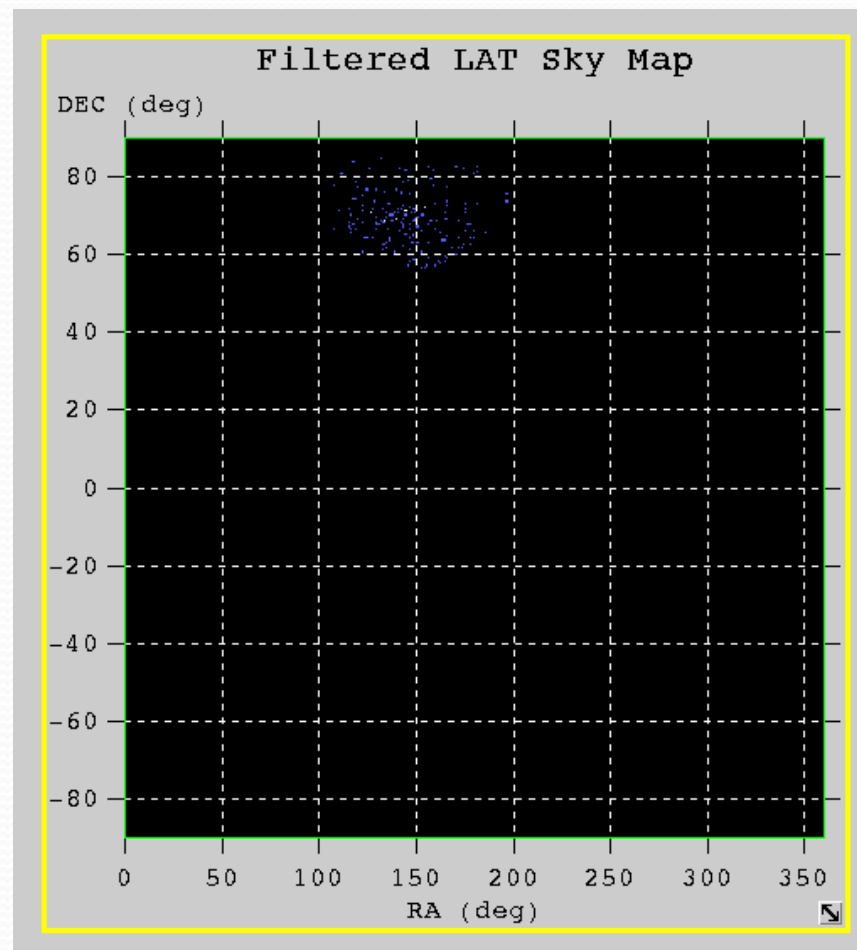
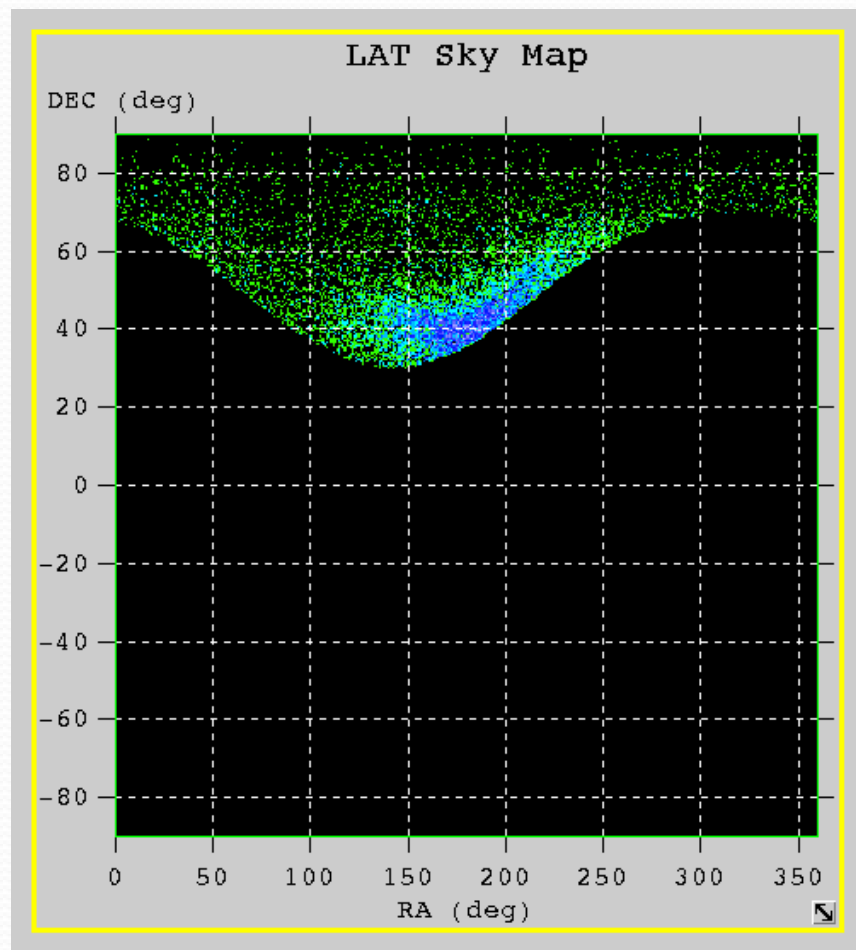


Анализ GRB 151006413

- LAT Low-Energy (LLE) класс был разработан для изучения ГВ и солнечных вспышек в области низких (30-100 МэВ) энергий, где стандартные классы неприменимы из-за большого фона и очень широкой аппаратной функции.
- LLE анализ невозможен, т.к. соотношение сигнал-шум слишком низкое (меньше 5 сигма).



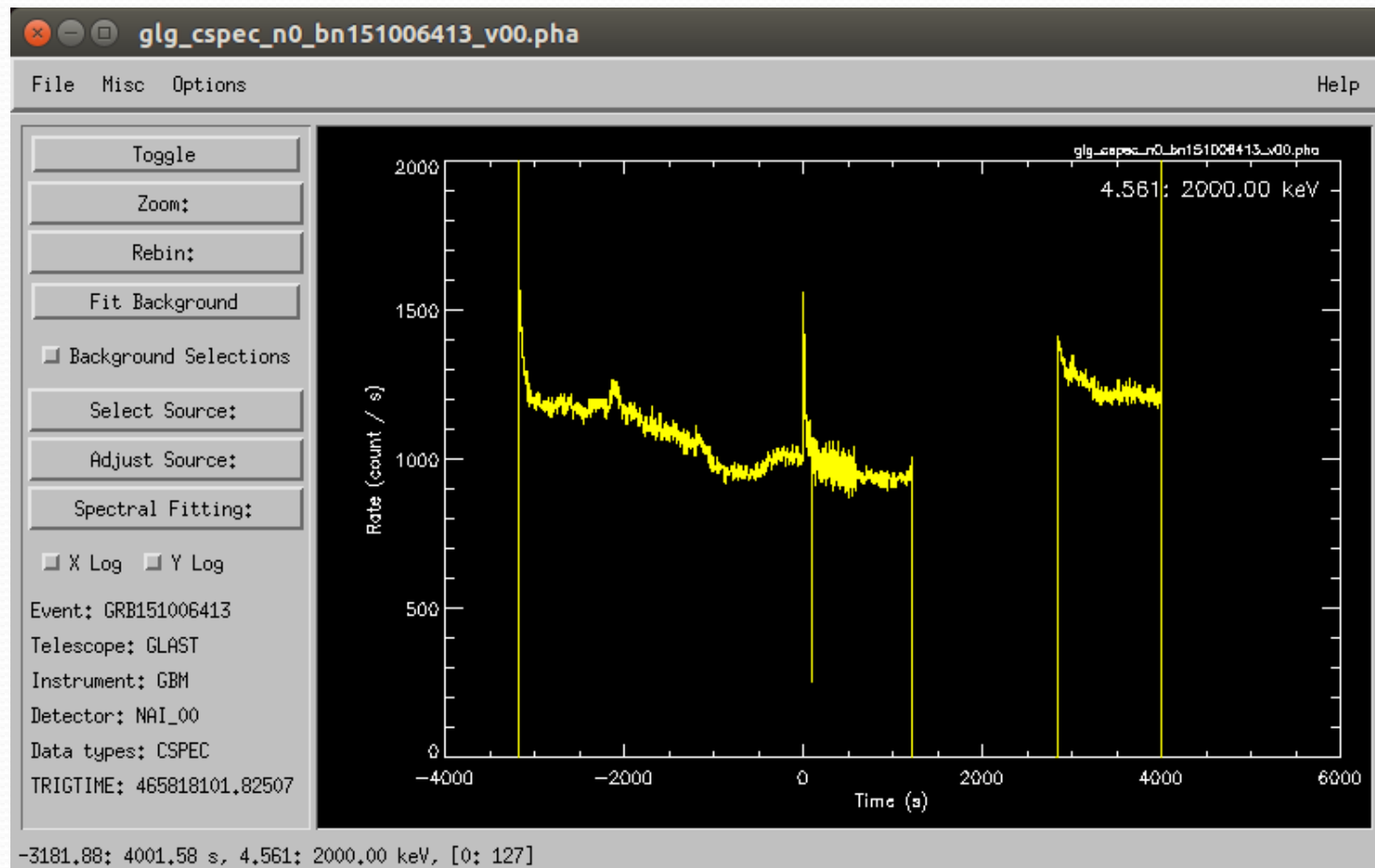
Анализ GRB 151006413



Карта неба по данным LAT до и после фильтрации

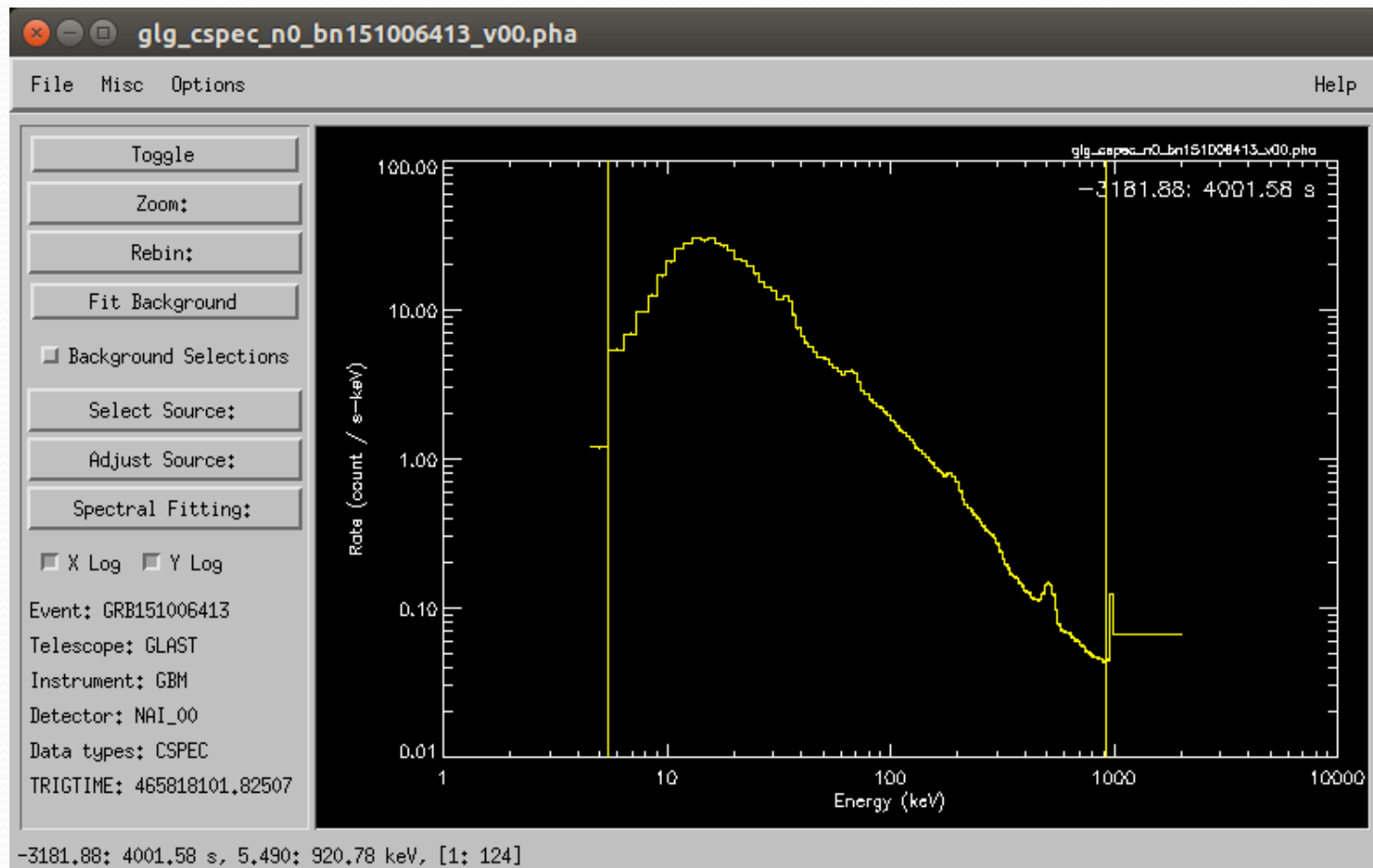
Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



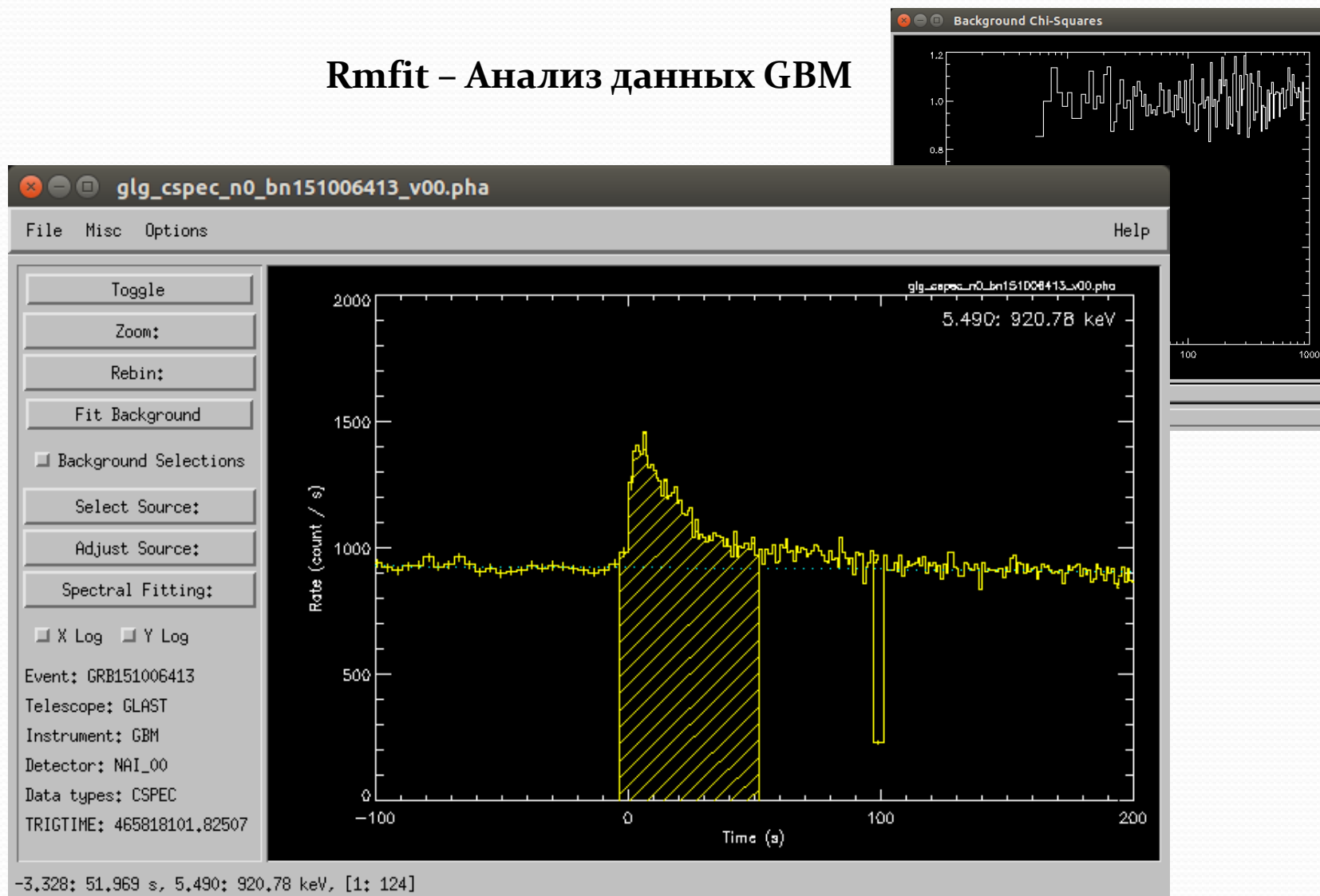
Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



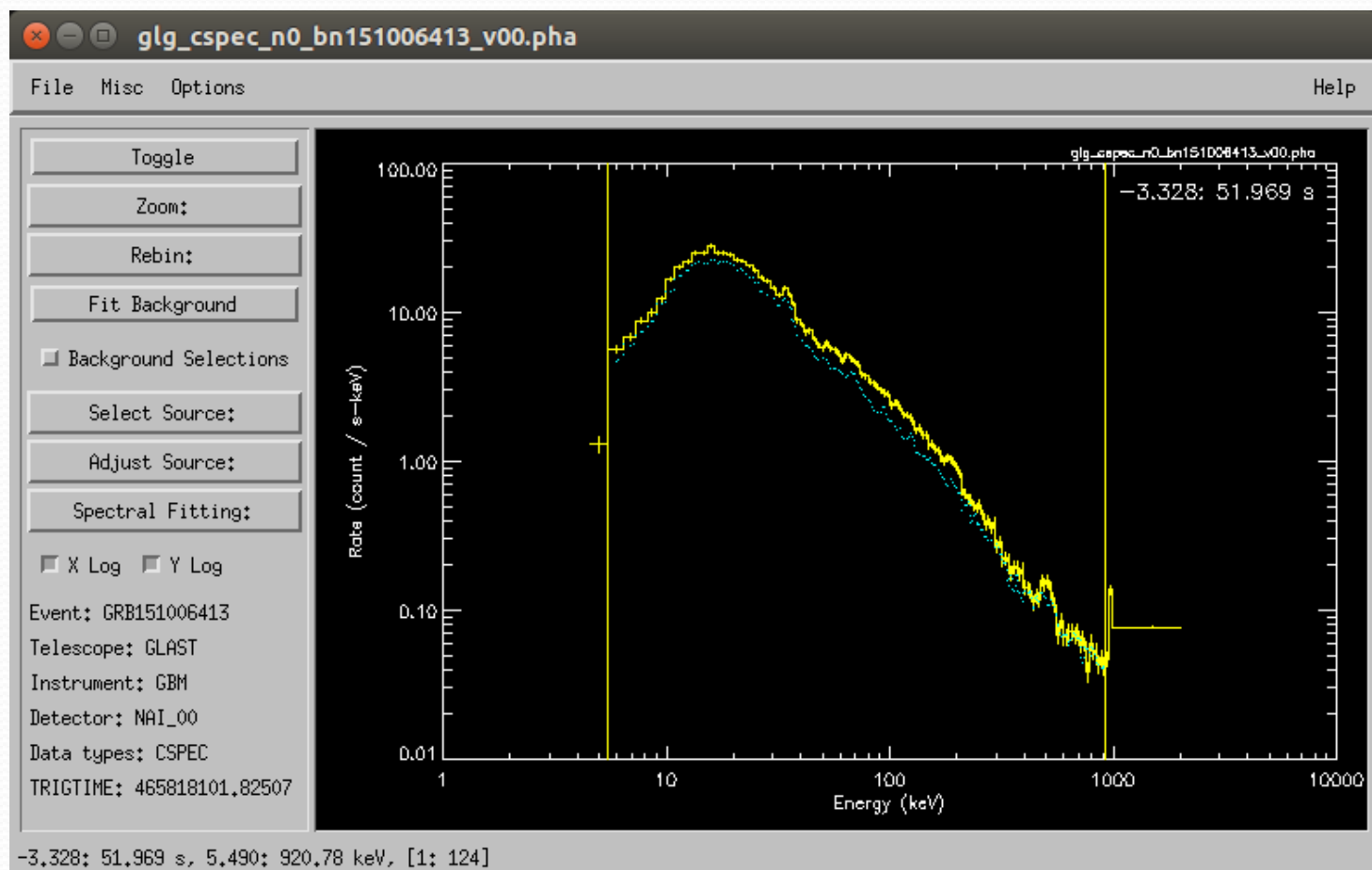
Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



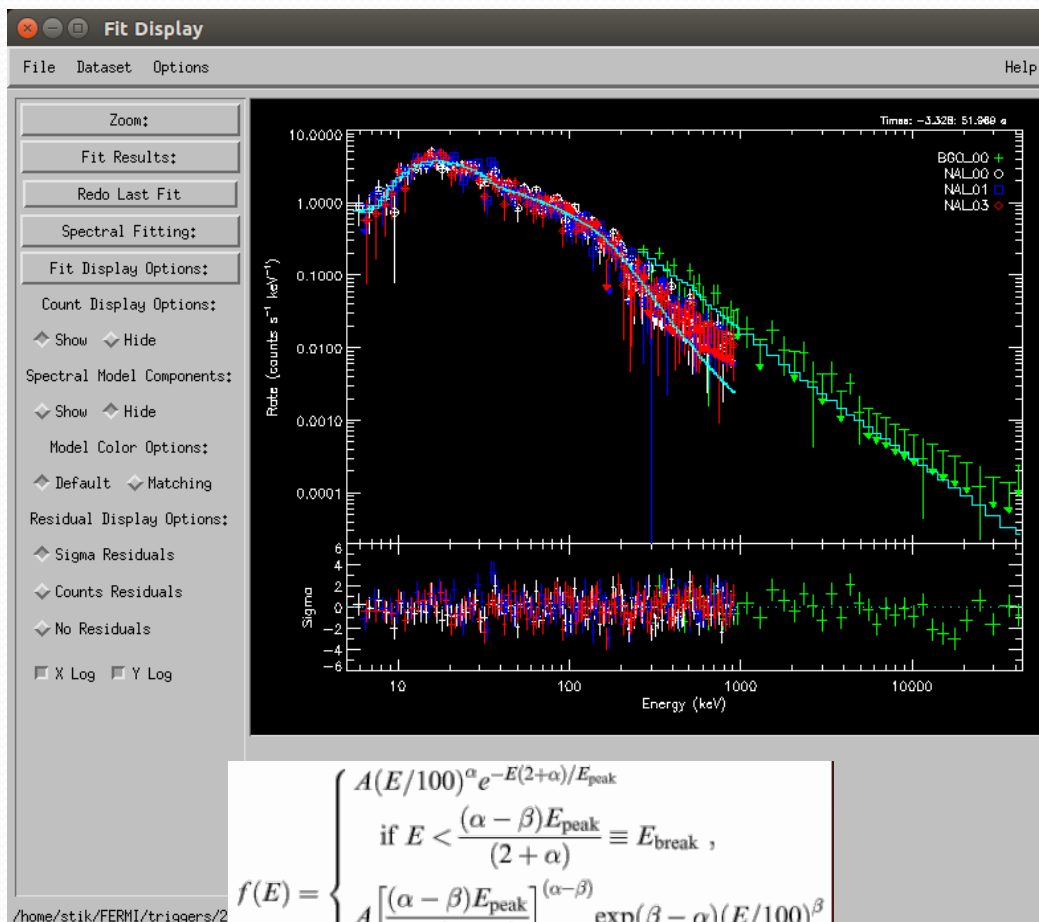
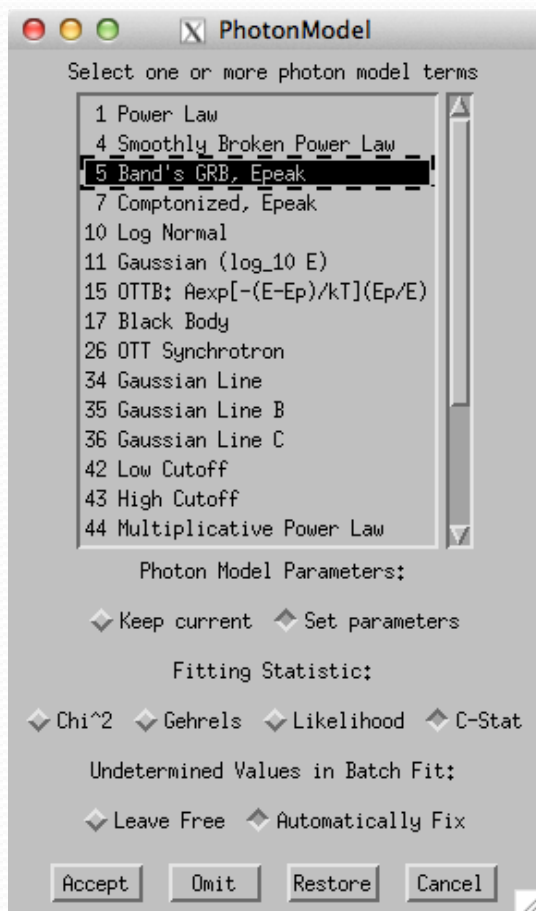
Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



$$f(E) = \begin{cases} A(E/100)^\alpha e^{-E(2+\alpha)/E_{\text{peak}}} & \text{if } E < \frac{(\alpha - \beta)E_{\text{peak}}}{(2 + \alpha)} \equiv E_{\text{break}}, \\ A \left[\frac{(\alpha - \beta)E_{\text{peak}}}{100(2 + \alpha)} \right]^{(\alpha - \beta)} \exp(\beta - \alpha)(E/100)^\beta & \text{if } E \geq \frac{(\alpha - \beta)E_{\text{peak}}}{(2 + \alpha)}. \end{cases}$$

Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM

```
Fit Log

==> Dataset      : #3 INCLUDED
==> Data file    : /home/stik/FERMI/triggers/2015/bn151006413/current/rlg_cspect_n3_bn151006413_v00.p
==> Response file: /home/stik/FERMI/triggers/2015/bn151006413/current/rlg_cspect_n3_bn151006413_v00.r
==> Fit interval : -3.328: 51.969 s, 6.137000: 918.5591 keV, channels 2: 124

==> Fitting data...
==> MFIT F95 v1.7 2012 Sept. 7: Fit completed at Thu Feb 25 17:18:12 2016

TERM: Band's GRB, Epeak

      Amplitude  VARY      0.006206 +/-      0.000527 p/s-cm2-keV
      Epeak      VARY      317.2 +/-      67.6 keV
      alpha      VARY      -1.142 +/-      0.0508
      beta       VARY      -1.707 +/-      0.0451

==> Castor C-STAT = 809.53, DOF = 490
==> Photon Flux = 2.1225 +/- 0.030 ph/s-cm^2 in the interval: 10.00: 1000.0 keV
==> Energy Flux = 3.6479E-07 +/- 6.7E-09 erg/s-cm^2 in the interval: 10.00: 1000.0 keV

The Normed Covariance Matrix = Correlation Coefficient Matrix:
1.000 -0.968 0.962 0.428
-0.968 1.000 -0.909 -0.567
0.962 -0.909 1.000 0.362
0.428 -0.567 0.362 1.000

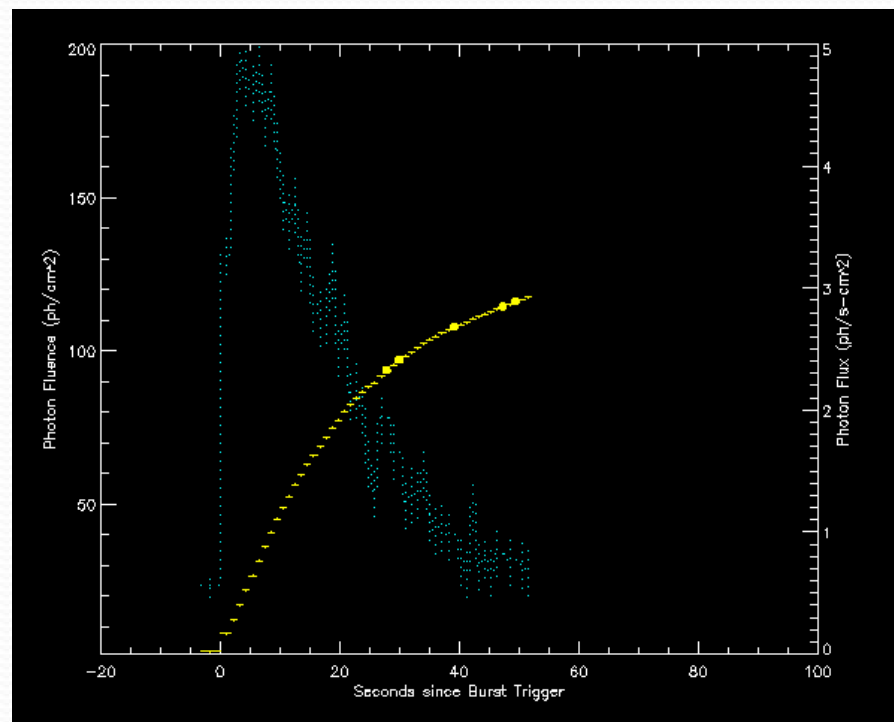
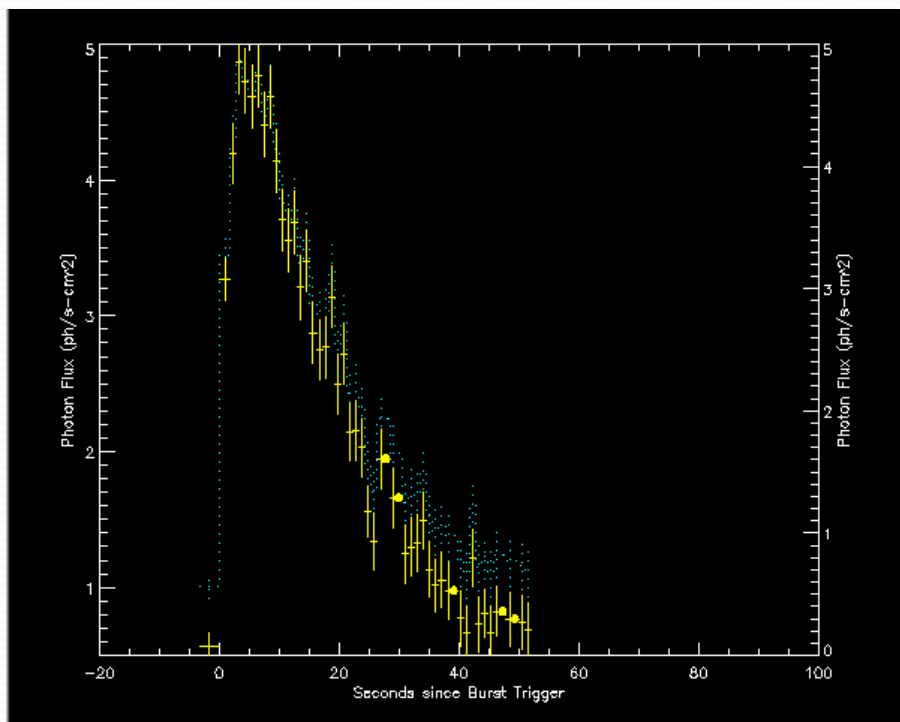
I

The global correlation coefficients of the varying parameters are:
0.990 0.984 0.966 0.744

Clear Hide Save Table
```


Анализ GRB 151006413

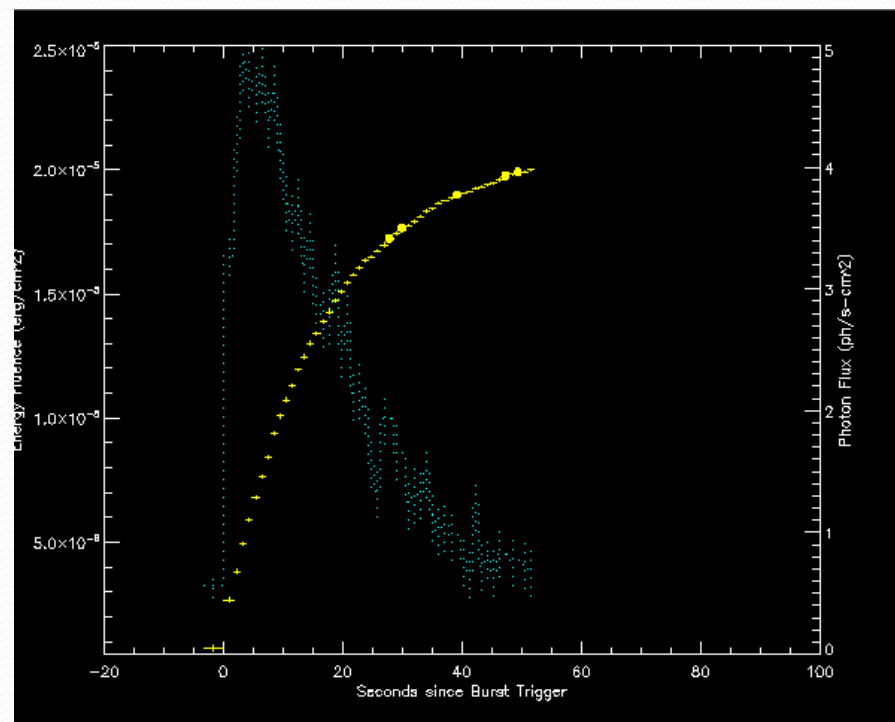
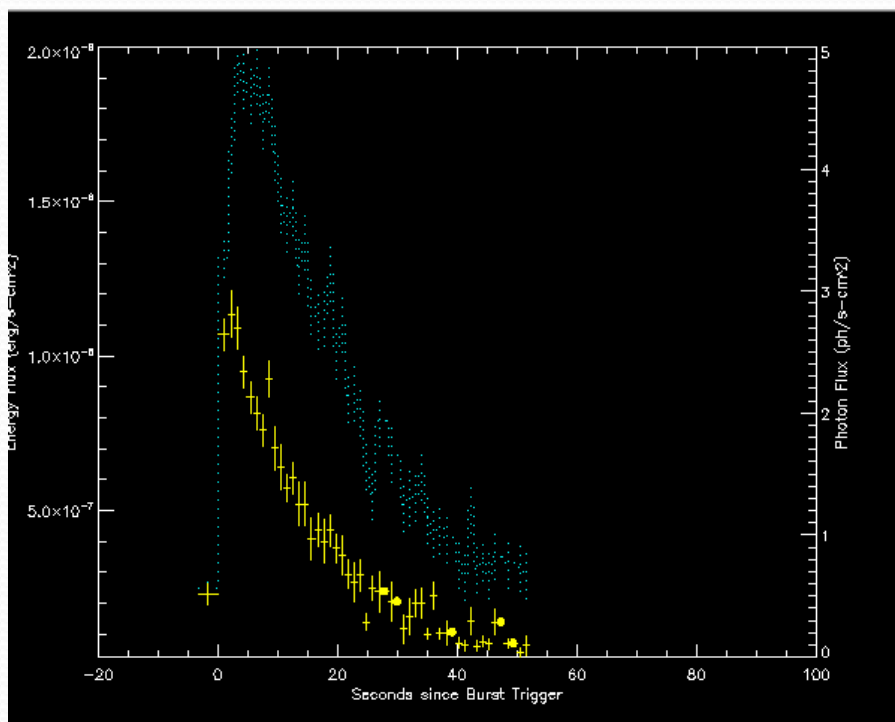
Rmfit – Анализ данных GBM



Поток и Флюенс фотонов

Анализ GRB 151006413

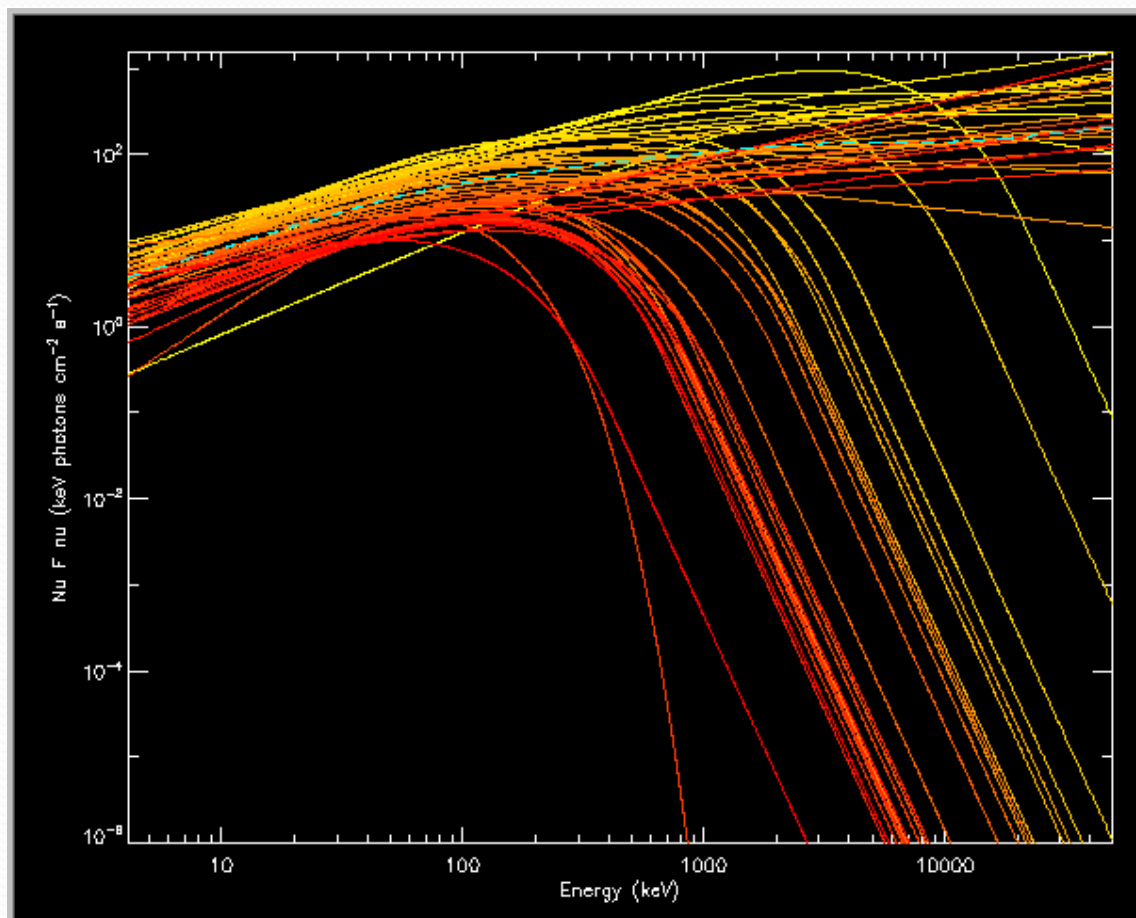
Rmfit – Анализ данных GBM



Поток и Флюенс энергии

Анализ GRB 151006413

Rmfit – Анализ данных GBM



Эволюция $\nu \cdot F_{\nu}$ спектров

Выводы

- Проведен анализ гамма-всплеска **GRB 151006413**, являющегося характерным примером «длинного» ГВ
- Анализ данных монитора **GBM** телескопа **Fermi** показал хорошее совпадение с теоретическими моделями
- Анализ данных монитора **LAT**, равно как и комбинированный анализ **GBM** и **LAT** невозможен ввиду недостаточности данных **LAT**
- Природа гамма-всплесков все еще остается слабоизученной, в то же время являясь очень важным фактором для понимания фундаментальных процессов во Вселенной
- Подобные эксперименты должны приблизить нас к ее пониманию