

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

Кафедра астрофизики и звездной астрономии

Кузнецов Артем Сергеевич

ДИПЛОМ

Наблюдение собственного оптического излучения гамма-всплесков

Допущена к защите
Заведующий кафедрой,
профессор, академик РАН

А.М. Черепашук
" " декабря 2010 года

Научный руководитель
профессор, д.ф.-м.н.

В.М. Липунов

Москва, ГАИШ
2010

Содержание

Введение.....	2
Открытие гамма-всплесков.....	2
Burst and Transient Source Explorer.....	2
Открытие послесвечения.....	2
Открытие собственного оптического излучения.....	3
Мобильная Астрономическая Система Телескопов Роботов	4
Собственное оптическое излучение гамма-всплесков.....	4
Наблюдение четырех гамма-всплесков GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A и GRB 100906A собственного и послесвечения телескопами МАСТЕР.....	4
GRB 100901A.....	4
GRB 100902A.....	6
GRB 100905A.....	6
GRB100906A.....	6
Наблюдения собственного оптического излучения гамма-всплесков.....	7
Построение спектров.....	8
BAT и XRT.....	9
Оптические спектры.....	9
Два типа гамма-всплесков.....	20
Литература.....	22

Введение.

Открытие гамма-всплесков.

2 июля 1967 года американский спутник Vela-4A, запущенный с целью слежения за соблюдением СССР договора 1963 года о частичном запрещении испытания ядерного оружия, зарегистрировал всплеск интенсивности излучения в гамма-диапазоне 0.1-1 МэВ. Детальные исследования, проведенные спутниками Vela, неожиданно выявили внеземное происхождение гамма-всплеска. Первый обнаруженный гамма-всплеск впоследствии получил обозначение GRB 670702. В 1971-1974 годах всплески также регистрировались на спутнике IMP-6 и на орбитальной солнечной обсерватории OSO-7. 17 января 1972 года получены данные наблюдений вспышки с советского спутника «Космос-461». В 1976 году организована Межпланетная сеть (IPN) изучения Солнца и планет с помощью космических аппаратов с набором детекторов гамма-лучей.

Burst and Transient Source Explorer.

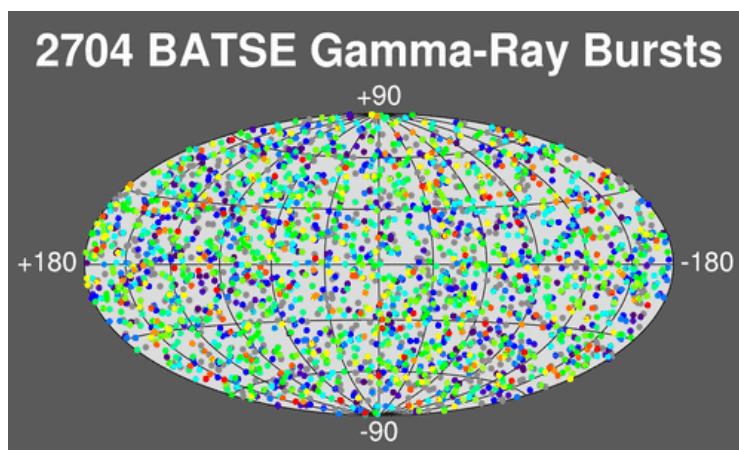


Иллюстрация 1: Карта 2704 гамма-всплесков, обнаруженных с борта космической обсерватории им. А. Комптона.

С 5 апреля 1991 по 4 июня 2000 года на орбите функционировала Комптоновская гамма-обсерватория, (CGRO). На её борту был установлен детектор Burst and Transient Source Explorer (BATSE), предназначенный для регистрации гамма-всплесков. За время его работы было

обнаружено 2704 события. С помощью BATSE была получена информация о том, что гамма-всплески распределены по небесной сфере изотропно. Именно это заставило многих ученых отказаться от галактической модели гамма-всплесков.

Открытие послесвечения.

Несколько моделей происхождения гамма-всплесков предполагали что после первоначальной вспышки гамма лучей должно происходить медленно затухающее

излучение на более длинных волнах («послесвечение»), которое генерируется после гигантского взрыва в ударной волне проходящей по межзвездной среде. Ранние поиски «послесвечения» оказались безуспешными, в основном из-за трудностей определения точных координат. Прорыв в этом направлении произошёл в феврале 1997 года, когда итало-голландский спутник ВерроSAX обнаружил гамма-всплеск GRB970228, а через 8 часов детектор рентгеновских лучей (также на борту ВерроSAX) обнаружил затухающее рентгеновское излучение от GRB970228. Координаты рентгеновского «послесвечения» были определены с гораздо большей точностью, чем для гамма лучей. Затем наземные оптические телескопы также обнаружили в этом районе слабеющий новый источник, таким образом, его положение стало известно с точностью до секунды. Через некоторое время глубокий снимок HST выявил на месте бывшего источника далёкую очень слабую галактику ($z=0,7$). Таким образом, космологическое происхождение гамма-всплесков было доказано. В дальнейшем послесвечения наблюдались у многих всплесков, во всех диапазонах (рентген, ультрафиолет, оптика, ИК, радио). Красные смещения оказались очень большими (до 6, в основном в диапазоне 0-4 для длинных гамма-всплесков; для коротких — меньше). Послесвечение слабо зависит от характера взрыва и в основном определяется энергией взрыва и свойствами окружающего вещества.

Открытие собственного оптического излучения.

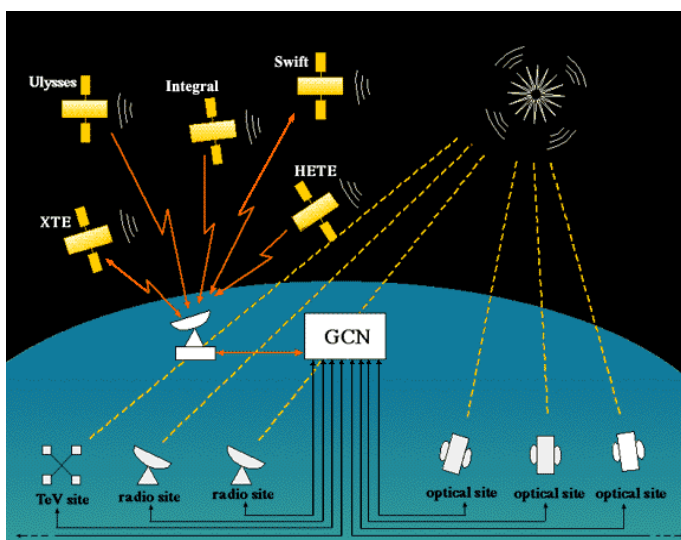


Иллюстрация 2: Схема сети GCN

Впервые собственное оптическое излучение зарегистрировано в 1999 году группой Акерлофа в рамках эксперимента ROTSE (Robotic Optical Transient Search Experiment). Но и в настоящее время наблюдения синхронного оптического излучения остаются редкостью.

Наблюдать синхронное с гамма излучение гораздо труднее, чем

послесвечение потому что сам гамма-всплеск, как правило, длится не более нескольких десятков секунд. Очевидно можно поступить двумя способами — либо

постоянно снимать большие участки неба, ожидая, что гамма-всплеск попадет в поле зрения случайно, либо использовать специальные роботизированные телескопы, готовые по сигналу с космической гамма-обсерватории в любой момент наводиться в любую точку неба — алертные наблюдения.

Сложность алертных наблюдений заключается в том, что бы робот-телескоп как можно быстрее начал получать оптические изображения участка сферы, пока гамма-излучение еще не закончилось. В данный момент это реализуется следующим образом.

1. Всплеск интенсивности гамма-излучения регистрируется космическими гамма-обсерваториями («Swift», «Integral» и пр.).
2. После обработки принятого гамма-излучения на борту спутника, координаты направляются в Центр Международной сети изучения гамма-всплесков.
3. Полученные координаты рассылаются всем наземным роботам телескопам.
4. Телескопы роботы наводятся по полученным координатам и получают изображения.

Мобильная Астрономическая Система Телескопов Роботов

Первый робот-телескоп МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система Телескопов Роботов) заработал в Подмосковье в 2002. Начиная с 2008 года началось строительство общероссийской сети МАСТЕР. Теперь – обсерватории МАСТЕР сети располагаются в обсерваториях Московского (Под Кисловодском), Уральского (Коуровка), Иркутского (Тунка), Благовещенского Педагогического университета (под Благовещенском). Во всех пунктах устанавливаются полностью идентичные телескопы MASTER II (Lipunov et al., 2009) диаметром 40 см и светосилой 1:2.5 позволяющие одновременно получать 2 изображения в широкополосных фильтрах или двух поляризациях.

Собственное оптическое излучение гамма-всплесков.

Наблюдение четырех гамма-всплесков GRB 100901A, GRB 100902A, GRB 100905A и GRB 100906A собственного и послесвечения телескопами МАСТЕР

GRB 100901A

Два робота-телескопа МАСТЕР расположенных вблизи озера Байкал(Тунка) и

под Благовещенском навелись на координаты через 47 (103 секунда после всплеска) и 45 (105 секунд после всплеска) секунд после уведомления. Длительность излучения в гамма-диапазоне составляет 439 секунд. Таким образом мы имеем ~336 секунд синхронных с гамма оптических наблюдений. Вскоре было обнаружено, что всплеск ярчает и в максимуме достигает 17-ой звездной величины без фильтра. Для всех снимков была проведена астрометрическая калибровка, выбраны звезды сравнения и проведена апертурная фотометрия с использованием пакета phot, входящего в IRAF(Image Reduction and Analysis Facility). В качестве звезд сравнения были использованы звезды из каталога SDSS-DR7. Из ансамбля звезд сравнения были удалены звезды, имеющие изменения блеска. Для оставшихся звезд была выполнена привязка к каталогу SDSS-DR7 с использованием соотношений:

$$I = i - 0.3780 \cdot (i - z) - 0.3974 \quad ;$$

$$R = r - 0.2936 \cdot (r - i) - 0.1439 \quad ;$$

$$V = g - 0.5784 \cdot (g - r) - 0.0038 \quad .$$

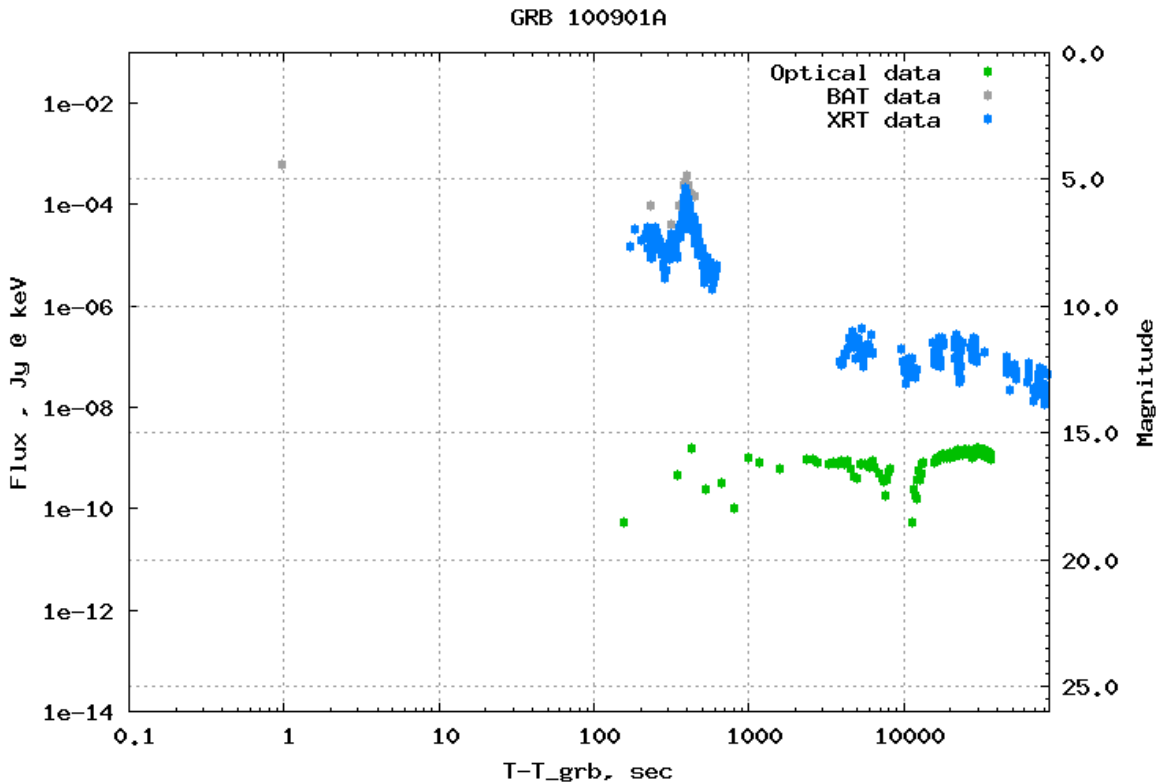


Рисунок 1: GRB 100901A. Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

После процедуры привязки к каталогу SDSS-DR7, средняя разность между измеренным и каталожным блеском составила $\pm 0.01 \dots 0.005$ звездной величины. Стандартные отклонения кривых блеска звезд сравнения - $0.02 \dots 0.1$ звездной величины для звезд в диапазоне от 13.5^m до 17^m , для различных фильтров.

Для изображений, полученных в белом свете, была сделана привязка к фотометрической системе телескопа МАСТЕР-Кисловодск. Позже к наблюдениям подключились другие телескопы сети МАСТЕР - на Урале и на Кавказе. В результате мы получили кривую блеска на однотипных инструментах продолжительностью около в 14 часов!

GRB 100902A

Уральский телескоп МАСТЕР получил первое изображение на 104 секунде после гамма-всплеска. Но к сожалению оптического излучения обнаружено не было.

GRB 100905A

5 сентября телескоп-робот в Тунке навелся через 33 секунды после уведомления, однако опять получены только верхние пределы для оптики.

GRB100906A

Телескоп в Тунке получил изображения через 23(38 секунд после всплеска) секунды после уведомления. Были впервые получены поляризационные изображения собственного излучения гамма-всплеска. Для всех снимков была проведена астрометрическая калибровка, выбраны звезды сравнения и проведена апертурная фотометрия. Измерялся блеск GRB и 64 звезд сравнения в диапазоне от 13.5 до 17 звездной величины. Исходя из предположения, что излучение звезд сравнения не поляризовано, мы вычислили разности средних значений блеска для каждой из них и сравнивали со значениями, полученными в фильтре с перпендикулярным направлением поляризации. Звезды, имеющие значительные выбросы, удалялись из ансамбля звезд сравнения. Далее вводились поправки, уравнивающие средний блеск звезд сравнения в разных поляризациях.

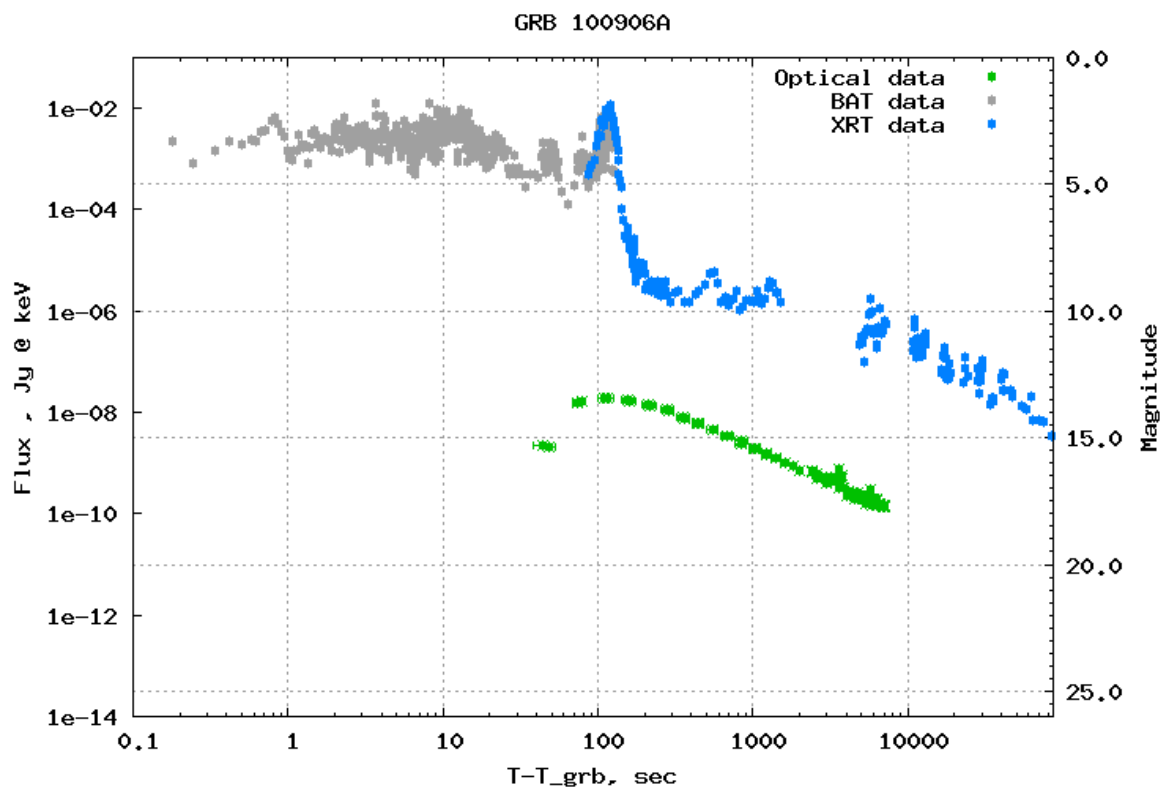


Рисунок 2: GRB 100906A. Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

Наблюдения собственного оптического излучения гамма-всплесков.

По результатам анализа более 9000 GCN-циркуляров с 1999 года, зарегистрировано всего 25 фактов синхронного с гамма оптического излучения.

Для большинства этих источников так же были построены кривые блеска. В виду быстротечности самого явления для многих из них опубликовано очень мало оптических данных.

GRB	Фильтр	Звездная величина	Среднее время экспозиции T_{mid} , с	Продолжительность гамма-всплеска T_{90} , с	Телескоп
100906A	P	15.05	40	114.4	MASTER
100901A	P	16.1	111	439	MASTER
090812	W	15.98	26.5	66.7	RAPTOR
090709A	W	17.1	31.3	89	RAPTOR

090618	W	14.1	23.9	113.2	ROTSE-IIIb
081203A	W	14.53	167.5	249	UVOT
081109A	R	17.8	110	180	TAROT
081029	W	16.5	86	270	ROTSE-IIIC
081008	W	14.5	41.9	185.5	ROTSE-IIIC
080810	W	13,7	38	106	ROTSE
080607	W	14,8	26	79	ROTSE-IIIb
080603B	W	14,1	24	60	ROTSE-IIIb
080413	W	12,8	21	46	ROTSE-IIIC
080319B	W	10.9	4	>50	RAPTOR
080310	W	18,8	99	365	UVOT
080205	W	18,1	65	106,5	KAIT
071031	r	15	60	180`	GROND
061126	W	12,3	23	70,8	RAPTOR
061121	W	14,9	77	81,3	ROTSE-IIla
061007	W	13,6	27	75,3	ROTSE-IIla
060927	W	16,5	16	22,5	ROTSE-IIla
060904B	W	17,3	19	171,5	ROTSE-IIIC
060607	H	13,3	--	102,2	REM
060418	z	15,3	40	103,1	PROMPT
990132	W	11,82	22	63	ROTSE-I

Таблица 1: Успешные наблюдения синхронного с гамма оптического излучения.

Фильтры: W - белый, P — поляризационный.

Для всех гамма всплесков были получены оптические кривые по данным опубликованным на сайте Центра Международной Сети(GCN) по изучению гамма-всплесков в GCN-циркулярах,.А также кривые в гамма-диапазоне(15-150 keV) по данным Burst Alert Telescope(BAT) и рентген-диапазоне(0.3-10 keV) по данным X-ray Telescope(XRT) находящимися в свободном доступе на сайте орбитальной обсерватории SWIFT. Для дальнейшего анализа были выбраны 8 гамма-всплесков с наиболее хорошими данными.

Построение спектров.

При построении спектров в рентгеновском и гамма-диапазонах данные усреднялись внутри наиболее подходящих оптических экспозиций сделанных во время

собственного излучения.

BAT и XRT.

Моделирование рентгеновских и гамма-спектров проведено с помощью программы Xspec (пакет программ HEAsoft.) из сырых данных находящихся в свободном доступе на сайте орбитальной обсерватории SWIFT.

Оптические спектры

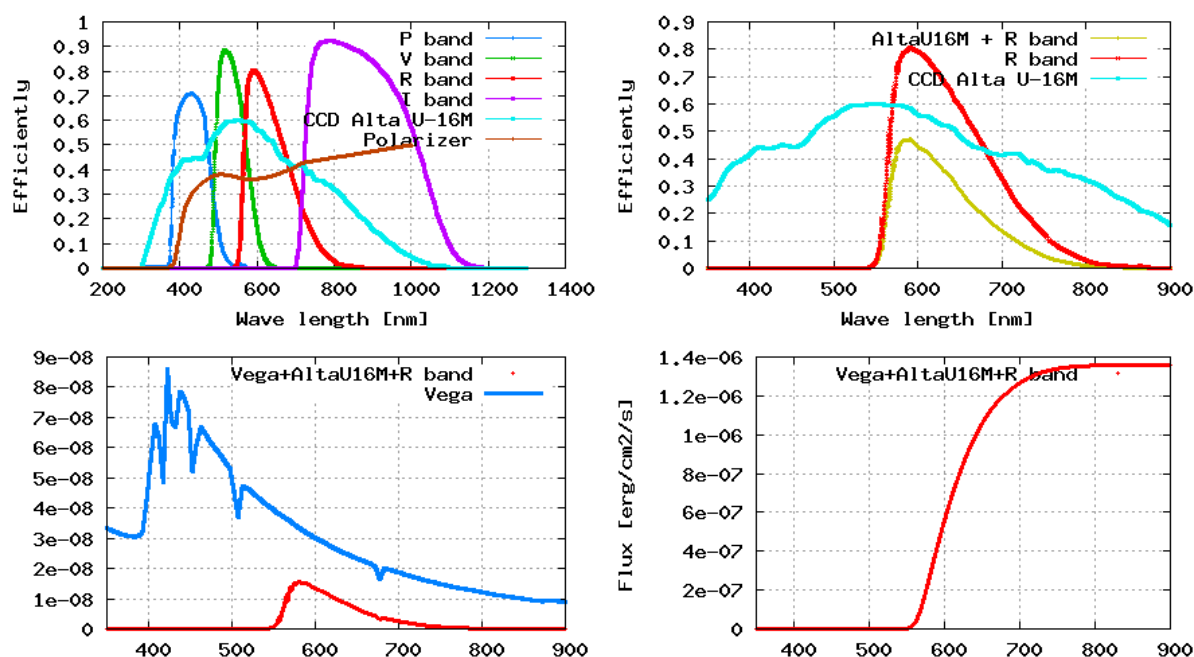


Рисунок 3: Энергетическая калибровка МАСТЕР по шагам. На рис А представлены все фильтры системы МАСТЕР а так же кривая реакции CCD камеры. На рис В фильтр В свернутый с CCD камерой. На рис. С спектр стандарта (Веги), а так же он свернутый с кривой пропускания фильтра (R) и камеры. На рис. D кумулятивная кривая (интеграл по рис. С). Для остальных фильтров проводилась аналогичная процедура.

Для получения энергетических калибровок, спектр стандарта (Веги) сворачивался с полосой пропускания светофильтра и интегрировался с шагом в $1 \text{ \AA}$. Для белого света свертка проводилась только с кривой реакции матрицы. Зная энергетический поток от Веги в каждой полосе, легко лучить поток от исследуемого объекта, в той же полосе с помощью формулы Погсона. Заметим однако, что при данной оценке мы игнорируем различия в оптических спектрах гамма-всплесков и звезд. Тем не менее эффект от этого различия исчезающе мал по сравнению огромной неопределенностью в поглощении в родительской галактике гамма-всплеска.

Для всех всплесков присутствует значительное поглощение. Поглощение главным образом действует в нашей и родительской галактиках. Однако из-за большого красного смещения, в родительской галактике поглощаются более синяя часть спектра. Поглощение же в ультрафиолете очень сильно зависит от конкретного состава поглощающей пыли, состав которой не может быть определен.

Фильтр	$F_{Vega} [erg \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}]$
W	8.00e-6
P	2.66e-6
B	1.92e-6
V	1.82e-6
R	1.36e-6
I	0.60e-6

Таблица 2: Результаты вычисления потока от Вегы

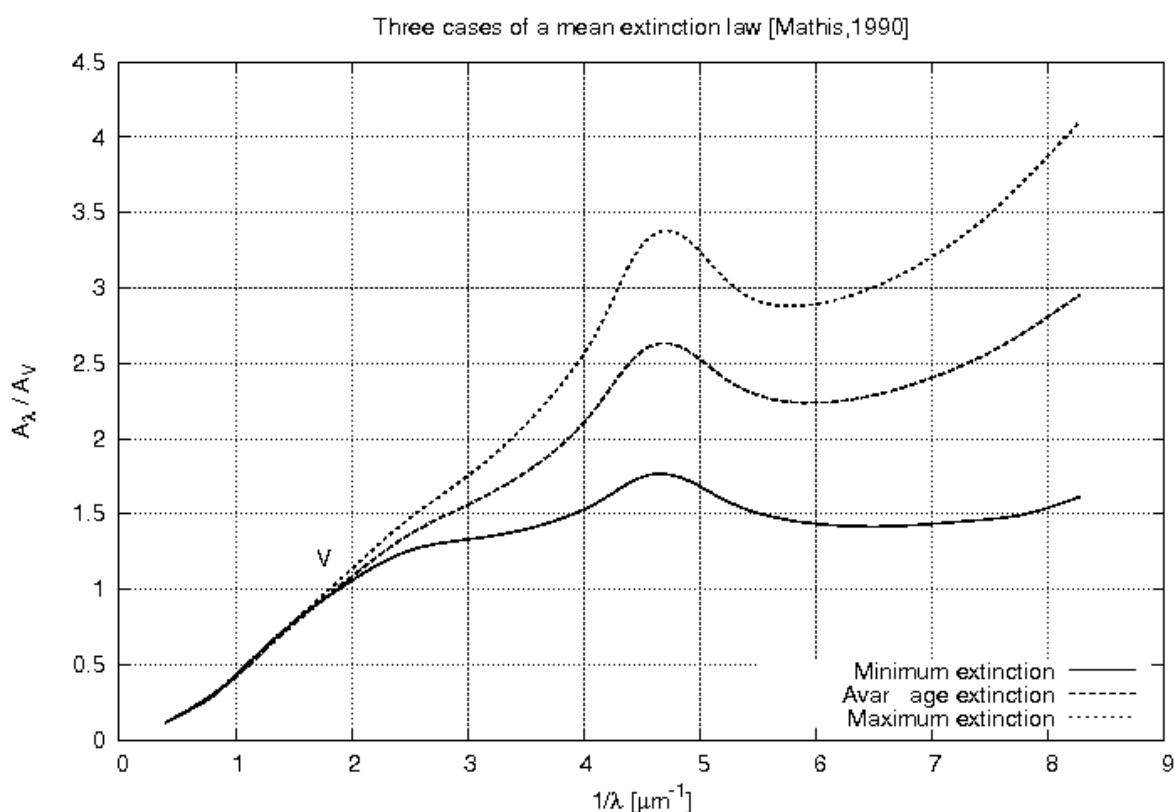


Рисунок 4: Кривые поглощения для разных видов поглощающей пыли в зависимости от длины волны.

На зависимости A_V/A_λ представленной на Рис. 4, видно, что неизвестность поглощающего агента вносит очень сильную неопределенность в поглощение и как следствие интегральный оптический поток, для обоих всплесков.. Этим и объясняются

столь крупные неопределенности в оптическом потоке.

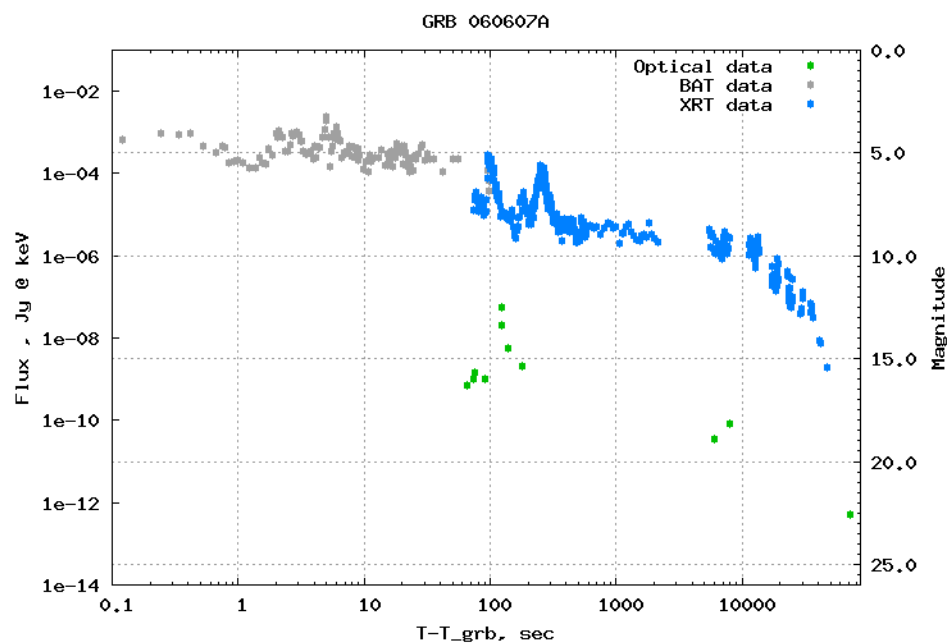


Рисунок 5: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

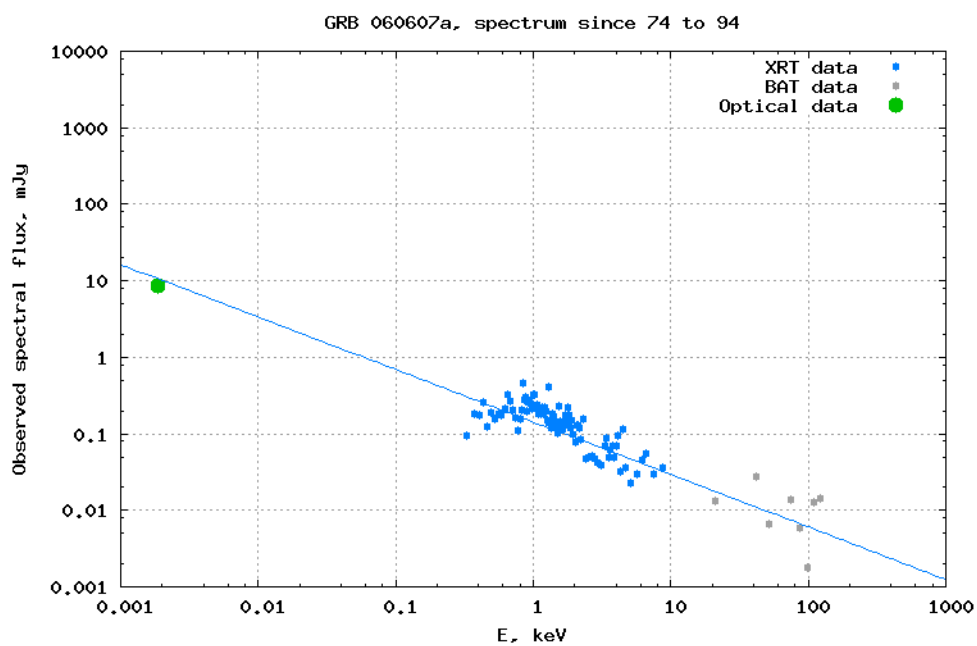


Рисунок 6: Спектр

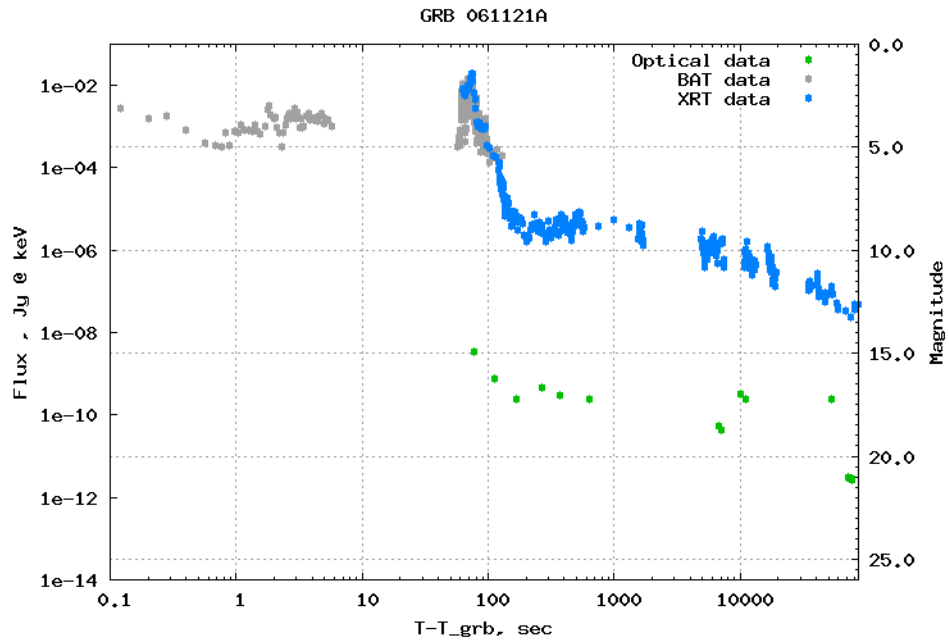


Рисунок 7: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

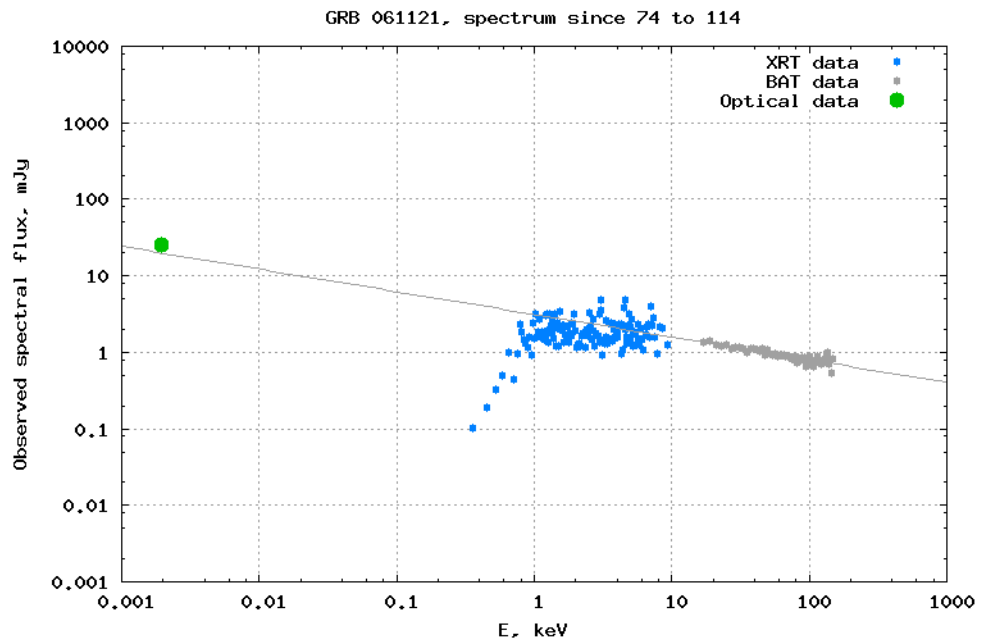


Рисунок 8: Спектр.

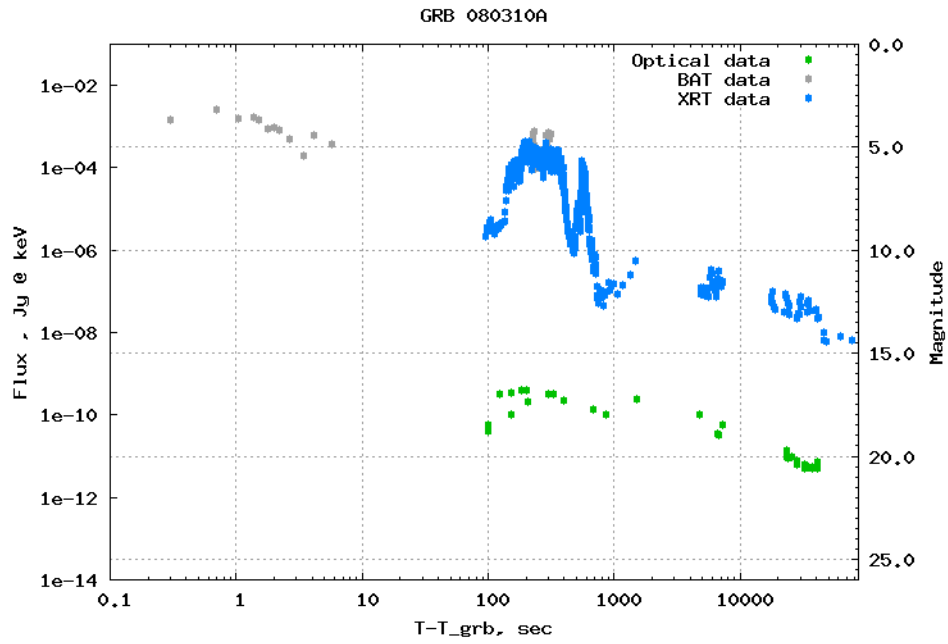


Рисунок 9: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

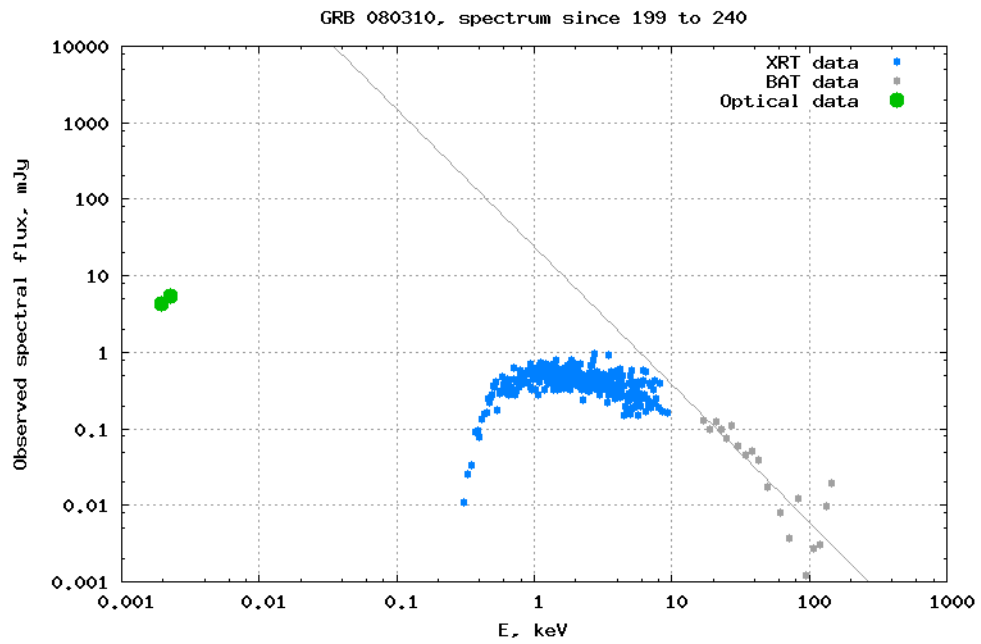


Рисунок 10: Спектр.

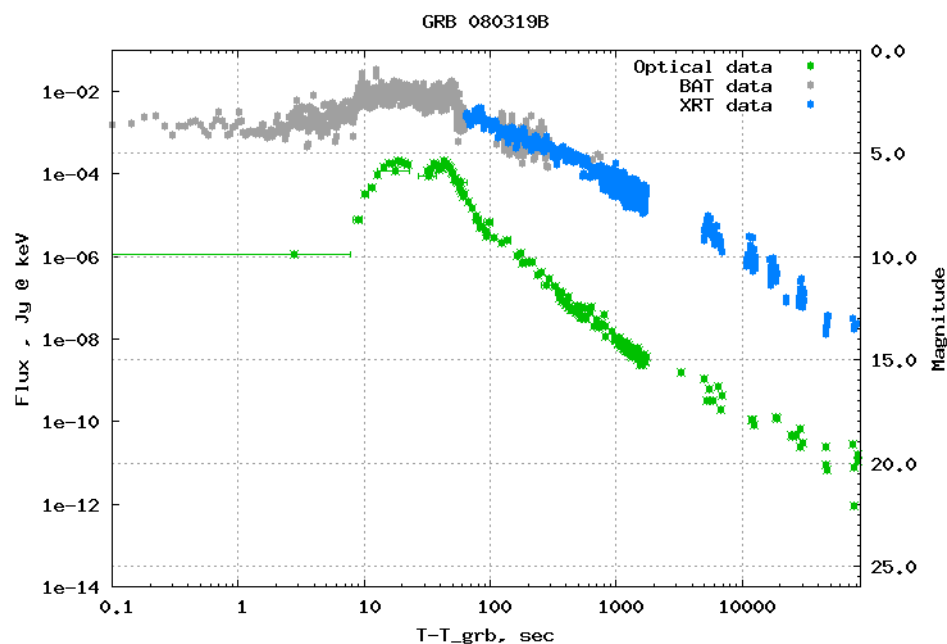


Рисунок 11: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

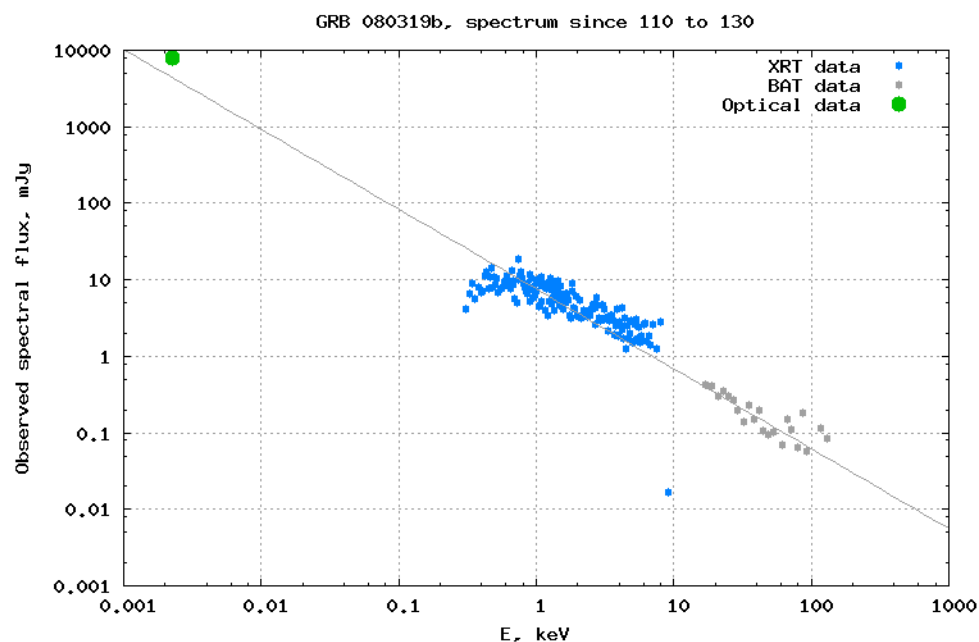


Рисунок 12: Спектр

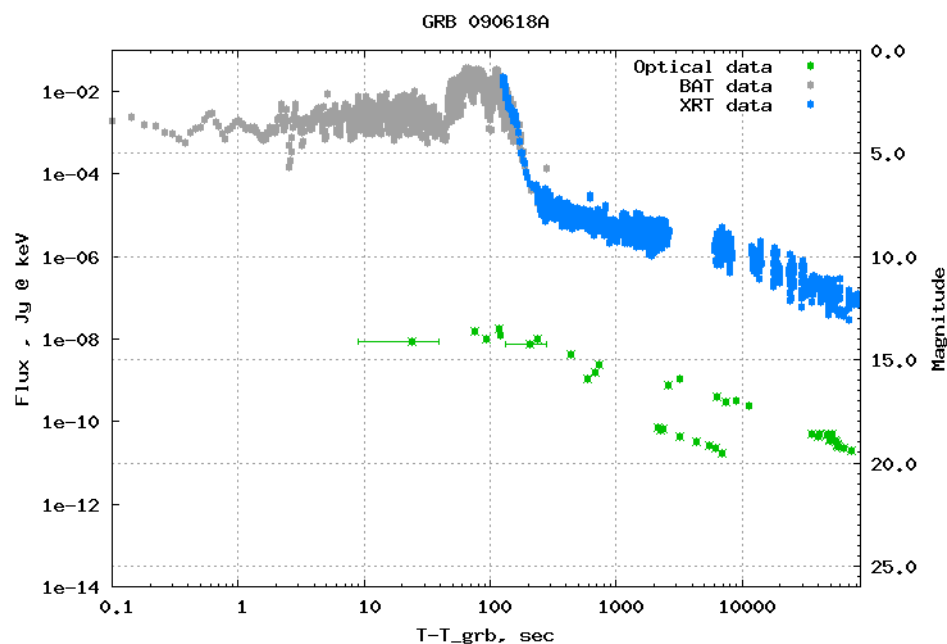


Рисунок 13: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

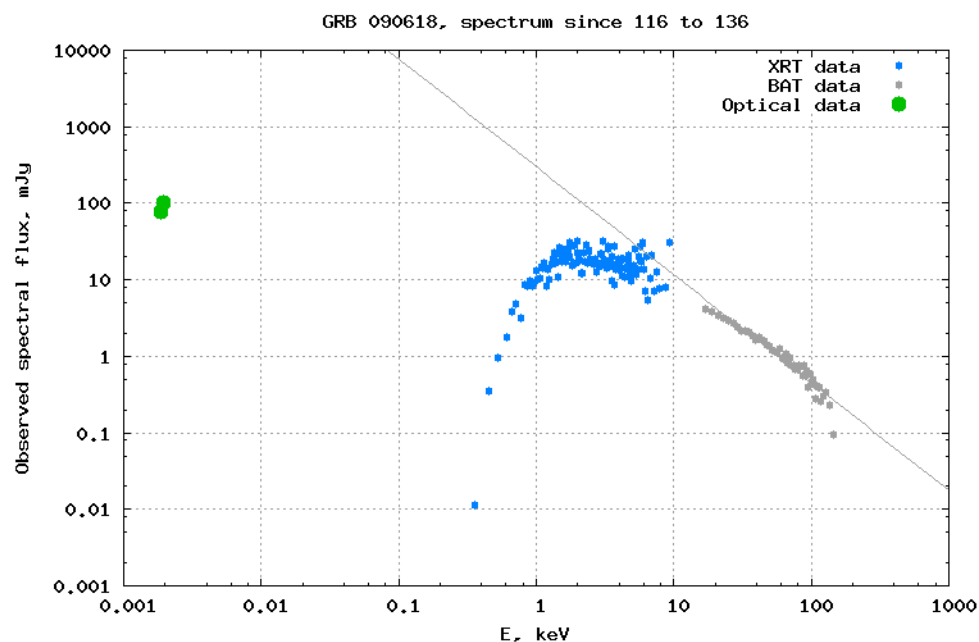


Рисунок 14: Спектр

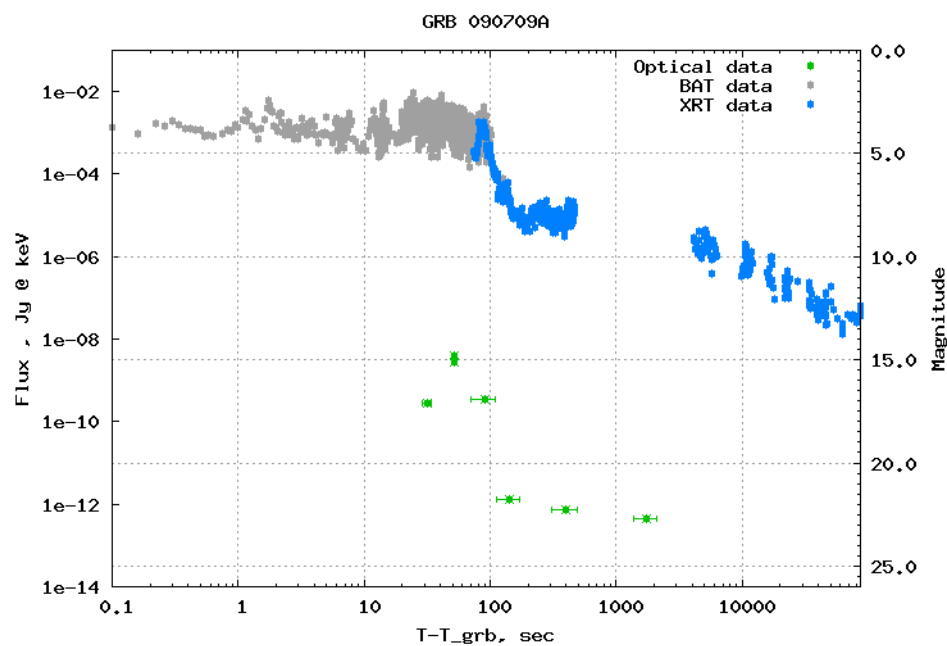


Рисунок 15: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

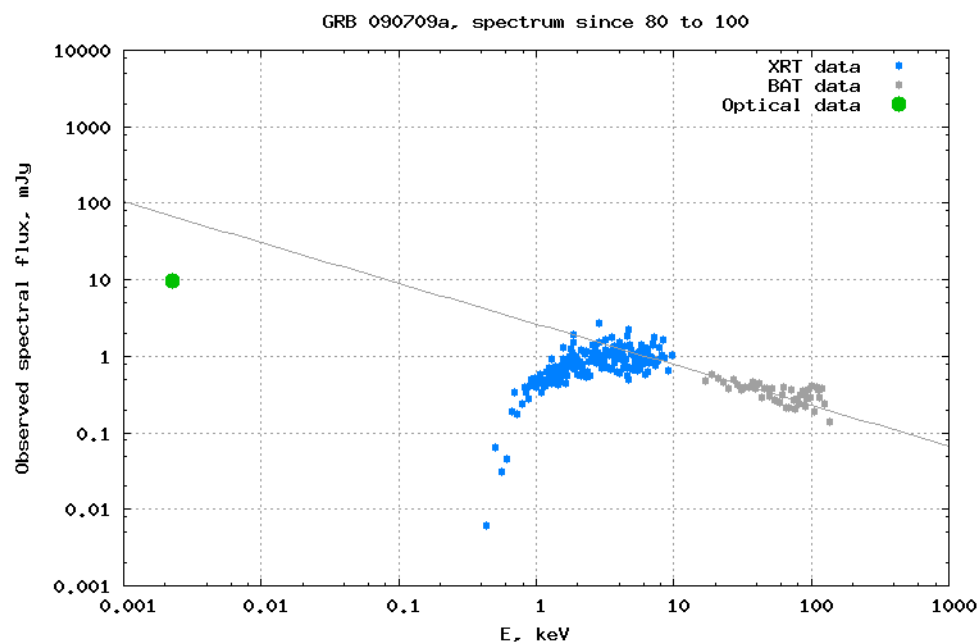


Рисунок 16: Спектр

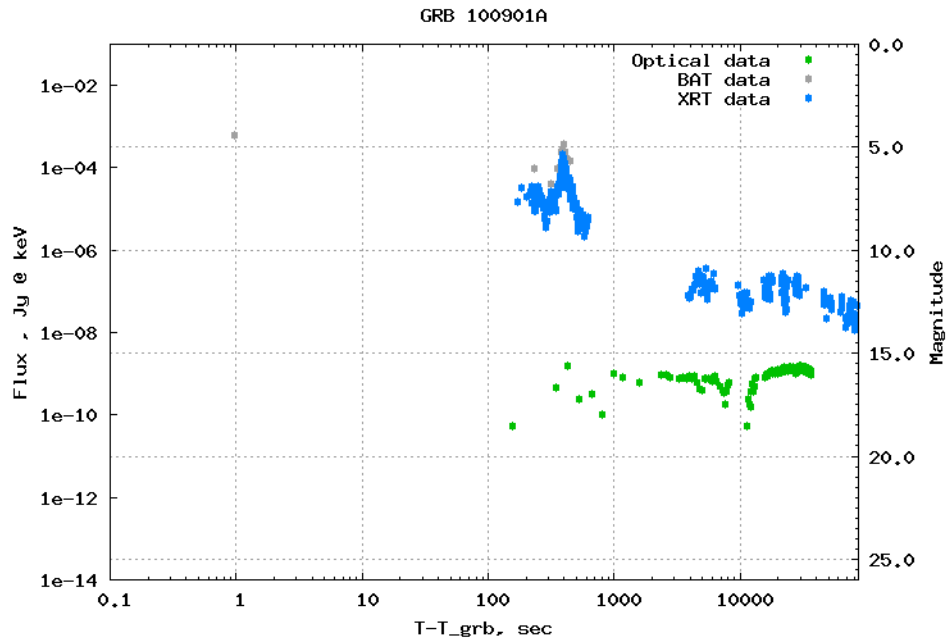


Рисунок 17: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

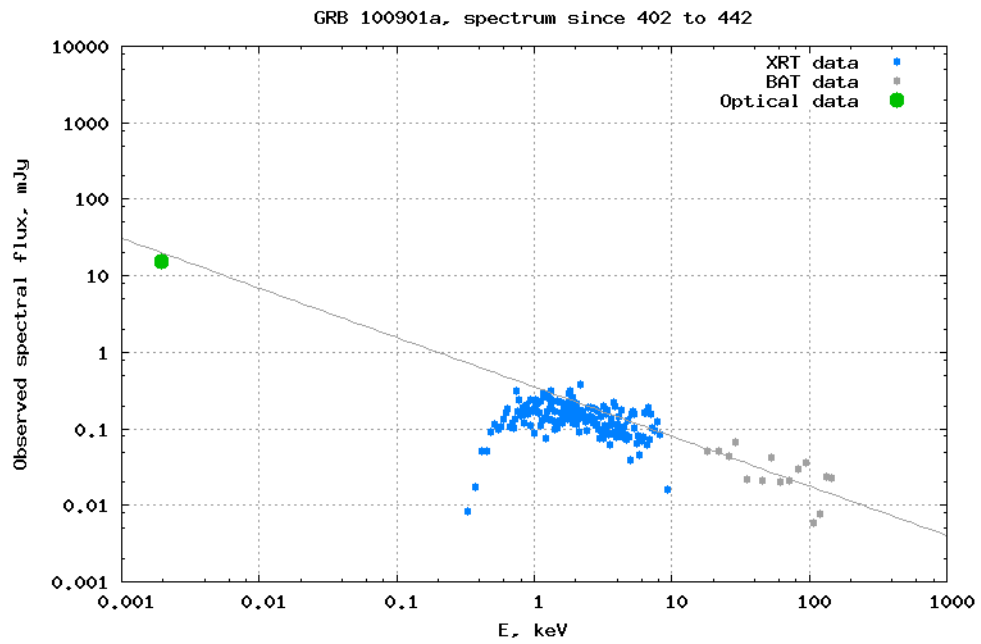


Рисунок 18: Спектр

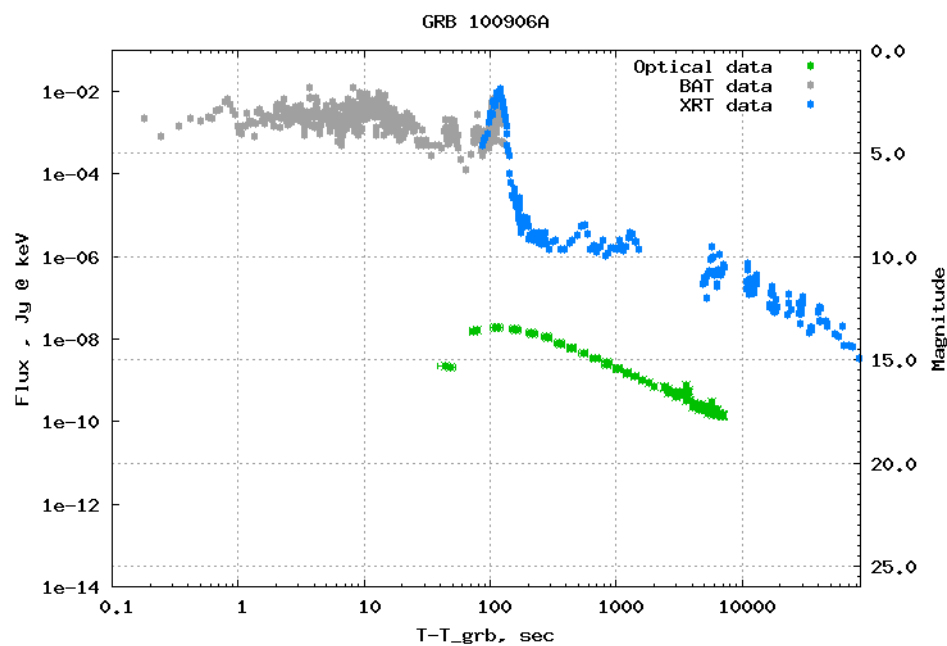


Рисунок 19: Гамма(15-150keV), рентген(0.3-10keV) и оптическая кривые. По правой вертикальной оси плотность потока для гамма и рентгена, по левой - звездная величина для оптики. Вертикальные оси не совпадают.

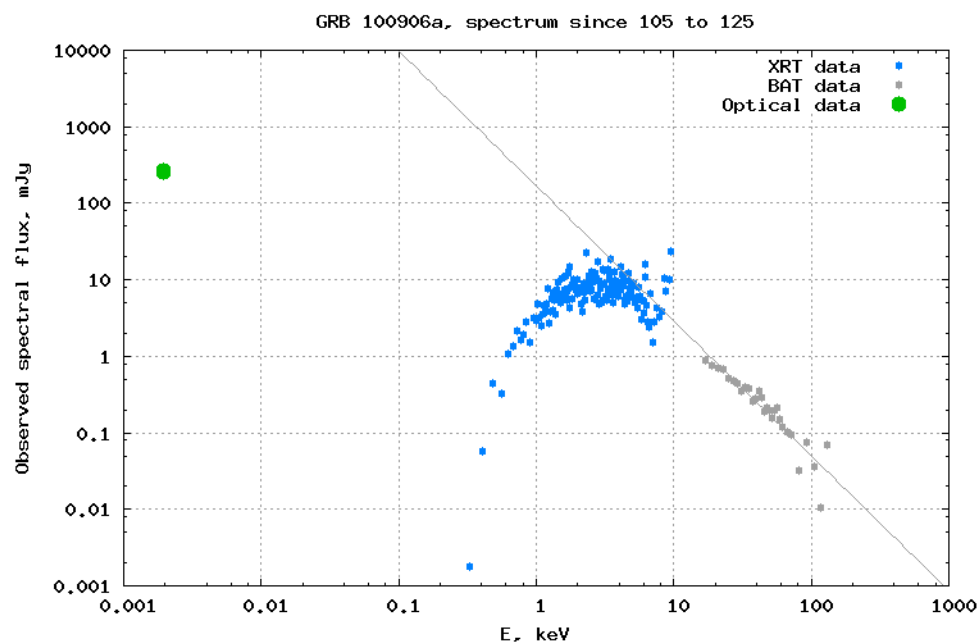


Рисунок 20: Спектр

Два типа гамма-всплесков

Таким образом приводимые гамма-всплески можно отнести к двум различным типам. Если в первом случае мы видели четкую корреляцию оптического излучения с гамма и рентгеновским излучением, то во втором случае никакой корреляции нет

.Появление двух классов гамма-всплесков может быть понято в рамках парадигмы существования системы двух ударных волн в релятивистском джете.. Внутренняя ударная волна возникает из-за того, что врыв не является мгновенным – релятивистские частицы продолжают поступать в канал и наталкиваются на разогретую внешней волной среду. Если оптическое излучение возникает в результате высвечивания электронов во внутренней ударной волне за счет синхротронного механизма, то оно коррелирует с гамма и рентгеновским излучением и имеет общий спектр. Действительно, приведенные спектры показывают, что в случае ях GRB100901A, GRB060607, GRB090709 весь спектр от гамма до оптики может быть описан единым степенным образом $F_{\nu} \sim \nu^{-\alpha}$ (-0.50 ± 0.02), что характерно для синхротронного излучения когда электроны очень быстро теряют энергию. Наоборот в всплеске GRB100906A и остальных полностью отсутствует корреляция оптики с вариациями собственного гамма и рентгеновского. Скорее всего здесь оптическое излучение возникает на фронте передней ударной волны и кривая блеска показывает плавный выход bow shock в автомобильный режим послесвечения со степенным наклоном²¹ $F_{\text{opt}} \sim t^{-\alpha}$, $\alpha = 1.07 \pm 0.03$.

Критическим тестом для подтверждения этой парадигмы является наблюдение поляризации. Так излучение во внутренней ударной волне возникает в порядочном магнитном поле джета и должно быть поляризовано. На Рис.21 представлены наши синхронные наблюдения GRB100906A в двух перпендикулярных поляроидах, которые демонстрируют полное отсутствие поляризации собственного оптического излучения на уровне $P = 0.005 \pm 0.02$, то есть менее 2%.

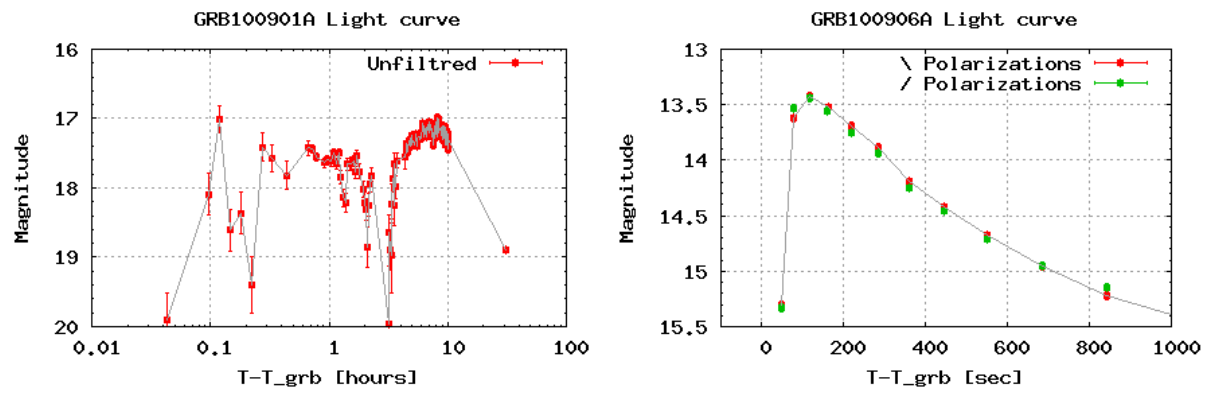


Рисунок 21: GRB 100906A. Оптическая кривая в двух поляризациях.

Литература.

1. Kulkarni S et al. *Nature* (London) 395 663 (1998)
2. Meszaros, P. & Rees, M. *Astrophys.J.* **476**, 232 (1997)
3. Woosley, S. E.; Heger, A., *The Astrophysical Journal*, Volume 637, Issue 2, pp. 914-921, (2006)
4. Akerlof, C. et al. Observations of contemporaneous optical radiation from gamma-ray burst. *Nature* **398**. 400-402 (1999)
5. Lipunov et al., 2009 *Adv*
6. Immler et al., GCN Circ 11159
7. Sakamoto, et al., GCN Circ. 11169
8. Ivanov et al., GCN Circ 11161
9. Ivanov et al., GCN Circ 11163
10. Gorbovskoy et al., GCN Circ 11178
11. Page et al., GCN Circ 11171
12. Markwardt et al., Siegel et al., GCN 11227
13. Barthelmy et al., GCN 11233
14. Ivanov et al., GCN 11228
15. Chornock, R. et al., *GRB Circ.Netw.* **11164** (2010)
16. Tanvir, N.R., K. Wiersema and A. J. Levan, *GRB Circ.Netw.* **11230** (2010)
17. Vestrand, W.T. et al. A link between prompt optical and prompt gamma-emission in gamma-burst. *Nature* **435**, 178-180 (2005)
18. Vestrand W.T., J.A.Wren, P.R.Wozniak, S.Golenetskii, V.Pal'shin, T.Sakamoto et al., 2006, *Nature*, 442, 172-175.
19. Meszaros, P. & Rees, M. GRB 990123: reverse and internal shock flashes and late afterglow behavior. *Mon.Not.R.Astron.Soc.* 306, L39-L43, 1999 .
20. Sari, R & Piran, T. Predictions for the very early afterglow and optical flash., *Astrophys. J.*, 520, 641-649, 1999
21. Kuvshinov et al., *GRB Circ.Netw.* **11235** (2010)
22. Steele I.A. et al., Ten per cent polarized optical emission from GRB 000102., *Nature* **462**, 767-769 (2009)
23. K.L. Page and S. Immler et al gcn11171, 2010
24. S. Golenetskii, R.Aptekar, D. Frederiks, et al. Gcn11384, 2010

25. S. D. Barthelmy, W. H. Baumgartner, J. R. Cummings et al gcn11233, 2010
26. A. P. Beardmore and C. B. Markwardt et al gcn11244, 2010