

УДК 524.7-732

## БЫСТРАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 080319В И ЕГО “ЦЕНТРАЛЬНАЯ МАШИНА”

© 2010 Г. Бескин<sup>1</sup>, С. Карпов<sup>1</sup>, С. Бондарь<sup>2</sup>,  
А. Гуарниери<sup>3</sup>, К. Бартолини<sup>3</sup>, Д. Греко<sup>4</sup>, А. Пиччиони<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>НИИ Прецизионного Приборостроения, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>3</sup>Universita' di Bologna, Via Zamboni, 33 - 40126 Bologna, Italy

<sup>4</sup>INAF – Astronomical Observatory of Bologna, Bologna, 40127 Italy

Поступила в редакцию 25 февраля 2010 г.; принята в печать 21 апреля 2010 г.

Приводятся результаты наблюдений оптического излучения, сопровождавшего гамма-всплеск GRB080319В. Наблюдения проводились с помощью быстрой широкоугольной камеры TORTORA, установленной в Чили на роботическом телескопе REM. Описывается кривая блеска вспышки до, в течение и после гамма-всплеска. Она состоит из четырех пиков длительностью 5–7 секунд, разнесенных по времени на 8–9 секунд, возможно, периодических. Приводятся результаты сравнения поведения всплеска в жестком и оптическом диапазонах, а также их возможная теоретическая интерпретация.

Ключевые слова: *гамма-всплески*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

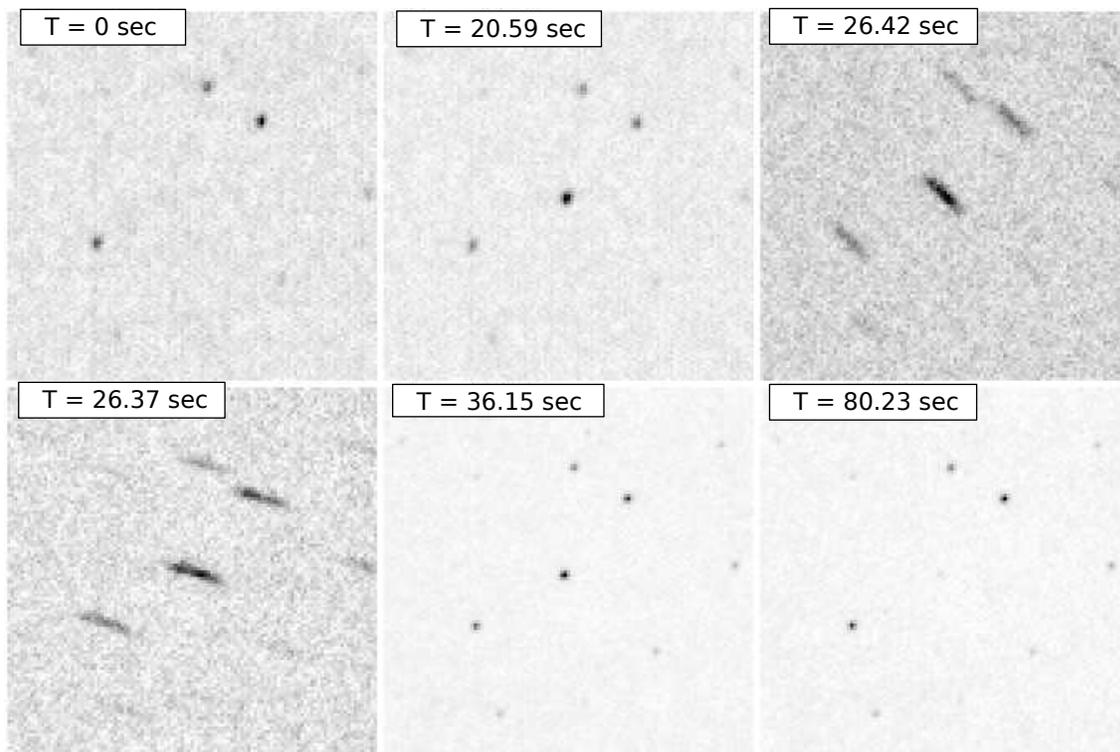
Теоретические построения указывают на то, что источником энергии “длинных” гамма-всплесков, их “центральной машиной”, является рожденная в результате коллапса ядра массивной звезды черная дыра, окруженная аккрецируемым газом [1, 2]. Тем не менее, ее наблюдательные проявления до сих пор остаются немногочисленными и неоднозначно интерпретируемыми [2]. Это обстоятельство во многом связано с низким качеством данных наблюдений оптических транзиентов, синхронных с гамма-всплесками. Начиная с эпохи первых обнаружений их оптических компаньонов в 1997–98 гг [3] и реализации координационной сети GCN (Gamma-Ray Burst Coordination Network) [4], исследования последних начинались после определения координат собственно гамма-всплеска и их приема системой управления телескопом. Таким образом, оптические наблюдения запаздывали на 20–60 секунд относительно начала всплеска, когда большая часть гамма-всплесков уже затухала [5]. Тем не менее, в последние несколько лет были введены в эксплуатацию несколько широкоугольных мониторинговых систем для независимой (от данных с гамма-телескопов) регистрации оптических транзиентов, сопровождающих гамма-всплески [6, 7]. К сожалению, временное разрешение этих инструментов, не будучи достаточно высоким, позволяет искать

соответствия между кривыми блеска в оптическом и гамма-диапазонах лишь в общих чертах. Но именно сравнение их структур может позволить обнаружить как проявления свойств “центральной машины”, так и особенности процессов преобразования ее энергии в излучение [8–10].

Для решения этой задачи нами были созданы две системы широкоугольного мониторинга с высоким временным разрешением — FAVOR и TORTORA [11–13]. Мониторинг камерой TORTORA поля зрения телескопа Swift-BAT привел к обнаружению оптической вспышки, сопровождавшей гамма-всплеск GRB 080319В [14]. В настоящей работе мы приводим результаты изучения оптического излучения этого всплеска, которые частично были опубликованы ранее [15, 16].

### 2. НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 080319В

Дни 19 и 20 марта 2008 года оказались наиболее плодотворными для широкопольных мониторинговых систем по всему миру. Тогда, в течение 24 часов, были обнаружены 5 гамма-всплесков, один из которых, GRB080319В [17], оказался самым ярким как в гамма, так и в оптическом диапазонах, и первым, который был независимо зарегистрирован наземными мониторинговыми системами. Область его локализации на небесной сфере наблюдалась



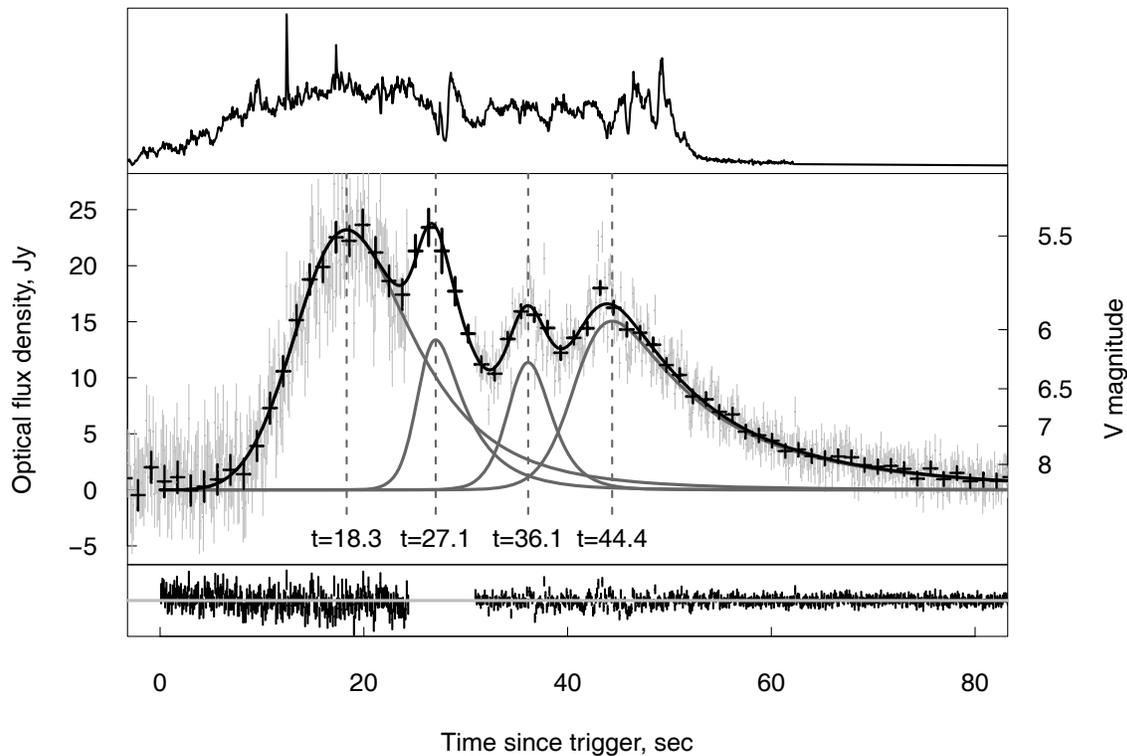
**Рис. 1.** Изображение оптического транзientа, связанного с гамма-всплеском GRB080319B, на разных стадиях его развития по результатам наблюдений камеры TORTORA. Приведены суммы 10 последовательных кадров с эффективным временным разрешением 1.3 секунды с начала гамма-события ( $T = 0$  с), момент максимального блеска первого пика ( $T = 20.5$  с) и двух моментов в его середине ( $T = 26.4$  с и  $T = 28.4$  с), во время последней фазы активности ( $T = 36$  с) и на стадии раннего послесвечения ( $T = 80$  с). Размер поля составляет  $2.5 \times 2.5$  градуса. Изображения звезд на третьем и четвертом кадрах деформированы в процессе перенаведения роботического телескопа REM (с  $T + 24$  с по  $T + 31$  с), на котором установлена камера, в соответствии с координатами всплеска, полученными с космического телескопа Swift. Исходное положение всплеска лежало на краю поля зрения камеры, в результате перенаведения оно сместилось к центру поля зрения, что привело к некоторому улучшению качества изображений.

до, во время и после гамма-события камерами “Pi of the Sky” [18], RAPTOR Q [19] и TORTORA [20].

Камера TORTORA проводила мониторинг области всплеска [14, 20], начиная с 05:46:22 UT, примерно за полчаса до его начала (момент его обнаружения в гамма-диапазоне — 06:12:49 UT), в течение его существования, а также на протяжении нескольких десятков минут после его окончания. В промежутке между 06:13:13 UT и 06:13:20 UT роботический телескоп REM был автоматически перенаведен по координатам, полученным со спутника Swift [17], что переместило область события с края поля зрения камеры в его центр. Примеры изображений области события на разных его стадиях приведены на Рис. 4.

Полученные камерой изображения были обработаны с помощью стандартной процедуры редукиции, состоящей из вычитания шумов ПЗС-матрицы и деления на плоское поле. Измерение потоков было проведено с использованием специализированной версии метода апертурной фотометрии и кода DAOPHOT пакета IRAF для всего

набора данных, за исключением промежутка перенаведения. В этой фазе изображения как объекта, так и соседних звезд были деформированы из-за существенного их смещения за время экспозиции, что значительно понизило отношение сигнала к шуму. В результате на отдельных кадрах поток нельзя было уверенно измерить. Мы произвели сложение перекрывающихся последовательностей из 10 кадров с соответствующим сдвигом, компенсирующим движение звезд. Для полученных изображений треков отношение сигнала к шуму примерно соответствует таковому на остальных участках кривой блеска (см. среднюю панель на Рис. 5). Затем мы измерили потоки от объекта и соседних звезд на суммарных кадрах посредством как апертурной фотометрии с эллиптическими апертурами, так и методом аппроксимации функции рассеяния точки. Оба метода дали согласующиеся друг с другом результаты. Мы отдельно проверили поведение потоков от звезд сравнения и не нашли в них никаких особенностей, которые поставили бы под сомнение точность фотометрии и переменность



**Рис. 2.** Кривая блеска оптического компаньона гамма-всплеска GRB080319B по данным широкопольной камеры TORTORA. Гамма-излучение, изменение которого представлено на верхней панели, начинается в момент  $T \approx -4$  с и затухает на  $T \approx 57$  с. Изменение оптического потока приведено на средней панели. Данные высокого временного разрешения (экспозиция 0.13 секунды, изображены серым цветом) доступны для всего периода гамма-активности за исключением интервала перенаведения телескопа REM ( $24.5 \text{ с} < T < 31 \text{ с}$ ), тогда как данные низкого разрешения, полученные по суммам каждых 10 последовательных кадров с эффективным временем экспозиции 1.3 секунды — для всей длительности события. Кривая блеска аппроксимирована четырьмя пиками, разделенными практически равными интервалами, с параметрами, представленными в Таблице; на нижней панели изображены невязки такой аппроксимации.

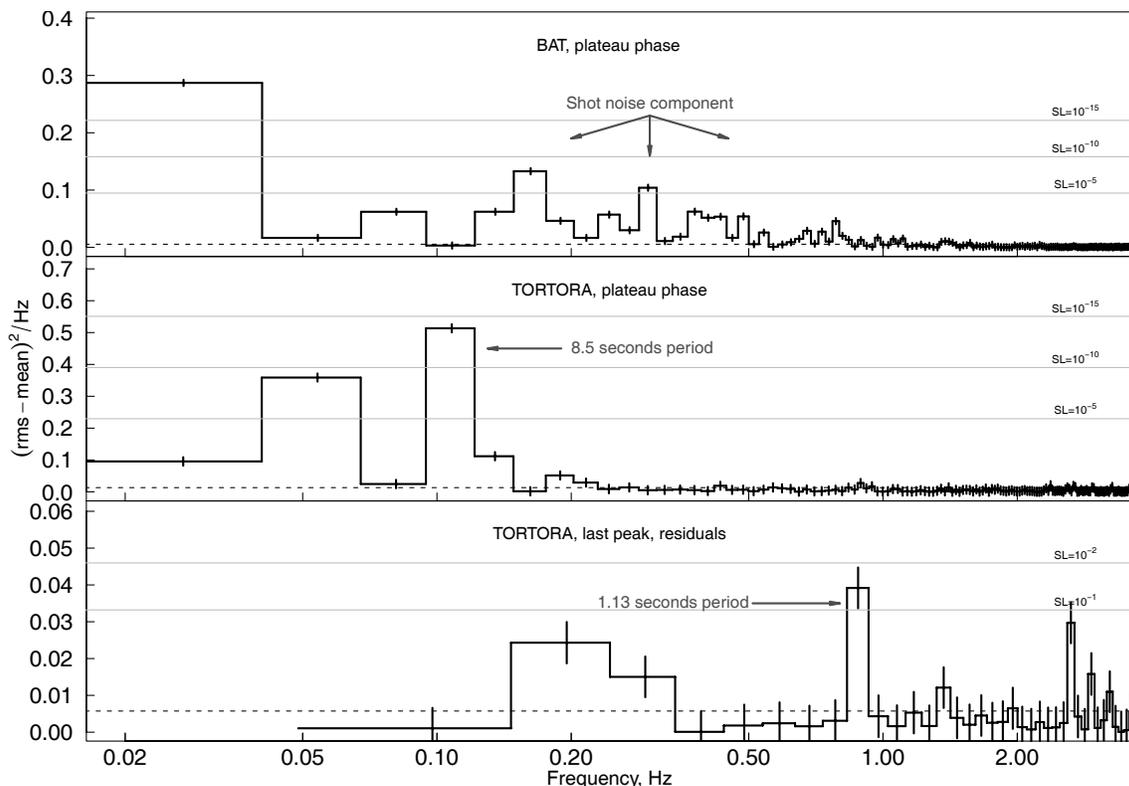
блеска объекта на данном интервале времени. Эффективное временное разрешение в нем составило 1.3 секунды; для всех других фаз всплеска фотометрия проводилась как с высоким (0.13 секунды, отдельные кадры), так и с низким временным разрешением (1.3 секунды, суммы 10 последовательных изображений). Полученные инструментальные звездные величины были затем приведены к V-полосе джонсоновской фотометрической системы путем нормировки на расположенные поблизости звезды каталога Tycho2 [22]. Сравнение полученной таким образом кривой блеска, приведенной на Рис. 5, с данными других мониторинговых камер, таких как “Pi of the sky” [18] и RAPTOR [19], показало хорошее совпадение результатов.

### 3. АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ БЛЕСКА

Оптическое излучение транзиента по данным камеры TORTORA уверенно обнаруживается примерно с 10-ой секунды после начала гамма-события. Его интенсивность возрастает как  $\propto t^4$ ,

достигает звездной величины  $V \approx 5.5^m$ , затем изменяется в полтора-два раза на временной шкале несколько секунд и, наконец, падает как  $\propto t^{-4.6}$  вплоть до ухода под предел чувствительности камеры спустя, примерно сто секунд после начала. Гамма-излучение при этом заканчивается на 57 секунде с начала события.

На кривой блеска транзиента выделяются четыре пика близкой амплитуды, длительности и формы. Мы аппроксимировали их суммой четырех кривых, каждая из которых гладко соединяет два степенных выражения, описывающих передний и задний фронты соответственно [21]. Параметры этих кривых приведены в Таблице. Интервалы между максимумами пиков оказываются практически одинаковыми — около 8.5 секунд, что соответствует 4.4 секундам при красном смещении GRB 190308B  $z=0.937$  [14]. Вероятность случайной комбинации таких интервалов между четырьмя пиками составляет  $10^{-3}$  (см. Таблицу). В спектре мощности центральной части кривой блеска также присутствует выброс на частоте, соответствующей



**Рис. 3.** Спектры мощности центральной части (от  $T + 13$  с до  $T + 50$  с) всплеска по данным гамма-телескопа Swift BAT (сумма всех спектральных каналов) и оптической камеры TORTORA, а также спектр мощности разностей оптической кривой блеска после вычитания гладкой аппроксимирующей функции, изображенной на Рис. 5, для интервала последнего пика (с  $T + 40$  с по  $T + 50$  с). Линейный тренд был вычтен из всех кривых. Отсутствующая часть оптической кривой (интервал с  $T + 24.5$  с по  $T + 31$  с) высокого временного разрешения была заполнена гауссовым белым шумом с дисперсией, соответствующей таковой в остальной части данных, и средними значениями гладкой аппроксимирующей кривой. Ошибки и уровни значимости спектров оценивались бутстрап-методом — посредством генерации большого количества синтетических кривых блеска при случайном перемешивании величин интенсивности в исходной кривой, что полностью уничтожает ее временную структуру, сохраняя при этом распределение этих величин. Уровни значимости при этом соответствуют вероятности случайного появления значения, превышающего заданное, в любом из частотных бинов спектра мощности полностью случайного процесса с выборочным распределением, совпадающим с наблюдаемым. Особенность в районе 9 секунд ясно видна в спектре мощности средней части кривой блеска, при уровне значимости около  $10^{-15}$ , и соответствует четырем разделенным практически равными интервалами пикам на кривой блеска. Низкочастотные компоненты как в оптическом, так и в гамма-спектрах соответствуют двум различным уровням интенсивности в кривых блеска. Особенность в спектре мощности разностной кривой с уровнем значимости около 0.01 может соответствовать периодической компоненте амплитудой 10% с периодом порядка 1.13 с, обнаруживающейся в течение последнего пика. Остальные интервалы разностной кривой блеска не показывают подобных деталей.

интервалу между пиками, при уровне значимости  $10^{-15}$  (см. среднюю панель на Рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что нами обнаружены периодические вариации оптического излучения транзientа на временной шкале в несколько секунд.

Спектр мощности гамма-излучения, найденный по данным детектора ВАТ космического телескопа Swift, изображенный на верхней панели Рис. 3, не показывает явно выделенных деталей на данной частоте. Это может объясняться существенным вкладом стохастической переменности, имеющей вид дробового шума, в частотном интервале от десятков секунд до долей секунды [23], что может скрывать периодическую структуру не очень боль-

шой амплитуды в случае неаддитивного и немультимпликативного характера шума.

Для анализа переменности кривой блеска на малых временах мы вычли из нее гладкую кривую, представляющую четыре пика согласно проведенной ранее аппроксимации, и исследовали их разность, изображенную на нижней панели Рис. 5. Фурье-анализ различных ее интервалов выявил признаки периодических вариаций интенсивности в течение последнего пика, в интервале от  $T + 40$  с до  $T + 50$  с (см. Рис. 3). В остальных фазах кривой блеска нет существенной переменности на частотах 0.1–3.5 Гц (0.3–10 с) с мощностью, превышающей 15% до перенаведения и 10% — после. Чтобы исключить аппаратную природу обнаруженных пе-

**Таблица.** Параметры оптимальной аппроксимации для разложения кривой блеска транзиента на 4 пика, описываемых выражением [21]  $F = F_0 \left(\frac{t}{T_0}\right)^r \left(\frac{d}{d+r} + \frac{r}{d+r} \left(\frac{t}{T_0}\right)^{r+1}\right)^{-(r+d)/(r+1)}$ , и показанных на Рис. 5. Здесь  $T_0$  и  $F_0$  соответствуют положению пика и его интегральному потоку, тогда как  $r$  и  $d$  — показатели степени для переднего и заднего фронтов соответственно.  $\Delta T$  — расстояние между данным пиком и предыдущим. Вероятность случайного выпадения таких расстояний между пиками оценивалась путем вычисления статистики  $(\Delta T_{1,2} \times \Delta T_{2,3} \times \Delta T_{3,4}) / \Delta T_{1,4}^3$  по  $10^5$  реализациям четверок пуассоновских пиков, и составила  $10^{-3}$

$T_0$ , с	$F_0$ , Ян	$r$	$d$	$\Delta T$ , с
$18.3 \pm 0.3$	$23.2 \pm 0.6$	$4.0 \pm 0.4$	$-5.4 \pm 4.1$	$8.7 \pm 0.4$
$27.0 \pm 0.3$	$13.4 \pm 3.4$	$24.8 \pm 8.3$	$-9.7 \pm 4.9$	$9.1 \pm 0.4$
$36.1 \pm 0.2$	$11.4 \pm 1.7$	$25.9 \pm 7.6$	$-22.0 \pm 17$	$8.3 \pm 0.5$
$44.4 \pm 0.5$	$15.1 \pm 1.8$	$21.9 \pm 3.3$	$-5.1 \pm 0.2$	

риодических вариаций, мы провели аналогичный анализ для звезд сравнения и фона, который не показал наличия подобных особенностей.

Уровень значимости этого пика на спектре мощности примерно равен 1%. Период и амплитуда соответствующей синусоидальной компоненты, полученные аппроксимацией методом нелинейного метода наименьших квадратов, составляют 1.13 с (0.6 секунды в системе отсчета всплеска) и 9% соответственно.

Для сравнения временной структуры кривых блеска в оптическом и гамма диапазонах мы провели кросс-корреляционный анализ средней части всплеска, исключая очевидным образом скоррелированные участки нарастания и спада интенсивности [15] (см. Рис. 4). Корреляция между данными высокого временного разрешения не превышает 0.5 за счет существенного вклада в интервале 0.1–1 с шумовой компоненты как в оптическом (ошибки измерения), так и в гамма (физическая высокочастотная переменность типа дробового шума [23]) диапазонах. Для данных низкого разрешения с шагом 0.13 с коэффициент корреляции, напротив, достигает 0.82 при сдвиге оптической кривой на 2 секунды назад по отношению к гамма-излучению (см. Рис. 4). Соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне показывает те же четыре разделенных практически равными интервалами пика, что и оптическая.

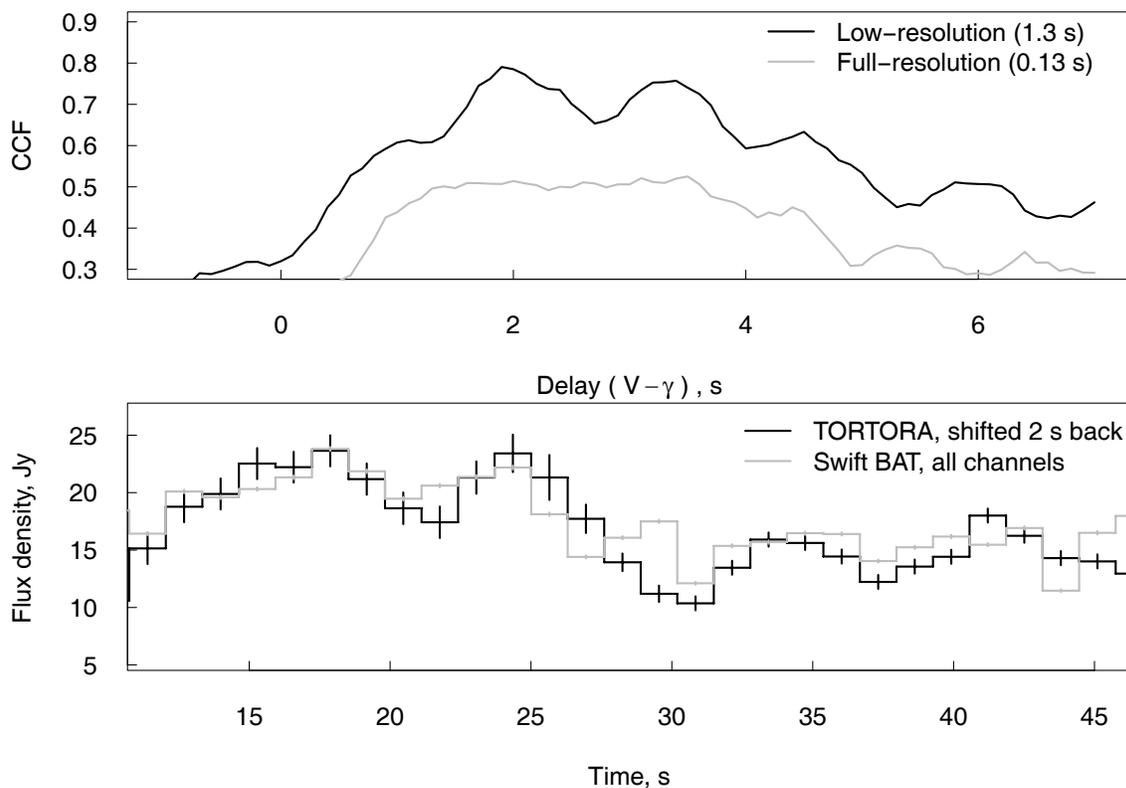
Запаздывание  $\Delta t \approx 2$  с оптического излучения по отношению к гамма с неизбежностью

свидетельствует, что они генерируются в различных частях выброса, при этом оптические кванты образуются в области, расположенной на  $\Delta R \approx 2c\Gamma^2 \Delta t(1+z)^{-1} = 1.5 \times 10^{16} \Gamma_{500}^2$  см дальше от центра объекта ( $\Gamma_{500}$  — Лоренц-фактор выброшенного вещества в единицах 500) [1, 24].

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности, обнаруженные нами в излучении GRB080319B, явным образом противоречат моделям генерации излучения, основанным на различных видах взаимодействия внутри одного ансамбля электронов и излучаемых ими фотонов (синхротронные и обратные комптоновские механизмы) [14, 25, 26], модели с двумя внутренними ударными волнами — прямой и обратной [27], а также модели с релятивистской турбулентностью в выбросе [28]. С другой стороны, крутизна передних фронтов и практически одинаковая длительность всех четырех оптических вспышек противоречат модели внешней ударной волны, как прямой, так и обратной, в качестве источника оптического излучения [29].

К настоящему времени предложены две модели, основанные на внутренних ударных волнах, в которых оптическое и гамма излучения генерируются синхротронным механизмом в различных частях выброса — чем больше энергия кванта, тем ближе к центральному источнику он испускается. Это модели “остаточных столкновений” [24] и значительной нейтронной компоненты в выбросе [30]. В их сценариях гамма-кванты испускаются на расстоянии  $10^{14}$ – $10^{15}$  см от центра за счет нагрева электронов на фронтах ударных волн, порождаемых при столкновении протонных оболочек, выброшенных из центрального источника. В рамках первой модели оптические кванты образуются в оптически тонкой плазме при столкновении “остаточных” оболочек — ранее слившихся выброшенных слоев — на больших  $10^{16}$  см, расстояниях [24]. В модели же с существенной нейтронной компонентой оптическое излучение генерируется электронами, испущенными при  $\beta$ -распаде нейтронов, которые достигают расстояний  $R_d \sim 10^{16}$  см не взаимодействуя с другими компонентами выброса. Продукты такого распада, протоны и электроны, сталкиваются с позднее выброшенными из центрального источника более быстрыми протонными оболочками, что приводит к формированию вторичных ударных волн, нагревающих электроны, которые и генерируют синхротронное оптическое излучение. Обе модели объясняют наблюдаемое двухсекундное запаздывание периодических пиков в оптической кривой блеска по отношению к таковым в гамма-диапазоне, а также ее существенную большую сглаженность на временной шкале



**Рис. 4.** Верхняя панель — кросс-корреляция гамма-кривой блеска по данным Swift-BAT (сумма всех спектральных каналов) и оптической кривой блеска по данным камеры TORTORA как с полным (0.13 с), так и с низким (1.3 с) временным разрешением. Для анализа использована лишь центральная часть всплеска, за исключением фаз нарастания и спада излучения. Коэффициент корреляции вычислялся для каждой величины сдвига путем переразбиения соответствующим образом сдвинутой гамма-кривой блеска к бинам оптической. Пиковая корреляция для данных высокого временного разрешения (0.13 с) существенно ниже, чем для низкого (1.3 с), из-за их более высокой зашумленности. Квази-периодические вариации величины корреляции связаны с переходом острого пика кривой блеска в гамма-диапазоне на  $T + 30$  с через границы отдельных бинов. Нижняя панель — оптическая кривая блеска низкого разрешения, сдвинутой на 2 секунды назад, а также соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне. Коэффициент корреляции  $r$  при этом близок к 0.82 при уровне значимости  $5 \times 10^{-7}$ .

0.1–1 с в сравнении с сильнопеременным на этих временах гамма излучением [23]. С другой стороны, огромное различие оптического и гамма потоков ( $F_o/F_\gamma \sim 10^3$ ) [14] легче интерпретировать в модели с нейтронной компонентой [30]. Более того, существенная доля нейтронов в выбросе практически неизбежна в случае ярких гамма-всплесков типа GRB080319B [31, 32]. Таким образом, эта модель является предпочтительной, и наши результаты могут служить сильным свидетельством в пользу существования значительной нейтронной компоненты в выбросе.

Следует отметить, что вывод о генерации оптического и гамма-излучения на разных расстояниях от центрального источника является прямым следствием обнаруженного нами сходства структур оптической и гамма кривых блеска при их относительном сдвиге. Он не зависит ни от конкретных механизмов преобразования кинетической энергии выброса во внутреннюю энергию частиц, ни от механизмов излучения последних. Такой эффект

не может быть следствием вариаций плотности или скорости вещества внутри выброса, таких, как наблюдавшиеся на временах в десятки минут в послесвечениях некоторых других всплесков [33, 34]. Практически невозможно представить такое поведение, в особенности — периодическое, совпадающее в различных частях релятивистского выброса, разнесенных на расстояние около  $10^{16}$  см. Таким образом, заключение о том, что обнаруженные нами вариации имеют общий источник — а именно, периодическую активность “центрального источника” (каждый оптический пик при этом соответствует одному эпизоду активности) — становится неизбежным.

Обнаруженная переменность потока излучения выброшенного вещества может быть проявлением нестационарной аккреции, обусловленной периодически развивающейся гравитационной неустойчивостью [35] горячих внутренних частей массивного (около одной массы Солнца) аккреционного

диска, вращающегося вокруг черной дыры массой три солнечных, образовавшейся в результате коллапса ядра массивной звезды [36, 37]. Такой диск должен содержать существенную долю нейтронов [32]. Четыре видимых в оптической кривой блеска пика отражают четыре эпизода аккреционной активности, приводящей к струйному выбросу вещества. Газ из внутренних частей диска, фрагментированный за счет различных неустойчивостей, образует отдельные оболочки внутри выброса, столкновения которых порождают внутренние ударные волны. Более того, полусекундные вариации интенсивности, видимые на последних стадиях всплеска, могут быть следствием прецессии Лензе-Тирринга внутренних частей аккреционного диска и, как следствие, джета.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружение и детальное исследование оптического компаньона самого яркого на данный момент гамма-всплеска GRB080319B камерой TORTORA подчеркивает особую важность как проведения постоянного мониторинга больших областей небесной сферы, так и использования приемников и методов высокого временного разрешения при поиске коротких оптических транзиентов неизвестной заранее локализации. Достигнутые успехи позволяют нам и далее развивать стратегию подобных наблюдений, следующей стадией которой может явиться предлагаемая нами схема широкопольной мониторинговой системы нового поколения [38].

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана грантами РФФИ (№ 04-02-17555, 06-02-08313 и 09-02-12053), INTAS (04-78-7366), CRDF (№ RP1-2394-MO-02), грантом Progetti Pluriennali 2003 Болонского университета, программой Президиума РАН, а также грантом Президента РФ для поддержки молодых ученых.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Piran, *Reviews of Modern Physics* **76**, 1143 (2005).
2. P. Meszaros, *Reports on Progress in Physics* **69**, 2259 (2006).
3. C. Akerlof et al., *Nature* **398**, 400 (1999).
4. S. D. Barthelmy, *American Institute of Physics Conference Series* **428**, 129 (1998).
5. C. Kouveliotou et al., *Astrophys. J.* **413**, L101 (1993).
6. K. N. Borozdin et al., *Proceedings of the SPIE* **4847**, 344 (2002).
7. A. Burd et al., *New Astronomy* **10**, 409 (2005).
8. T. Piran and E. Nakar, arXiv:astro-ph/0202403

9. E. Nakar and T. Piran, *Astrophys. J.* **572**, L139 (2002).
10. M. Lyutikov, *New Journal of Physics* **8**, 119 (2006).
11. S. Karpov et al., *Nuovo Cimento C* **28**, 747 (2005).
12. E. Molinari et al., *Nuovo Cimento B* **121**, 1525 (2006).
13. S. Karpov et al., *Advances in Astronomy* **2010**, ID 784141 (2010).
14. J. L. Racusin et al., *Nature* **455**, 183 (2008).
15. G. Beskin et al., *American Institute of Physics Conference Series* **1065**, 251 (2008).
16. G. Beskin et al., arXiv:0905.4431.
17. J. L. Racusin et al., *GRB Coordinates Network Circular* **7427**, 1 (2008).
18. M. Cwiok et al., *GRB Coordinates Network Circular* **7439**, 1 (2008).
19. P. Wozniak et al., *GRB Coordinates Network Circular* **7464**, 1 (2008).
20. S. Karpov et al., *GRB Coordinates Network Circular* **7452**, 1 (2008).
21. R. Kocevski, F. Ryde, and E. Liang, *Astrophys. J.* **596**, 389 (2003).
22. E. Høg et al., *Astronom. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
23. R. Margutti et al., *American Institute of Physics Conference Series* **1065**, 259 (2008).
24. Z. Li and E. Waxman, *Astrophys. J.* **674**, 65 (2008).
25. P. Kumar and A. Panaitescu, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **391**, L19 (2008).
26. Y.-Z. Fan and T. Piran, *Frontiers of Physics in China* **3**, 306 (2008).
27. Y. W. Yu, X. Y. Wang, and Z. G. Dai, *Astrophys. J.* **692**, 1662 (2009).
28. P. Kumar and R. Narayan, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **395**, 472 (2009).
29. Y.-C. Zou, T. Piran, and R. Sari, *Astrophys. J.* **692**, L92 (2009).
30. Y.-Z. Fan, B. Zhang, and D.-M. Wei, *Phys. Rev. D* **79**, 021301 (2009).
31. E. V. Derishev, V. V. Kocharovskiy, and V. V. Kocharovskiy, *Astrophys. J.* **521**, 640 (1999).
32. J. Pruet, S. E. Woosley, and R. D. Hoffman, *Astrophys. J.* **586**, 1254 (2003).
33. P. Jakobsson et al., *New Astronomy* **9**, 435 (2004).
34. D. Bersier et al., *Astrophys. J.* **584**, L43 (2003).
35. Y. Masada et al., *Astrophys. J.* **663**, 437 (2007).
36. S. Woosley, *Astrophys. J.* **405**, 273 (1993).
37. W. Zhang, S. E. Woosley, and A. Heger, *Astrophys. J.* **608**, 365 (2004).
38. G. Beskin et al., *Advances in Astronomy* **2010**, ID 171569 (2010).

## RAPID OPTICAL VARIABILITY OF THE GAMMA-RAY BURST GRB 080319B AND ITS CENTRAL ENGINE

**G. Beskin, S. Karpov, S. Bondar, A. Guarnieri, K. Bartolini, D. Greko, A. Piccioni**

The results of observations of the optical emission that accompanied the gamma-ray burst GRB 080319B are reported. Observations were made using the TORTORA fast wide-field camera mounted on the REM robotic telescope in Chile. The behavior of the light curve before, during, and after the gamma-ray burst is described. The light curve consists of four, possibly periodic, 5–7 s long peaks 8–9 s apart. The behavior of the burst in the gamma and optical energy ranges are compared and the results of the theoretical interpretation of this comparison are reported.

Key words: *Stars: gamma-ray burst: individual*