

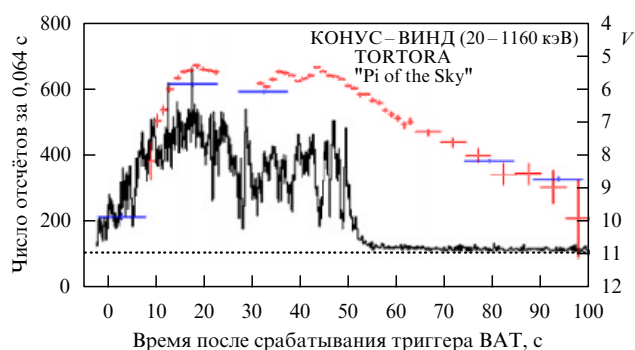


Рис. 7. Оптическое и гамма-излучение события GRB080319B, по данным КОНУС–ВИНД, TORTORA и "Pi of the Sky" [16]. V — характеристика оптической яркости всплеска.

В заключение следует подчеркнуть, что в ФТИ создана надёжная и адекватная задаче исследования космических гамма-всплесков аппаратура КОНУС. Российско-американский эксперимент КОНУС–ВИНД по важности, качеству и полноте получаемой информации выдвинулся на передовые позиции в исследованиях экстремальных взрывных явлений во Вселенной. В ходе 15-летнего непрерывного эксперимента обнаружено и изучено более 3500 космических гамма-всплесков, исследована всплесковая активность всех известных гамма-репитеров. Сводка данных о наблюдениях гамма-репитеров в экспериментах КОНУС содержится в "Konus catalog of SGR activity: 1978 to 2000" [17]. Подготовлены печатная и электронная версии второго каталога данных наблюдений гамма-репитеров в экспериментах КОНУС–ВИНД, КОНУС, ГЕЛИКОН и КОНУС–РФ. Этот каталог охватывает период наблюдений с 1994 г. по 2009 г. и содержит данные о всех известных источниках мягких повторных всплесков и гигантских вспышек от них, полученные с помощью идентичных приборов. Сводка данных о наблюдениях коротких гамма-всплесков за период 1994–2002 г. содержится в электронном каталоге www.ioffe.ru/LEA/shortGRBs/Catalog/. Готовится печатная и электронная версии каталога коротких всплесков, охватывающие период 1994–2009 гг.

Список литературы

1. Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A *Astrophys. J. Lett.* **182** L85 (1973)
2. Мазец Е П, Голенецкий С В, Ильинский В Н *Письма в ЖЭТФ* **19** 126 (1973) [Mazets E P, Golenetskii S V, Il'inskii V N *JETP Lett.* **19** 77 (1973)]
3. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Под ред. Р А Сюняева) (М.: Физматлит, 1982) с. 216 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 1 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1981) p. 205]
4. Мазец Е П, Голенецкий С В, в сб. *Астрофизика и космическая физика* (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия, Вып. 32, Под ред. Р А Сюняева) (М.: ВИНТИ, 1987) с. 16 [Mazets E P, Golenetskii S V, in *Soviet Scientific Reviews, Sec. E, Astrophysics and Space Physics Reviews* Vol. 6 (Ed. R A Syunyaev) (Chur: Harwood Acad. Publ., 1988) Pt. 3, p. 283]
5. Paciesas W S et al. *Astrophys. J. Suppl.* **122** 465 (1999)
6. Мазец Е П и др. *Письма в Астрон. журн.* **5** 307 (1979) [Mazets E P et al. *Astron. Lett.* **5** 163 (1979)]
7. Mazets E P et al. *Nature* **282** 587 (1979)
8. Golenetskii S V, Ilyinskii V N, Mazets E P *Nature* **307** 41 (1984)
9. Mazets E P et al. *Astrophys. J. Lett.* **519** L151 (1999)

10. Hurley K et al. *Nature* **397** 41 (1999)
11. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 3 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 1 (2007)]
12. Фредерикс Д Д и др. *Письма в Астрон. журн.* **33** 22 (2007) [Frederiks D D et al. *Astron. Lett.* **33** 19 (2007)]
13. Mazets E P et al. *Astrophys. J.* **680** 545 (2008)
14. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Lett.* **698** L82 (2009)
15. Van der Horst A J et al. *Astrophys. J. Lett.* **711** L1 (2010)
16. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
17. Aptekar R L et al. *Astrophys. J. Suppl.* **137** 227 (2001)

PACS numbers: 95.55.Ka, 95.85.Pw, 98.70.Rz
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004h.0424

Открытие быстрой оптической переменности гамма-всплеска GRB 080319B и перспективы широкоугольного оптического мониторинга высокого временного разрешения

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, С.Ф. Бондарь, В.Л. Плохотниченко, А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони

1. Введение

Систематическое изучение переменности ночного неба на субсекундной временной шкале является важной, но по сей день практически нерешённой задачей. Необходимость такого рода наблюдений для поиска и изучения нестационарных объектов с неизвестной заранее локализацией отмечалась ещё Бонди [1]. Исследования в этой области проводились и ранее [2, 3], но из-за технических сложностей в них либо достигалось высокое временное разрешение на уровне нескольких десятков микросекунд при мониторинге малых, размером $5' - 10'$, полей, либо использовалось временное разрешение $5 - 10$ с при широких ($20^\circ - 30^\circ$) полях. Функционирующие в настоящее время широкопольные мониторинговые системы, такие как WIDGET [4], RAPTOR [5], BOOTES [6] и "Pi of the Sky" [7], имеют большие поля зрения при достаточно хорошем пределе обнаружения, но низкое временное разрешение, что затрудняет их использование для регистрации быстрых транзиентов.

Приведём несколько примеров таковых: вспышки звёзд типа UV Cet, передние фронты которых могут длиться $0,2 - 0,5$ с [8], 30 % гамма-всплесков, продолжающихся менее 2 с, тогда как отдельные детали их кривых блеска длятся вплоть до 1 мс [9]. Представляют также значительный интерес очень быстрые метеоры, возможно, рождающиеся за пределами Солнечной системы [10].

Г.М. Бескин, С.В. Карпов, В.Л. Плохотниченко.
Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
Нижний Архыз, Карачаево-Черкесия, РФ. E-mail: beskin@sao.ru
С.Ф. Бондарь. Научно-исследовательский институт прецизионного приборостроения, Москва, РФ
А. Гуарниери, К. Бартолини, Д. Греко, А. Пиччиони
(A. Guarnieri, C. Bartolini, G. Greco, A. Piccioni).
Astronomy Department, Bologna University, Bologna, Italy

Ещё одной задачей, требующей проведения регулярных широкопольных наблюдений с высоким временным разрешением является мониторинг околоземного пространства. Траектории большого числа спутников, а также огромного массива малых частиц космического мусора достаточно быстро меняются, причём скорости этих объектов весьма велики, потому наблюдение их обычными методами представляет собой весьма сложную задачу.

Начиная с конца 1990-х годов мы разрабатываем стратегию оптического мониторинга с высоким временным разрешением областей небесной сферы, сравнимых по размеру с полем зрения космических гамма-телескопов. Изначально предлагалось использовать инструменты с большими зеркалами относительно низкого качества [11, 12], например черенковские телескопы и солнечные концентраторы, с массивами фотоумножителей при временном разрешении вплоть до нескольких микросекунд. Затем, однако, мы остановились на проекте широкопольной камеры с объективом, имеющим относительно малый диаметр, оснащённой электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) для эффективного сокращения фокуса и быстрой малошумящей ПЗС-матрицей (ПЗС — прибор с зарядовой связью). Прототип такой системы, FAVOR (FASt Variability Optical Registrator), который был введён в строй в 2003 г., расположен вблизи 6-метрового телескопа БТА (Большой телескоп азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории РАН [13, 14]. Аналогичная по конструкции камера TORTORA (Telescopio Ottimizzato per la Ricerca dei Transienti Ottici RAPidi) [15], установленная в 2006 г. на монтировке роботического телескопа REM (Rapid Eye Mount) [16] в обсерватории Ла Силла (Чили) (ESO — European Southern Observatory), составляет вместе с ним двухтелескопный комплекс TORTO-REM [17]. Именно эта камера обнаружила и позволила детально исследовать оптическое излучение самого яркого на данный момент гамма-всплеска GRB 080319B [18–20].

В данном докладе описывается схема и особенности реализации камеры TORTORA, приводятся некоторые результаты её работы, включая всесторонний анализ данных по всплеску GRB 080319B, а также обсуждается проект широкопольной мониторинговой системы следующего поколения, способной не только обнаруживать гораздо более слабые транзиенты, но и проводить их многоцветную фотометрию и поляриметрию.

2. Описание широкопольных камер FAVOR и TORTORA

Параметры камер FAVOR и TORTORA в сравнении с параметрами других существующих на данный момент широкопольных мониторинговых систем приведены в табл. 1. Видно, что лишь камеры FAVOR и TORTORA

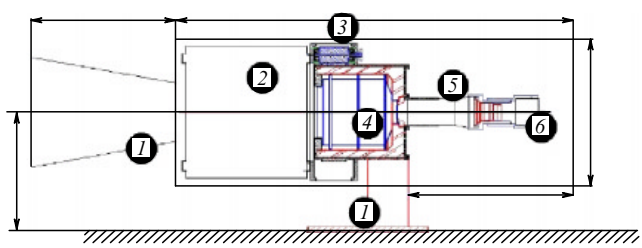


Рис. 1. Схема камеры TORTORA: 1 — защитная бленда, 2 — главный объектив, 3 — узел фокусирования главного объектива, 4 — электронно-оптический преобразователь, 5 — оптика переброса и узел фокусирования ПЗС-матрицы, 6 — быстрая ПЗС-матрица.

Таблица 1. Основные работающие на данный момент оптические широкопольные мониторинговые системы

Название	Поле зрения, град	Разрешение, с	Проницание
WIDGET	62 × 62	5	10 ^m
RAPTOR A/B	40 × 40	60	12 ^m
RAPTOR Q	180 × 180	10	10 ^m
BOOTES	16 × 11	30	12 ^m
BOOTES-AllSky	180 × 180	30	10 ^m
"Pi of the Sky"	33 × 33	10	11,5 ^m
AROMA-W	25 × 35	5–100	10,5 ^m –13 ^m
MASTER-VWF	20 × 21	5	11,5 ^m
MASTER-Net	30 × 30	1	9 ^m
FAVOR*	16 × 24	0,13	10 ^m –11,5 ^m
TORTORA*	24 × 32	0,13	9 ^m –10,5 ^m

* Для камер FAVOR и TORTORA предельное проницание соответствует обнаружению транзиента на уровне 3σ на отдельном кадре и может отличаться от реального предела обнаружения в используемом разностном методе.

обладают как высоким временным разрешением, так и относительно большим размером поля зрения.

Схема камеры TORTORA приведена на рис. 1, её параметры даны в табл. 2, а изображение представлено на рис. 2. Прибор состоит из главного объектива 2, узла его фокусирования 3, электронно-оптического преобразователя 4, используемого для масштабирования и усиления изображения, оптики переброса 5 и быстрой малошумящей ПЗС-матрицы 6. Камера смонтирована на роботическом телескопе REM, имеющем альт-азимутальную монтировку.

Быстрая ПЗС-матрица регистрирует 7,5 кадров в секунду при времени экспозиции 0,128 с, интервалы между отдельными экспозициями при этом пренебрежимо малы. Информация с матрицы распространяется по локальной гигабитной сети и сохраняется в дисковом RAID-массиве объёмом 1 терабайт. Поток данных при этом составляет около 20 Мб с⁻¹, поэтому информация, полученная за ночь наблюдений, может быть сохранена лишь в течение одного дня.

Таблица 2. Технические параметры камеры TORTORA

Главный объектив		ЭОП		ПЗС-матрица	
Диаметр	120 мм	Фотокатод	S20	Модель	VS-CTT285-2001
Фокус	150 мм	Диаметр	90 мм	Размеры	1388 × 1036 пикселей
D/F	1/1,2	Усиление	150	Масштаб	81"/пиксель
Поле зрения	24 × 32 град	Масштабирование	7,7	Экспозиция	0,13–10 с
		Квантовый выход	10 %	Размер пикселя	6,45 мкм



Рис. 2. Изображение камеры TORTORA, смонтированной на роботическом телескопе REM в обсерватории Ла Силла (ESO, Чили).

Помимо этого данные передаются на выделенный компьютер для обработки в реальном времени с помощью специализированного программного обеспечения, работающего под управлением операционной системы Linux. При этом выделяются и классифицируются транзиентные объекты различных типов и отсеиваются уже известные объекты путём сравнения информации о них с данными из каталогов спутников и звёзд.

3. Методика обнаружения транзиентов

Широкопольные мониторинговые камеры высокого временного разрешения могут применяться для обнаружения и исследования различных классов транзиентных событий — переменных звёзд, сверхновых, активных галактических ядер, событий микролинзирования, покрытий звёзд планетами — с постоянными, хотя и неизвестными заранее координатами. С другой стороны, камеры типа FAVOR и TORTORA могут также отслеживать и движущиеся объекты: искусственные спутники, элементы космического мусора, кометы, астероиды и метеоры. Для решения этих задач были разработаны специализированные алгоритмы обработки данных.

В связи с высокой интенсивностью потока наблюдательной информации практически невозможно использовать для её анализа в реальном времени стандартные фотометрические пакеты, и поэтому мы разработали специальный быстрый метод выделения транзиентов, основанный на изучении статистического поведения интенсивности излучения I в каждом пикселе изображения с течением времени. Текущее значение I сравнивается с бегущим средним

$$\langle I \rangle = \sum \frac{I}{N}, \quad (1)$$

оцениваемым по некоторому числу (скажем, $N = 100$, что соответствует временному окну в 13 с) предшествующих кадров, и выборочной дисперсией

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum I^2 - (\sum I)^2 / N}{N - 1}} \quad (2)$$

и определяется значимость его отклонения от среднего

$$A = \frac{I - \langle I \rangle}{\sigma_I}. \quad (3)$$

Затем все пиксели, имеющие высокую значимость, группируются в пространственно-связные кластеры — наблюдаемые объекты. Некоторые из них, например однопиксельные события, отсеиваются как шумовые.

После выделения всех объектов на данном кадре проводится сравнение их положений с траекториями транзиентов, выделенных ранее (все объекты предполагаются движущимися, неподвижные при этом считаются движущимися с нулевой скоростью). Обнаружение объекта на трёх последовательных кадрах (на временной шкале 0,4 с) достаточно для вынесения суждения о его принадлежности к одному из трёх возможных классов — "шумовых" событий, если объект исчезает после одного кадра, движущихся объектов, если он показывает статистически значимое изменение положения, либо неподвижных транзиентов. Случаи всплеск медленно движущихся высокоорбитальных искусственных спутников выделяются путём сравнения положения транзиентов с данными из регулярно обновляемых каталогов орбитальных элементов спутников [21].

Выделение метеоров, однако, требует несколько иного подхода, поскольку, как правило, они видны лишь на одном-двух кадрах. Более того, скорости их движения существенно выше, чем у искусственных спутников. Подобные события выделяются по высокой яркости и протяжённости.

Астрометрическая и фотометрическая привязки выполняются регулярно (для камеры TORTORA один раз в минуту, так как альт-азимутальная монтажка приводит к систематическому вращению поля зрения) посредством отдельной процедуры фотометрирования всех звёзд на кадре с помощью программы SExtractor [22] и отождествления их в астрометрическом каталоге Tycho-2 [23].

Таким образом, система анализа данных в реальном времени позволяет выделять и классифицировать любые достаточно яркие оптические транзиенты за 0,4 с после их появления и до момента падения их блеска ниже уровня обнаружения разностным методом. Пример такой достаточно короткой вспышки показан на рис. 3. После обнаружения и классификации информация о событии может передаваться в сеть для проведения его детального исследования. Кроме того, все полученные в реальном времени данные о транзиенте, включая его кривую блеска, траекторию, а также изображения его окрестностей, могут сохраняться для дальнейшего изучения.

4. Результаты, полученные камерой TORTORA

Широкопольная мониторинговая камера TORTORA, которая эксплуатируется с июня 2006 г., примерно половину всего доступного наблюдательного времени (когда телескоп REM не выполняет плановых наблюдений) проводит мониторинг областей небесной сферы, наблюдаемых в данный момент космическим аппаратом "Swift", в соответствии с телеметрической информацией, распространяемой в реальном времени по сети GCN (Gamma-ray Burst Coordination Network) [24].

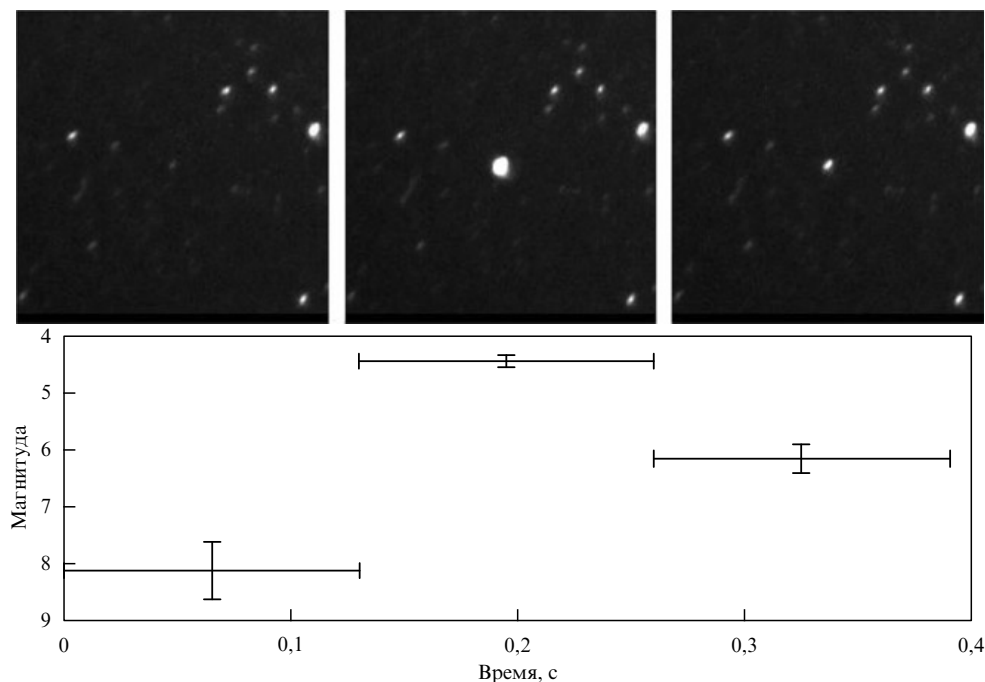


Рис. 3. Пример короткой вспышки (результат вращения высокоорбитального спутника), зафиксированной мониторинговой камерой. Полная длительность события 0,4 с, оно обнаруживается на трёх последовательных кадрах.

Таблица 3. Верхние пределы постоянной составляющей оптического потока, а также синусоидальной переменной компоненты блеска возможных оптических транзиентов

Всплеск	Начало наблюдений, с	Предел за 13 с (100 кадров)	Диапазон частот, Гц	Верхний предел
GRB 060719	59	12,4	0,01–3,5	15,3 ^m
GRB 061202	92	11,3	0,1–3,5	14,0 ^m
GRB 060719	118	11,3	0,01–3,5	16,4 ^m

Каждую наблюдательную ночь камера фиксирует примерно 300 метеоров и 150 пролётов спутников различной яркости.

4.1. Наблюдения гамма-всплесков в реагирующем режиме

Благодаря автоматической реакции телескопа REM на сообщения об обнаружении гамма-всплесков космическими аппаратами, камера TORTORA смогла пронаблюдать области локализации трёх гамма-всплесков вскоре после их начала [25–27].

Сводка полученных в этих наблюдениях верхних пределов для блеска соответствующих оптических транзиентов приведена в табл. 3. Пределы постоянной составляющей потока были получены по суммам 100 последовательных кадров, что соответствует эффективному временному разрешению 12,8 с.

4.2. Наблюдения гамма-всплеска GRB 080319B

19 и 20 марта 2008 г. оказались наиболее плодотворными для широкопольных мониторинговых систем по всему миру. Тогда в течение 24 часов были зарегистрированы пять гамма-всплесков, один из которых, GRB 080319B [28], оказался самым ярким из наблюдавшихся как в гамма-диапазоне, так и в оптическом диапазоне и первым, который был независимо обнаружен наземными мониторинговыми системами. Область его локализации

на небесной сфере наблюдалась до, во время и после гамма-события камерами "Pi of the Sky" [29], RAPTOR Q [30] и TORTORA [18].

Наша камера TORTORA проводила мониторинг области всплеска GRB 080319B [18, 19] начиная с 05:46:22 UT, примерно за полчаса до его начала (момент обнаружения его в гамма-диапазоне — 06:12:49 UT), в течение периода существования всплеска, а также на протяжении нескольких десятков минут после его окончания. В промежутке между 06:13:13 и 06:13:20 UT роботический телескоп REM произвёл автоматическое перенаведение по координатам, полученным со спутника "Swift" [28], 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 редукции, 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 (Image Reduction and Analysis Facility) для всего набора данных, за исключением промежутка перенаведения. В этой фазе изображения как объекта, так и соседних звёзд были деформированы вследствие их существенного смещения за время экспозиции, что значительно снизило отношение сигнала к шуму. В результате на отдельных кадрах поток нельзя было уверенно измерить. Мы произвели сложение неперекрывающихся последовательностей из 10 кадров с соответствующим сдвигом, компенсирующим движение звёзд. Для полученных изображений треков отношение сигнала к шуму примерно соответствует таковому на остальных участках кривой блеска (рис. 5б). Затем мы измерили потоки от объекта и соседних звёзд на суммарных кадрах как посредством апертурной фотометрии с эллиптическими

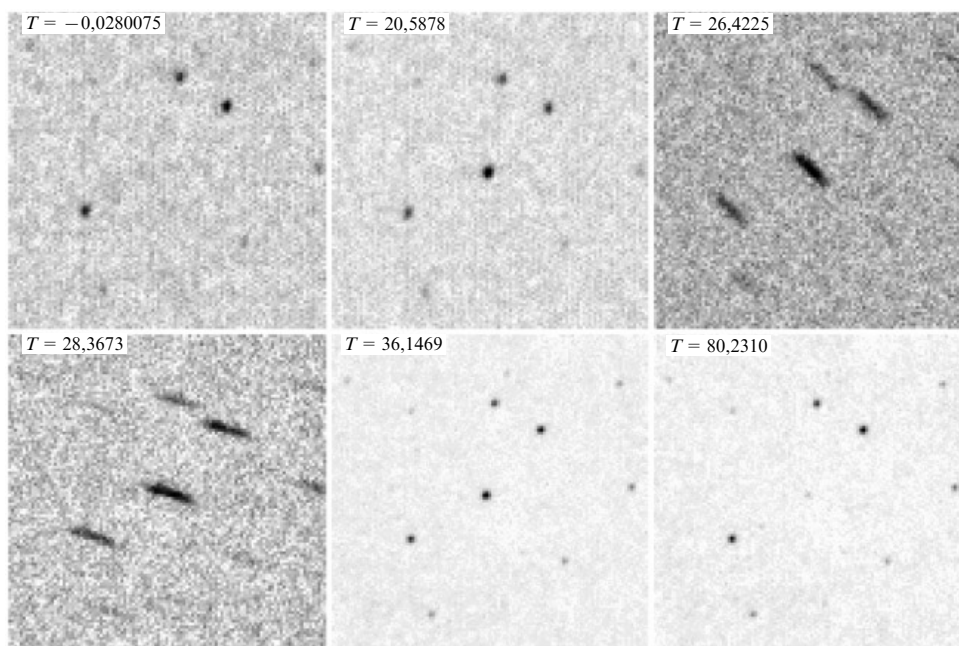


Рис. 4. Изображение оптического транзиента, связанного с гамма-всплеском GRB080319B, на разных стадиях его развития по результатам наблюдений камеры TORTORA. Приведены суммы 10 последовательных кадров с эффективным временным разрешением 1,3 с для момента начала гамма-события ($T \approx 0$), времени максимального блеска первого пика ($T \approx 20,6$ с), двух моментов в его середине ($T \approx 26,4$ с и $T \approx 28,4$ с), во время последнего пика ($T \approx 36$ с) и на стадии раннего послесвечения ($T \approx 80$ с). Размер поля составляет $2,5 \times 2,5$ градусов. Звёздные профили на третьем и четвёртом кадрах деформированы в процессе перенаведения (с $T \approx 24$ с по $T \approx 31$ с) роботического телескопа REM, на котором установлена камера, по координатам всплеска, полученным с космического телескопа "Swift". Исходное положение всплеска находилось на краю поля зрения камеры, в результате перенаведения оно сместилось к центру поля зрения, что привело к некоторому улучшению качества изображений.

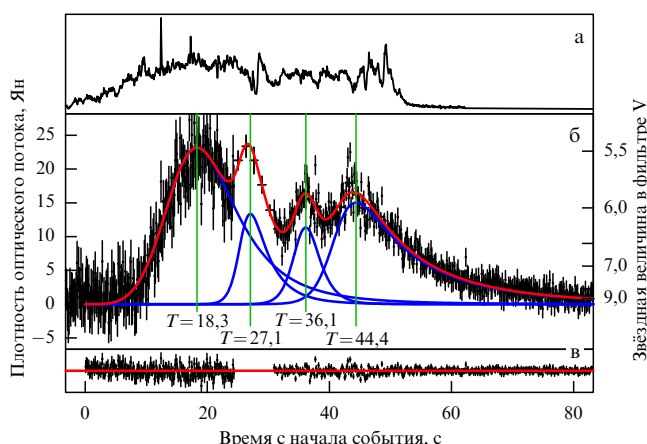


Рис. 5. Кривая блеска оптического компаньона гамма-всплеска GRB080319B по данным широкополной камеры TORTORA. (а) Гамма-излучение, начинающееся в момент $T \approx -4$ с и затухающее при $T \approx 55$ с. (б) Данные высокого временного разрешения (экспозиция 0,13 с, выделены серым цветом) доступны для всего периода гамма-активности за исключением интервала перенаведения телескопа REM ($24,5$ с $< T < 31$ с), тогда как данные низкого разрешения, полученные по суммам каждых 10 последовательных кадров с эффективным временем экспозиции 1,3 с, доступны для всей длительности события. (в) Невязки аппроксимации кривой блеска четырьмя практически равноотстоящими друг от друга пиками с параметрами, приведёнными в табл. 4.

апертурами, так и методом аппроксимации функции рассеяния точки. Оба метода дали согласующиеся между собой результаты. Мы отдельно проверили поведение потоков от звёзд сравнения и не нашли в них никаких особенностей, которые поставили бы под сомнение точность фотометрии и переменность блеска объекта

на данном интервале. Эффективное временное разрешение для него составило 1,3 с; для всех других фаз всплеска фотометрия проводилась как с высоким (0,13 с, отдельные кадры), так и с низким (1,3 с, суммы 10 последовательных изображений) временным разрешением. Полученные инструментальные звёздные величины затем были приведены к V-полосе джонсоновской фотометрической системы путём нормировки на расположенные поблизости звёзды каталога *Tycho-2* [23]. Сравнение полученной таким образом кривой блеска, приведённой на рис. 5, с данными других, наблюдавших это событие мониторинговых камер, таких как "Pi of the Sky" [29] и RAPTOR (RAPid Telescope for Optical Response) [30], показало хорошее совпадение результатов.

Оптическое излучение транзиента по данным камеры TORTORA уверенно обнаруживается примерно с десятой секунды после начала гамма-события. Его интенсивность возрастает как $\sim t^4$, достигает звёздной величины $V \approx 5,5^m$, затем изменяется в полтора-два раза на временной шкале в несколько секунд и, наконец, убывает как $\sim t^{-4,6}$ вплоть до выхода за предел чувствительности камеры спустя примерно 100 с. Гамма-излучение при этом заканчивается на 57-й секунде с начала события.

На кривой блеска транзиента выделяются четыре пика с близкими амплитудами, длительностями и формами. Мы аппроксимировали их суммой четырёх кривых, каждая из которых гладко соединяет два степенных выражения, описывающих передний и задний фронты соответственно [31],

$$F = F_0 \left(\frac{t}{T_0} \right)^r \left(\frac{d}{d+r} + \frac{r}{d+r} \left(\frac{t}{T_0} \right)^{r+1} \right)^{-(r+d)/(r+1)}. \quad (4)$$

Таблица 4. Параметры оптимальной аппроксимации для разложения кривой блеска транзиента на четыре пика, описываемых выражением (4) и показанных на рис. 5

T_0 , с	F_0 , Ян	r	d	ΔT , с
$18,3 \pm 0,3$	$23,2 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,4$	$-5,4 \pm 4,1$	$8,7 \pm 0,4$
$27,0 \pm 0,3$	$13,4 \pm 3,4$	$24,8 \pm 8,3$	$-9,7 \pm 4,9$	$9,1 \pm 0,4$
$36,1 \pm 0,2$	$11,4 \pm 1,7$	$25,9 \pm 7,6$	$-22,0 \pm 17$	$8,3 \pm 0,5$
$44,4 \pm 0,5$	$15,1 \pm 1,8$	$21,9 \pm 3,3$	$-5,1 \pm 0,2$	

Примечание. ΔT — расстояние между данным и предыдущим пиками. Вероятность случайного выпадения таких расстояний между пиками, которая оценивалась путём вычисления статистики $\Delta T_{1,2}\Delta T_{2,3}\Delta T_{3,4}/\Delta T_{1,4}^3$ по 10^5 реализациям четвёрок пуассоновских пиков, составила 10^{-3} .

Здесь T_0 и F_0 соответствуют положению пика и его интегральному потоку, r и d — показатели степени для переднего и заднего фронтов соответственно. Параметры этих кривых приведены в табл. 4. Интервалы между максимумами пиков оказываются практически одинаковыми — около 8,5 с, что соответствует 4,4 с при красном смещении GRB 190308B $z = 0,937$ [19]. Вероятность случайной комбинации таких интервалов между четырьмя пиками составляет 10^{-3} (см. табл. 4). В спектре мощности центральной части кривой блеска также при-

сутствует выброс на частоте, соответствующей интервалу между пиками, при уровне значимости 10^{-15} (рис. 6б). Таким образом, можно утверждать, что нами обнаружена периодичность вариаций оптического излучения транзиента на временной шкале в несколько секунд.

Спектр мощности гамма-излучения, найденный по данным детектора BAT космического телескопа "Swift", изображённый на рис. 6а, не показывает явно выделенных деталей на данной частоте. Это может объясняться существенным вкладом стохастической переменности, имеющей вид дробового шума, в частотном интервале от нескольких десятков секунд до нескольких долей секунды [32], что может скрывать периодическую структуру с не очень большой амплитудой в случае мультипликативного характера шума.

Для анализа переменности кривой блеска на малых временах мы вычли из неё гладкую кривую с четырьмя пиками, согласно проведённой ранее аппроксимации, и исследовали эту разность, представленную на рис. 5в. Фурье-анализ различных её интервалов выявил признаки периодических вариаций интенсивности во время последнего пика, в интервале от $T = 40$ с до $T = 50$ с (см. рис. 6). В остальных фазах кривой блеска нет признаков сущест-

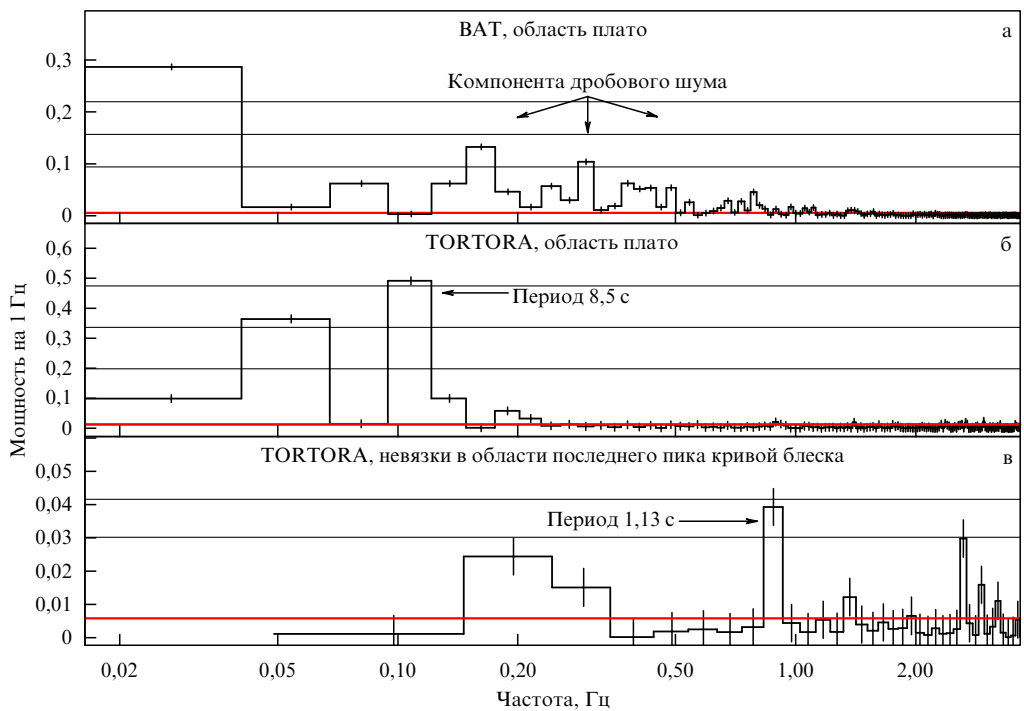


Рис. 6. Спектры мощности центральной части (от $T = 13$ с до $T = 50$ с) всплеска по данным гамма-телескопа BAT (Burst Alert Telescope) космического аппарата "Swift" (сумма всех спектральных каналов) (а) и оптической камеры TORTORA (б), а также спектр мощности разностей оптической кривой блеска после вычитания гладкой аппроксимирующей функции, изображённой на рис. 5, для интервала последнего пика (от $T = 40$ с до $T = 50$ с) (в). Линейный тренд был вычтен из всех кривых. Отсутствующая часть оптической кривой (интервал от $T = 24,5$ с до $T = 31$ с) высокого временного разрешения была заполнена гауссовым белым шумом с дисперсией, соответствующей таковой в остальной части данных, и средними значениями, лежащими на гладкой аппроксимирующей кривой. Ошибки и уровни значимости спектров оценивались бутстрап-методом — посредством генерации большого числа синтетических кривых блеска при случайном перемешивании величин интенсивности в исходной кривой, что полностью уничтожает её временную структуру, сохраняя, тем не менее, распределение этих величин. Уровни значимости при этом соответствуют вероятности случайного появления значения, превышающего заданное, в любом из частотных бинов для спектра мощности полностью случайного процесса с выборочным распределением, совпадающим с наблюдаемым. Особенность в области 9 с, которая ясно видна в спектре мощности средней части кривой блеска при уровне значимости около 10^{-15} , соответствует четырём, отделённым друг от друга практически равными интервалами, пикам на кривой блеска. Низкочастотные компоненты как в оптическом спектре, так и в гамма-спектре соответствуют двум различным уровням интенсивности в кривых блеска. Особенность в спектре мощности разностной кривой с уровнем значимости $\sim 0,01$ может соответствовать периодической компоненте с амплитудой 10 % и периодом $\approx 1,13$ с, обнаруживающейся в течение последнего пика. Остальные интервалы разностной кривой блеска не показывают подобных особенностей.

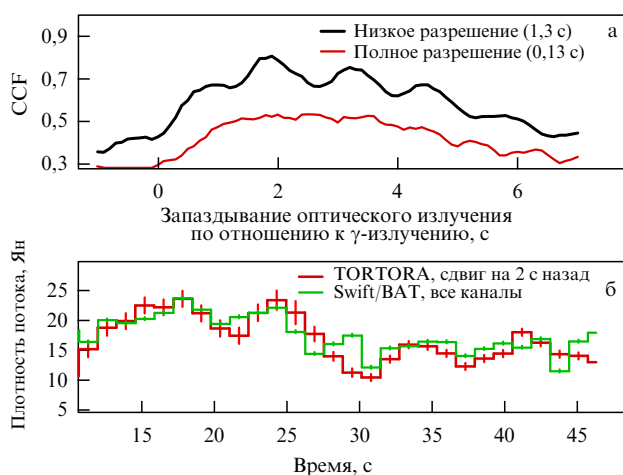


Рис. 7. (а) Кросскорреляция (CCF) гамма-кривой блеска по данным "Swift"/BAT (сумма всех спектральных каналов) и оптической кривой блеска по данным камеры TORTORA как с полным (0,13 с), так и с низким (1,3 с) временным разрешением. Для анализа использовалась лишь центральная часть всплеска за исключением фаз нарастания и спада излучения. Коэффициент корреляции вычислялся для каждого значения сдвига путём переразбиения соответствующим образом сдвинутой гамма-кривой блеска к бинам оптической. Пиковая корреляция для данных высокого временного разрешения (0,13 с) существенно меньше, чем для низкого (1,3 с), вследствие их более высокой зашумлённости. Квазипериодические вариации величины корреляции связаны с переходом острого пика кривой блеска в гамма-диапазоне на $T + 30$ с через границы отдельных бинов. (б) Оптическая кривая блеска с низким разрешением, сдвинутая на 2 с назад, а также соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне. Коэффициент корреляции r при этом близок к 0,82 при уровне значимости 5×10^{-7} .

венной переменности на частотах 0,1–3,5 Гц (0,3–10 с) с мощностью, превышающей 15 % до перенаведения и 10 % после него. Для того чтобы исключить аппаратную природу обнаруженных периодических вариаций, мы провели аналогичный анализ для звёзд сравнения и уровня фона, который не показал наличия подобных особенностей.

Уровень значимости этого пика на спектре мощности равен примерно 1 %. Период и амплитуда соответствующей синусоидальной компоненты, полученные аппроксимацией методом нелинейного метода наименьших квадратов (МНК), составляют 1,13 с (0,6 с в системе отсчёта всплеска) и 9 % соответственно.

Для сравнения временной структуры кривых блеска в оптическом и гамма-диапазонах мы провели кросскорреляционный анализ средней части всплеска, исключая очевидным образом скоррелированные участки нарастания и спада интенсивности [33] (рис. 7). Корреляция между данными высокого временного разрешения не превышает 0,5 за счёт существенного вклада в диапазоне 0,1–1 с шумовой компоненты как в оптической кривой блеска (ошибки измерения), так и в гамма-кривой блеска (физическая высокочастотная переменность типа дробового шума [32]). Для данных низкого разрешения с шагом 0,13 с коэффициент корреляции, напротив, достигает 0,82 при сдвиге оптической кривой на 2 с назад по отношению к гамма-кривой (см. рис. 7). Соответствующим образом переразбитая кривая блеска в гамма-диапазоне показывает те же четыре разделённых практически равными временными интервалами пика, что и оптическая.

Запаздывание $\Delta t \approx 2$ оптического излучения по отношению к гамма-излучению с неизбежностью свидетельствует о том, что они генерируются в различных частях выброса, при этом оптические кванты выходят с расстояния от центра большего на $\Delta R \approx 2c\Gamma^2\Delta t(1+z)^{-1} = 1,5 \times 10^{16} \Gamma_{500}^2$ см, где Γ_{500} — лоренц-фактор выброшенного вещества в единицах 500 [34, 35].

Особенности, обнаруженные нами в излучении этого всплеска, явно противоречат моделям генерации излучения, основанным на различных видах взаимодействия внутри одного ансамбля электронов и излучаемых ими фотонов (синхротронные и обратные комптоновские механизмы) [19, 36, 37], модели с двумя внутренними ударными волнами — прямой и обратной [38], а также модели с релятивистской турбулентностью в выбросе [39]. С другой стороны, крутизна передних фронтов и практически одинаковая длительность всех четырёх оптических всплесков противоречат модели внешней ударной волны, как прямой, так и обратной, в качестве источника оптического излучения [40].

На настоящий момент предложены две модели, основанные на внутренних ударных волнах, в которых оптическое и гамма-излучение генерируются синхротронным механизмом в различных частях выброса: чем больше энергия кванта, тем ближе к центральному источнику он испускается. Это модели "остаточных столкновений" [35] и значительной нейтронной компоненты в выбросе [41]. В этих сценариях гамма-кванты испускаются на расстоянии $10^{14} - 10^{15}$ см от центра вследствие 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 — результатов слияний отдельных групп исходных — на значительно больших, $\gtrsim 10^{16}$ см, расстояниях [35]. Во второй модели, с существенной нейтронной компонентой, оптическое излучение генерируется электронами, испущенными при β -распаде нейтронов, которые достигают расстояний $R \sim 10^{16}$ см, не взаимодействуя с другими компонентами выброса. Продукты такого распада, протоны и электроны, сталкиваются с позднее выброшенными из центрального источника быстрыми протонными оболочками, что приводит к формированию вторичных ударных волн, нагревающих электроны, которые генерируют синхротронное излучение. Обе модели объясняют наблюдаемое двухсекундное запаздывание периодических пиков в оптической кривой блеска по отношению к таковым в гамма-диапазоне, а также её существенно большую сглаженность на временной шкале 0,1–1 с по сравнению с сильнопеременным на этих временах гамма-излучением [32]. С другой стороны, огромное различие оптического и гамма-потоков ($F_o/F_\gamma \sim 10^3$) [19] легче интерпретировать в модели с нейтронной компонентой [41]. Более того, существенная доля нейтронов в выбросе практически неизбежна в случае ярких гамма-всплесков типа GRB 080319B [42, 43]. 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 кривой блеска и гамма-кривой блеска. Этот вывод 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 несколько десятков минут в послесвечениях некоторых других всплесков [44, 45]. Практически невозможно представить такое поведение, в особенности периодическое, совпадающее в различных частях релятивистского выброса, разнесённых на расстояние около 10^{16} см. Таким образом, неизбежно следует заключение о том, что наблюдаемые нами вариации имеют общее происхождение, а именно обусловлены периодической активностью центрального источника (каждый оптический пик при этом соответствует одному эпизоду активности).

Обнаруженная переменность потока излучения выброшенного вещества может быть проявлением нестационарной аккреции, обусловленной периодически развивающейся гравитационной неустойчивостью [46] горячих внутренних частей массивного (около одной массы Солнца) аккреционного диска, вращающегося вокруг чёрной дыры с массой в три солнечных, образовавшейся в результате коллапса ядра массивной звезды [47, 48]. Такой диск должен содержать существенную долю нейтронов [43]. Четыре видимых в оптической кривой блеска пика отражают четыре эпизода аккреционной активности, приводящей к струйному выбросу вещества. Газ из внутренних частей диска, фрагментированный вследствие 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.

5. Широкопольная мониторинговая система следующего поколения

Очевидна важность дальнейшего развития методологии широкопольного поиска быстрых оптических транзиентов в двух направлениях. Во-первых, необходимо улучшать проникание системы как минимум на 2–3 звёздных величины, сохраняя или даже расширяя при этом размер её поля зрения. Этого можно достичь использованием многообъективных (или многотелескопных) конфигураций посредством уменьшения поля зрения отдельного инструмента и, таким образом, увеличения его углового разрешения [49]. Для преодоления существенного вклада шумов считывания ПЗС-матриц необходимо либо увеличивать их квантовый выход и коэффициент усиления электронно-оптического преобразователя, либо использовать мал шумящие ПЗС-матрицы с внутренним усилением. Вторым важным направлением развития является измерение цветов и поляризации обнаруженных транзиентов.

Одна из возможных схем многообъективной мониторинговой системы на основе ПЗС-матриц с внутренним усилением, способной приносить многоцветную и поляризметрическую информацию о транзиенте, приводится ниже.

5.1. Базовый 3×3 -блок

Предлагаемый проект имеет модульную структуру и состоит из отдельных, содержащих по 9 объективов, базовых блоков, установленных на отдельных экваториальных монтировках (рис. 8). Каждый из объективов помещён в карданный подвес, управляемый двумя приводами, и может переориентироваться независимо от остальных. Кроме того, каждый объектив снабжён набором цветowych и поляризационных фильтров, которые могут вводиться в световой пучок в процессе наблюдений. Это позволяет быстро переходить от широкопольного мониторинга без фильтров к узкопольным наблюдениям, в которых все объективы направлены на одну область, например, содержащую только что обнаруженный транзиент, и регистрируют её во всех возможных комбинациях цветowych и поляризационных фильтров (рис. 9). Одновременное наблюдение транзиента всеми объективами в одном фильтре также возможно для повышения точности фотометрии за счёт суммирования их данных.

Каждый объектив снабжён быстрой ПЗС-матрицей с внутренним усилением, имеющей пренебрежимо малые шумы считывания даже на большой кадровой частоте.

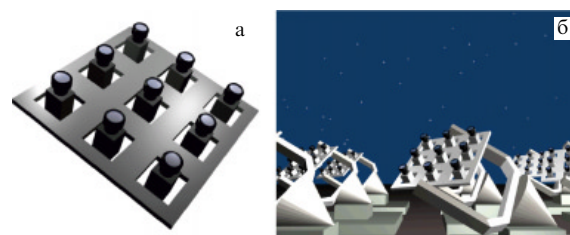


Рис. 8. (а) Базовый 3×3 блок. Каждый объектив оснащён набором сменных цветowych и поляризационных фильтров, которые могут быть оперативно введены в световой пучок, и может перенаводиться независимо от остальных: B, V, R — фотометрические (для полос B, V, R) фильтры, P₁, P₂ и P₃ — поляризационные фильтры для трёх различных ориентаций поляризации. (б) Примерный вид полной мониторинговой системы, состоящей из множества базовых блоков, размещённых на отдельных экваториальных монтировках.

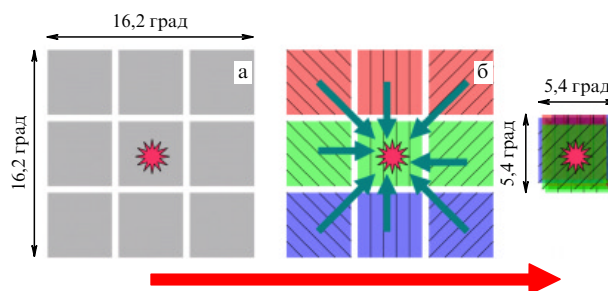


Рис. 9. Различные режимы функционирования базового блока. (а) Режим широкопольного мониторинга в белом цвете либо в одном из цветowych фильтров. (б) Введение в световой пучок цветowych и поляризационных фильтров как первый шаг после обнаружения оптического транзиента. (в) Перенаведение всех объективов на поле, содержащее транзиент, для получения информации о нём в трёх различных фотометрических полосах при трёх ориентациях плоскости поляризации (показанных различными направлениями штриховки) одновременно. Точное время, необходимое для перехода из одного режима в другой, зависит от аппаратной конфигурации, но ожидается, что оно не будет превосходить 0,3 с.

Таблица 5. Проникание в звёздных величинах для базового блока в узкопольном режиме при различных комбинациях фотометрических и поляризационных фильтров при использовании объективов "Marshall Electronics". Для случая объективов "Canon" все пределы оказываются примерно на $1,5^m$ ниже

Экспозиция, с	Без фильтра/В	B + 3 поляризации	BVR	BVR + 3 поляризации
0,1	15,7	13,0	15,0	12,5
10	18,2	15,2	17,5	15,0
1000	20,7	17,9	20,0	17,5

Возможные варианты массово производимых ПЗС-матриц и объективов приведены на рис. 10.

Поток данных с каждого канала такой системы, состоящий около 20 мегабайт в секунду, собирается выделенным компьютером, сохраняющим его на жёстком диске, а также производящим его анализ в реальном времени методом, аналогичным описанному для камер FAVOR и TORTORA. Работа системы в целом координируется выделенным компьютером, получающим информацию об обнаруженных транзиентах от отдельных каналов и контролирующим смену наблюдательных режимов.

Каждый базовый блок в широкопольном мониторинговом режиме имеет поле зрения около 260 квадратных градусов (720 при использовании объективов "Canon") и проникание в B -полосе $\sim 14,5^m$ за 0,1 с (13^m для "Canon"). Сложение последовательных кадров позволяет достичь проникания вплоть до 17^m для экспозиции 10 с и вплоть до $19,5^m$ для 1000 с ($15,5^m$ и 18^m при использовании объективов "Canon" соответственно). В режиме узкого поля, при наблюдениях отдельных объектов, размер поля зрения уменьшается до 30 квадратных градусов (80 для "Canon"), а проникание зависит от выбора комбинации спектральных и поляризационных фильтров, варианты которых приведены в табл. 5. Кроме того, для ярких событий возможна реализация режима высокого временного разрешения в случае, если ПЗС-матрица поддерживает считывание в узком окне на повышенной кадровой частоте (например, для матрицы "Andor iXon^{EM}+888" возможна кадровая частота вплоть до 65 Гц в поле 128×128 без биннинга либо вплоть до 310 Гц с биннингом 8×8).

5.2. Система в целом

Полная система состоит из набора базовых блоков, установленных на отдельных экваториальных монтировках и работающих совместно. Их количество может быть

произвольным — чем больше, тем полнее покрытие небесной сферы и лучше проникание в узкопольном режиме.

Например, конфигурация из восьми базовых блоков покрывает 2100 квадратных градусов (5700 градусов при использовании объективов "Canon") на небе одновременно в широкопольном мониторинговом режиме, что позволяет проводить обзор всей доступной полусферы дважды за ночь, оставаясь на каждой площадке по полчаса. В узкопольном режиме при совмещении информации от всех 72 каналов проникание достигает от $17,2^m$ до $19,7^m$ для эффективных экспозиций от 0,1 с до 10 с (пределы при использовании объективов "Canon" равны $15,5^m$ и $18,2^m$ соответственно). Объём данных, получаемых за ночь такой системой, составляет около 40 терабайт, которые обрабатываются в реальном времени по мере поступления. Эффективность системы при наблюдениях объектов различного типа иллюстрирует рис. 11, на котором показаны возможности некоторых существующих и проектируемых широкопольных мониторинговых систем.

При стоимости объектива 2 тыс. евро, ПЗС-матрицы 45 тыс., одного компьютера 1 тыс. евро и монтажки 26 тыс. евро, стоимость базового блока составляет около 500 тыс. евро, тогда как конфигурации из восьми блоков — около 5 млн евро.

5.3. Прототип системы

В качестве прототипа многообъективной мониторинговой системы нами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований разрабатывается комплекс, состоящий из девяти объективов "Canon" с относительным отверстием 1/1,2 и фокусным расстоянием 85 мм, снабжённых набором спектральных и поляризационных фильтров, а также оснащённых электронно-оптическими преобразователями с арсенид-галлиевыми фотокатодами, имеющими квантовый выход около 30 % на длине волны 4500 Å. Электронно-оптические преобразователи эффективно укорачивают фокусное расстояние системы в два раза, а также позволяют подавить шумы считывания быстрых ПЗС-матриц "Sony" ICX285AL. В результате этого поле зрения отдельного канала оказывается около 100 квадратных градусов (900 градусов для всей системы) при проникании $B \approx 12,5^m$ за 0,1 с (предельная величина увеличивается вплоть до $B \approx 15^m$ при сложении 100 последовательных кадров, что соответствует эффективному временному разрешению 10 с). Сведение всех



Рис. 10. Возможные массово производимые комплектующие для проектируемой системы: (а) ПЗС-матрица с внутренним усилением "Andor iXon^{EM}+888" с форматом 1024×1024 пикселя размером 13 мкм каждый; (б) объектив "Canon" EF 85 f/1,2 L USM II, способный проецировать поле размером 9×9 градусов при масштабе 31"/пиксель на эту матрицу; (в) объектив "Marshall Electronics" 140 мм f/1,0, который даёт поле $5,4 \times 5,4$ градусов при масштабе 19"/пиксель.

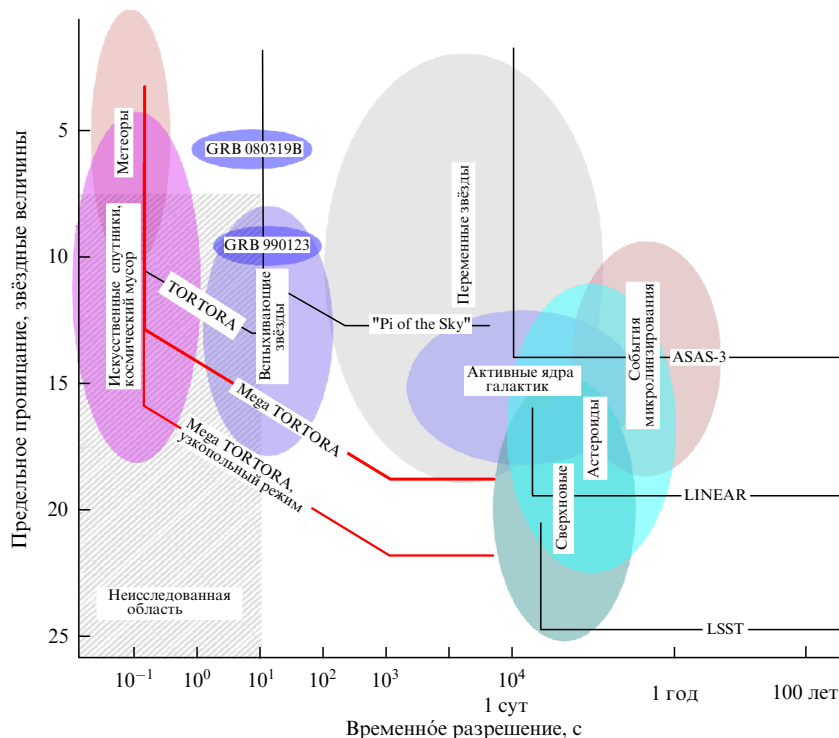


Рис. 11. Эффективность предлагаемой мониторинговой системы для наблюдений различных классов объектов в сравнении с таковой для других инструментов, как функционирующих в настоящее время (ASAS-3 (All Sky Automated Survey), LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research), "Pi of the Sky", FAVOR/TORTORA), так и планирующих на будущее (Большой обзорный телескоп — LSST (Large Synoptic Survey Telescope)).

каналов в одно поле позволяет получить предел $B \approx 13,5^m$ за 0,1 с и $B \approx 16^m$ за 10 с.

Система-прототип будет завершена и введена в строй в течение 2010–2011 гг.

6. Заключение

Обнаружение и детальное исследование оптического компаньона самого яркого на данный момент гамма-всплеска GRB080319B камерой TORTORA подчёркивает особую важность как проведения постоянного мониторинга больших областей небесной сферы, так и использования приёмников и методов высокого временного разрешения при поиске коротких оптических транзиентов неизвестной заранее локализации. Созданные нами в рамках общей стратегии подобных наблюдений камеры FAVOR и TORTORA продемонстрировали успешность этой стратегии, что позволяет и далее развивать такие исследования: следующим шагом может явиться предложенный проект широкопольной мониторинговой системы нового поколения.

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

Список литературы

1. Bondi H Q. *J. R. Astron. Soc.* **11** 443 (1970)
2. Schaefer B E et al. *Astron. J.* **90** 1363 (1985)
3. Schaefer B E et al. *Astron. Astrophys.* **174** 338 (1987)
4. Tamagawa T et al. *Nuovo Cimento C* **28** 771 (2005)
5. Borozdin K N et al. *Proc. SPIE* **4847** 344 (2002)
6. Castro-Tirado A J et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **138** 583 (1999)
7. Burd A et al. *New Astron.* **10** 409 (2005)
8. Шварцман В Ф и др. *Письма в Астрон. журн.* **14** 233 (1988) [Shvartsman V F et al. *Sov. Astron. Lett.* **14** 97 (1988)]
9. McBreen S et al. *Astron. Astrophys.* **380** L31 (2001)
10. Афанасьев В Л, Калениченко В В, Караченцев И Д *Астрофиз. бюлл.* **62** 319 (2007) [Afanasyev V L, Kalenichenko V V, Karachentsev I D *Astrophys. Bull.* **62** 301 (2007)]
11. Beskin G M et al. *Astron. Astrophys. Suppl.* **138** 589 (1999)
12. Eichler D, Beskin G *Astrobiology* **1** 489 (2001)
13. Zolotukhin I et al. *Astron. Nachrichten* **325** 675 (2004)
14. Karpov S et al. *Nuovo Cimento C* **28** 747 (2005)
15. Molinari E et al. *Nuovo Cimento B* **121** 1525 (2006)
16. Zerbi F M et al., in *Gamma-ray Bursts in the Afterglow Era* (ESO Astrophys. Symp., Eds E Costa, F Frontera, J Hjorth) (Berlin: Springer-Verlag, 2001) p. 434
17. Beskin G et al. *Nuovo Cimento C* **28** 751 (2005)
18. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7452) 1 (2008)
19. Racusin J L et al. *Nature* **455** 183 (2008)
20. Beskin G et al., arXiv:0905.4431
21. American department of defense satellite ephemerides database, <http://www.spacetrack.org/>
22. Bertin E, Arnouts S *Astron. Astrophys. Suppl.* **117** 393 (1996)
23. Høg E et al. *Astron. Astrophys.* **355** L27 (2000)
24. Barthelmy S D *AIP Conf. Proc.* **428** 129 (1998)
25. Guarneri A et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5372) 1 (2006)
26. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5897) 1 (2006)
27. Karpov S et al. *GRB Coordinates Network Circular* (5941) 1 (2006)
28. Racusin J L et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7427) 1 (2008)
29. Cwiok M et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7439) 1 (2008)
30. Wozniak P et al. *GRB Coordinates Network Circular* (7464) 1 (2008)
31. Kocevski D, Ryde F, Liang E *Astrophys. J.* **596** 389 (2003)
32. Margutti R et al. *AIP Conf. Proc.* **1065** 259 (2008)
33. Beskin G et al. *AIP Conf. Proc.* **1065** 251 (2008)
34. Piran T *Rev. Mod. Phys.* **76** 1143 (2005)
35. Li Z, Waxman E *Astrophys. J.* **674** L65 (2008)
36. Kumar P, Panaitescu A *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **391** L19 (2008)
37. Fan Y-Z, Piran T *Frontiers Phys. China* **3** 306 (2008)

38. Yu Y W, Wang X Y, Dai Z G *Astrophys. J.* **692** 1662 (2009)
39. Narayan R, Kumar P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **394** L117 (2009)
40. Zou Y-C, Piran T, Sari R *Astrophys. J. Lett.* **692** L92 (2009)
41. Fan Y-Z, Zhang B, Wei D-M *Phys. Rev. D* **79** 021301(R) (2009)
42. Derishev E V, Kocharovsky V V, Kocharovsky VI V *Astrophys. J.* **521** 640 (1999)
43. Pruet J, Woosley S E, Hoffman R D *Astrophys. J.* **586** 1254 (2003)
44. Jakobsson P et al. *New Astron.* **9** 435 (2004)
45. Bersier D et al. *Astrophys. J. Lett.* **584** L43 (2003)
46. Masada Y et al. *Astrophys. J.* **663** 437 (2007)
47. Woosley S E *Astrophys. J.* **405** 273 (1993)
48. Zhang W, Woosley S E, Heger A *Astrophys. J.* **608** 365 (2004)
49. Beskin G et al. *Bull. Special Astrophys. Observatory* **60–61** 217 (2007)

PACS numbers: **95.35. + d**, 98.62.Hr, **98.65. – r**
 DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004i.0434

Диски галактик и их эволюция

А.В. Засов, О.К. Сильченко

Рассматриваются ключевые проблемы, связанные с измерением масс звёздных дисков и тёмных гало в галактиках, а также с объяснением наблюдаемых свойств дисков, сформировавшихся в массивных тёмных гало.

Вращающиеся звёздно-газовые диски — это основные структурные элементы большинства наблюдаемых галактик. В них сосредоточено основное количество барионного вещества: звёзд и разреженной межзвёздной среды (в последней преобладает холодный газ). Диски обладают большим моментом импульса и вращаются так, что локальное значение угловой скорости уменьшается вдоль радиуса. При этом максимальная скорость вращения диска зависит от общей массы (светимости) галактики и обычно составляет $100–300 \text{ км с}^{-1}$, что соответствует периоду обращения в $200–300$ млн лет.

Диски галактик — неоднородные образования. Они содержат звёзды с различной массой и возрастом, причём самые молодые звёзды сосредоточены вблизи экваториальной плоскости диска: там, на дне потенциальной ямы, образуемой его гравитационным полем, скапливается межзвёздный газ. Но диски в целом — это старые образования, спектр их излучения указывает на доминирование звёзд с очень большим возрастом, превышающим 8 млрд лет. При этом наиболее старые звёзды образуют так называемый толстый диск, который в два-три раза толще основного, тонкого, звёздного диска, но масса толстого диска относительно невелика. Фактически формирование дисков в большинстве галактик ещё не завершено, поскольку в них (преимущественно в спиральных ветвях) и в настоящее время происходит образование звёзд из газа, но наблюдаемые темпы роста массы звёздного населения, за редкими исключениями, являются очень низкими, составляя $1–5$ масс Солнца в год на всю галактику типа нашей.

Происхождение галактик и механизм формирования дисков до сих пор остаются не очень понятными и активно обсуждаются в литературе. Сама форма дисков

однозначно указывает на то, что они образовались в результате эволюции диссипативной среды (газа), которая теряла энергию на излучение при сохранении момента импульса, а возраст дисков говорит о том, что они существовали уже в эпоху ранней молодости современных галактик и были охвачены в то далёкое время интенсивным процессом формирования звёздного населения. Дисковые галактики, часто содержащие обширные области звездообразования, издавна похожие на совокупность отдельных ярких пятен, действительно присутствуют в большом количестве среди галактик с красным смещением $z > 1$ — мы наблюдаем их в эпоху молодости.

В современных теориях образования галактик важную роль играет то обстоятельство, что формирование их звёзд происходило в гравитационном поле тёмной материи, или так называемой скрытой массы, которая в настоящее время должна образовывать массивное тёмное гало галактик, простирающееся далеко за пределы их видимой части. Как показали численные эксперименты, роль тёмного гало является определяющей не только в формировании диска из первоначально разреженного газа, но и в его последующей эволюции. Однако разделить массу наблюдаемой галактики на составляющие, принадлежащие газу, звёздам и тёмной материи, оказалось непростой задачей. Решить её для конкретных галактик удаётся благодаря совершенствованию методов измерения кинематических характеристик диска, с одной стороны, и моделей эволюции спектров излучения звёздных систем, с другой.

Научный бум, породивший целую лавину работ по скрытой массе внутри галактик, начался с появлением наблюдательных данных о скоростях вращения V галактических дисков на достаточно большом расстоянии R от центра, т.е. с получением достаточно длинных кривых вращения $V(R)$. В оптическом диапазоне для этого обычно используются либо классические дифракционные спектрографы с длинной щелью, либо сканирующие интерферометры Фабри–Перо в высоких порядках интерференции. Последние не имеют щели, и с их помощью можно оценивать доплеровский сдвиг спектральных линий сразу во многих тысячах точек по диску галактики, восстанавливая посредством довольно сложной математической обработки данных двумерное поле лучевых скоростей и получая из него кривую вращения. В России такие наблюдения проводятся на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН. Радионаблюдения в эмиссионных линиях атомарного водорода или молекул уступают оптическим по угловому разрешению, в то время как оптические наблюдения могут давать оценки скоростей как газа, так и звёзд, причём с высоким разрешением. Тем не менее в галактиках, богатых газом, радиокривые вращения прослеживаются значительно дальше оптических, иногда далеко за пределами видимых границ галактики, поскольку газовые диски часто бывают больше звёздных. Оказалось, что скорости вращения на больших расстояниях от центра галактики, как правило, не убывают, а выходят на почти плоский участок — плато — или даже возрастают с увеличением R .

Часто считают, что выход кривой вращения на плато является если не доказательством, то, по крайней мере, решающим аргументом в пользу существования в галактиках тёмного гало с массой, сопоставимой с массой видимого вещества или превосходящей её. На самом деле, это не совсем так, поскольку форма кривой

А.В. Засов, О.К. Сильченко. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, РФ
 E-mail: zasov@sai.msu.ru