

УДК 524.7

Наблюдение галактики Mrk 501 на гамма-телескопе ГТ-48 в 2009 году

К. С. Стригунов

НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Научный, АР Крым, Украина, 98409
sks6891@gmail.com

Поступила в редакцию 3 октября 2012 г.

Аннотация. При наблюдении на гамма-телескопе ГТ-48 в 2009 году от источника Mrk 501 был зарегистрирован поток гамма-квантов сверхвысоких энергий с высокой степенью достоверности ($Q > 4$). Эти данные сопоставлены с данными о рентгеновском излучении в диапазоне 2–10 кэВ, полученными на RXTE-ASM и с данными, полученными на Fermi (100 МэВ – 300 ГэВ). Отмечается отсутствие изменений со временем потоков в трех диапазонах энергий в пределах ошибок.

OBSERVATION OF THE GALAXY MRK 501 WITH THE GAMMA-TELESCOPE GT-48 IN 2009, by *K.S. Strigunov*. During the observations with the gamma-telescope GT-48 in 2009 very high energy gamma-quantum flux was registered with a high confidence level ($Q > 4$) from source Mrk 501. These data were compared with the data on X-ray radiation in the range 2–10 keV obtained with RXTE-ASM and data obtained with Fermi (100 MeV – 300 GeV). The absence of flux variations in three ranges is marked within the error limits.

Ключевые слова: активные ядра галактик, гамма-источники

1 Введение

Наблюдения источников гамма-излучения сверхвысоких энергий (СВЭ) в энергиях $E > 10^{11}$ эВ (Владимирский и др., 1991) уже продолжительное время дают возможность изучать механизмы генерации космических лучей. Гамма-кванты СВЭ регистрируются на поверхности Земли по черенковскому излучению, которое испускается вторичными электронами при взаимодействии гамма-квантов с ядрами атомов воздуха. Типичными представителями объектов, излучающих в данном диапазоне, являются активные ядра галактик (АЯГ) и наблюдения этих объектов проводятся порядка 20 лет. Так, от активного ядра галактики Mrk 501 ($z = 0.034$), которую относят к блазарам, впервые был зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ в 1995 году (Куинн и др., 1996). Позже, в 1997 г., группа HEGRA зарегистрировала резко возросший поток квантов, который превзошел свой спокойный уровень в десятки раз (Агаронян и др., 1997). В том же году проводились наблюдения данного объекта и в НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория” (НИИ “КрАО”), в результате которых был зарегистрирован поток гамма-квантов с достоверностью 11 стандартных отклонений (Андреева и др., 2000; Калекин и др., 1999).

В 2009 году наблюдения Mrk 501 в КрАО проводились с 15 мая по 28 июля. Представляет интерес провести сравнение тех результатов с данными, полученными в других диапазонах энергий

за аналогичный промежуток времени, в частности с данными прибора ASM спутника RXTE, на котором велась регистрация рентгеновского излучения от Mrk 501 в диапазоне 2–10 кэВ, а также с данными спутника Fermi в диапазоне 100 МэВ – 300 ГэВ.

2 Черенковский телескоп и данные наблюдений

Наблюдения галактики Mrk 501 (координаты на 2009 г. $\alpha = 16^h54^m11^s \delta = 39^\circ44'40''$) в НИИ “КрАО” проводились на гамма-телескопе ГТ-48. Подробное описание телескопа можно найти в (Владимирский и др., 1991). Наблюдения в 2009 году проводились методом слежения за объектом. Для этого сопоставлялись результаты наблюдений за источником (режим ON) с результатами наблюдений за фоном (режим OFF), т. е. сеанс наблюдения включал в себя наблюдение источника в течение 25 минут (длительность скана) и фона той же длительности. Наблюдения источника и фона проводились со сдвигом по времени относительно друг друга таким образом, чтобы они проводились при одних и тех же зенитных и азимутальных углах. Сеансы наблюдений, проходившие при плохой погоде, исключались из процесса обработки. Полученные данные прошли первичную обработку, в которую входило исключение событий при плохом ведении (отклонение оптической оси телескопа от заданного направления превышало 3 угловые минуты), корректировка амплитуд сигналов в каналах с учетом калибровочных коэффициентов и исключение вспышек с максимальной амплитудой во внешнем кольце светоприемников. Для дальнейшего анализа входит около 30 % от зарегистрированных событий (Нешпор и др., 2007). Более подробно информация о наблюдениях представлена в табл. 1.

Таблица 1. Наблюдения в 2009 году

Название объекта	Период		N_{ck}	Δt (мин)
	α	δ		
Mrk 501	$16^h54^m11^s$	$39^\circ44'40''$	15.05 ÷ 28.07	54

Здесь N_{ck} – число сканов, вошедших в обработку, Δt – длительность наблюдений источника, α – прямое восхождение, δ – склонение.

3 Анализ данных наблюдений

Главной проблемой, возникающей при обнаружении источников гамма-квантов СВЭ, является наличие фона космических лучей, частицы которых также приводят к возникновению черенковских вспышек в атмосфере Земли. Их достаточно трудно отличить от вспышек, инициированных гамма-квантами, однако и те, и другие характеризуются набором параметров, с помощью которых их можно отличить. Отбор проводился по координатно-независимым параметрам, характеризующих размеры, амплитуду и форму проекции вспышки, а также координатно-зависимым, связанным с ориентацией изображения вспышки относительно положения источника в поле зрения камеры (Владимирский и др., 1991). Граничные значения параметров отбора подбирались таким образом, чтобы получить оптимальное отношение сигнал/шум $Q = (N_S - N_B) / \sqrt{N_S + N_B}$, где N_S и N_B – количество гамма-подобных вспышек (событий) на источнике и фоне соответственно. Разность $N_S - N_B$ интерпретируется как число гамма-квантов, а $\sqrt{N_S + N_B} = \sigma$ – статистическая ошибка этого числа. Соотношение сигнал/шум = Q – является стандартным отклонением, то есть достоверностью обнаружения потока гамма-квантов от наблюдаемого объекта. С помощью упомянутых параметров был произведен отбор, в результате которого исключались вспышки, инициированные заряженной

компонентой космических лучей. Его результаты представлены в табл. 2, откуда видно, что от объекта Mrk 501 поток гамма-квантов сверхвысоких энергий был зарегистрирован с высокой степенью достоверности ($Q = 4.8$ стандартных отклонений).

Таблица 2. Результаты наблюдений

Источник	Число событий		Число событий после отбора		$N_\gamma \text{ мин}^{-1}$	Q
	Источник	Фон	Источник	Фон		
Mrk 501	16840	17255	128	62	0.048 ± 0.01	4.8

Многоканальные светоприемники позволяют определять область на небесной сфере, где расположен источник гамма-квантов (Андреева и др., 2000) и для этого применяют метод пробных источников (Акерлоф и др., 1991; Нешпор и др., 1994; Фомин и др., 1994). Для Mrk 501 были построены трехмерные изображения распределения числа отобранных гамма-подобных событий по полю зрения светоприемника, а также изофоты этого распределения. Представленное на рис. 1 трехмерное изображение было получено как разность трехмерных изображений источника и фона. На рис. 2 показаны его изофоты, из которых видно, что максимум распределения совпадает с координатами Mrk 501 (2009 год). На рис. 2 координаты (0.0; 0.0) по прямому восхождению и склонению соответствуют координатам Mrk 501 в 2009 году.

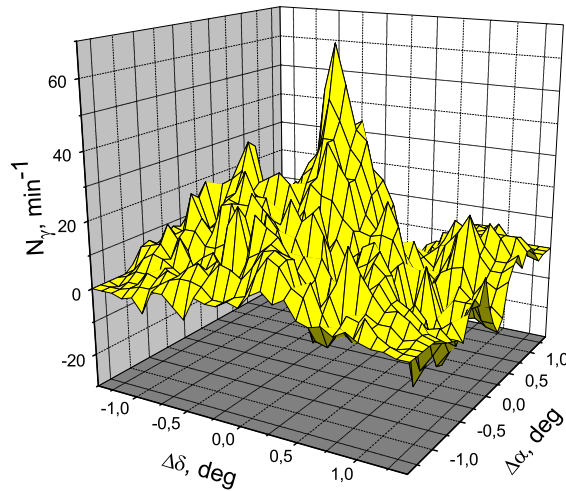


Рис. 1. Карта направлений вероятного прихода гамма-подобных событий. $\Delta\alpha$ – отклонение от координат источника по прямому восхождению, $\Delta\delta$ – по склонению. N_γ – число событий

4 Сравнение данных ГТ-48 с RXTE и Fermi

Представляет интерес сравнение потока для Mrk 501, полученного при наблюдениях в энергиях выше 1ТэВ на телескопе ГТ-48 с данными потока для этого же объекта в других диапазонах энергий.

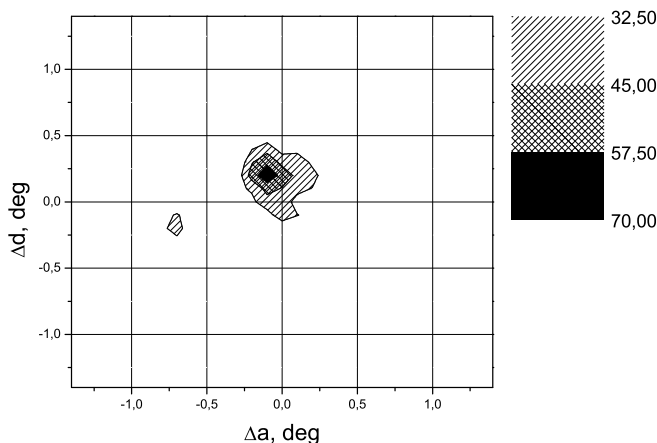


Рис. 2. Изофоты распределения направлений прихода гамма-квантов. Получены по карте рис. 1. $\Delta\alpha$ – отклонение от координат источника по прямому восхождению, $\Delta\delta$ – по склонению. Числа событий в правом верхнем углу

С этой целью проведено сравнение с данными орбитальной рентгеновской обсерватории RXTE (The Rossi X-ray Timing Explorer) и Космического гамма-телескопа Fermi (The Fermi Gamma-ray Space Telescope), которые были взяты из базы данных RXTE и Fermi через Интернет (“ASM/RXTE quick-look results”, http://xte.mit.edu/ASM_lc.html; Fermi 2009, http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/mssl_lc/).

Поскольку достоверность среднесуточных значений потока для Mrk 501 за период наблюдений в 2009 году на ГТ-48 и RXTE оказалась незначительной, то было принято решение провести сравнение потоков по трем лунациям, в течение которых наблюдался Mrk 501. Под лунацией имеется в виду период наблюдений в безлунные ночи в продолжение одного месяца. В случае, если за одни сутки проводилось более одного сеанса наблюдений, то значения потоков складывались с весом по формулам (1) и (2), в результате чего получались среднесуточные значения потоков с соответствующими им среднеквадратичными ошибками. Далее, таким же образом среднесуточные значения потоков складывались с весом для каждой лунации.

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}}, \quad (1)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}, \quad (2)$$

где n – число значений за i -й интервал времени, A_i – значение потока за i -й интервал времени, σ_i – среднеквадратичная ошибка значения потока за i -й интервал времени.

В результате получены значения потоков для каждой лунации с их среднеквадратичными ошибками. Аналогичная процедура была проделана и со значениями для данных RXTE (2–10 кэВ) и Fermi (100 МэВ – 300 ГэВ) за те же промежутки времени. В табл. 3 представлены все полученные результаты для трех диапазонов энергий.

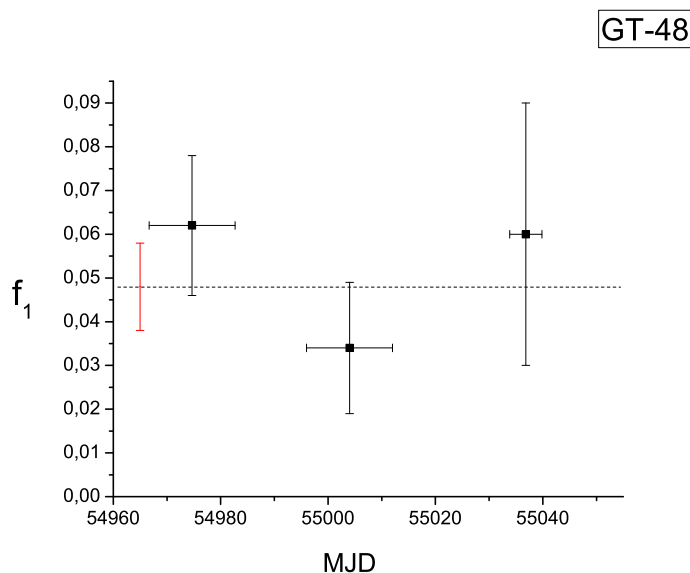
В таблице 3 f_1, f_2, f_3 – потоки, Q – достоверность, MJD – модифицированная юлианская дата.

Таблица 3. Усредненные потоки для трех лунаций

Лунации MJD	ГТ-48		RXTE		Fermi	
	f_1 $N_\gamma \text{ min}^{-1}$	Q	f_2 $N_x c^{-1}$	Q	f_3 $N_\gamma \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$	Q
54966-54983	0.062 ± 0.016	3.8	0.345 ± 0.056	6.2	4.408 ± 0.435	10.1
54996-55011	0.034 ± 0.015	2.3	0.194 ± 0.104	1.9	4.961 ± 0.345	14.4
55033-55040	0.06 ± 0.03	2.0	0.360 ± 0.086	4.2	4.438 ± 0.595	7.5

Таблица 4. Средние значения потоков и их ошибки

ГТ-48		RXTE		Fermi	
f_{c1} $N_\gamma \text{ min}^{-1}$	Q_1	f_{c2} $N_x c^{-1}$	Q_2	f_{c3} $N_\gamma \times 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$	Q_3
0.048 ± 0.01	4.8	0.325 ± 0.042	7.7	4.740 ± 0.244	19.4

**Рис. 3.** Потоки $f_1(N_\gamma \text{ мин}^{-1})$ и их ошибки по данным GT-48

В таблице 4 приведены средние потоки для трех телескопов. Величины Q_1, Q_2, Q_3 – достоверности средних потоков для каждого из трех диапазонов.

Используя полученные значения для потоков и их ошибок, были построены графики, на которых пунктирная линия показывает среднее значение потока за весь период наблюдений (рис. 3, 4 и 5).

Из табл. 3 видно, что величина потоков для данных телескопа Fermi определена с наибольшей достоверностью. На рис. 5 показано, что поток гамма-квантов в диапазоне 100 МэВ – 300 ГэВ за период наблюдений с 15 мая по 28 июля 2009 года в пределах ошибок постоянен. Данные для потока гамма-квантов СВЭ в энергиях свыше 1 ТэВ, полученные на телескопе GT-48 (рис. 3), имеют значительно меньшую достоверность, чем данные с Fermi (рис. 5), однако не противоречат выводу о постоянстве потока. Аналогично для данных рентгеновского спутника RXTE (рис. 4), где значения потоков по лунациям в диапазоне 2–10 кэВ, также имеют более низкую достоверность. Однако, как

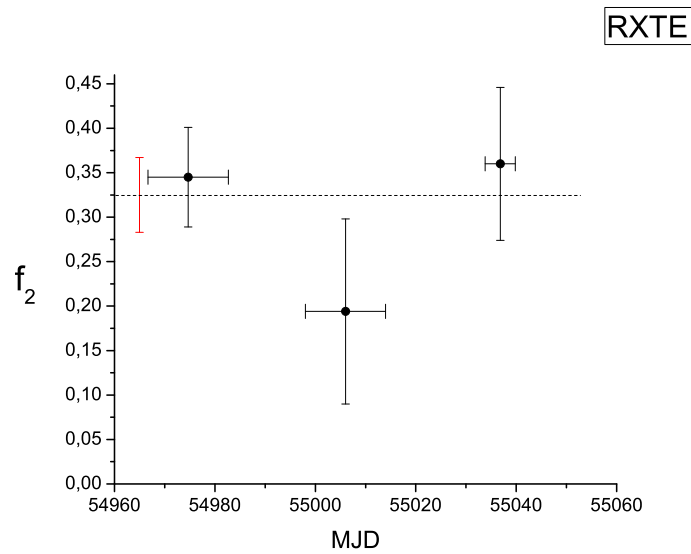


Рис. 4. Поток $f_2(N_x c^{-1})$ и их ошибки по данным RXTE

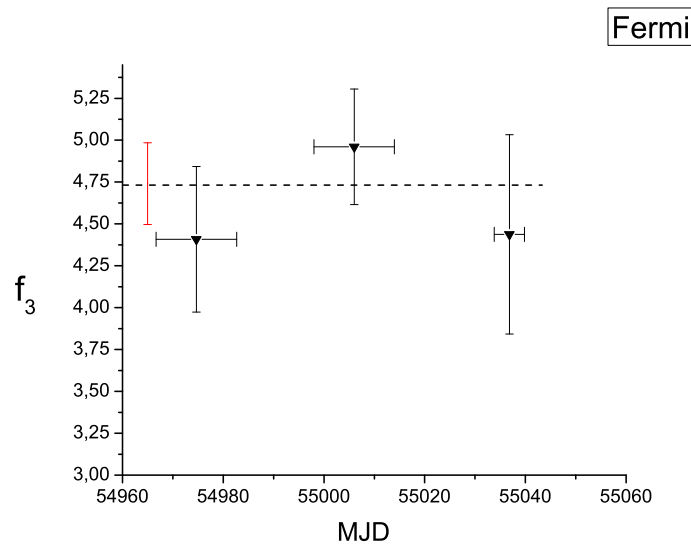


Рис. 5. Поток $f_3(N_\gamma \times 10^{-8} \text{cm}^{-2} \text{c}^{-1})$ и их ошибки по данным Fermi

и в случае с результатами ГТ-48, результаты RXTE не противоречат данным телескопа Fermi и поток в диапазоне 2–10 кэВ постоянен.

Также следует отметить, что блазар Mrk 501 наблюдался в 2009 году группой VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) в диапазоне СВЭ (> 300 ГэВ) между 17 марта и 22 июня, по результатам наблюдений которой было показано, что в ночь с 30 апреля на 1 мая в

указанном диапазоне наблюдалась вспышка, длившаяся несколько дней, когда поток гамма-квантов увеличился в 6 раз по сравнению со средним уровнем и составил $(1.80 \pm 0.25) \times 10^{-10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Хуан, Конопелько, 2009). Однако в дальнейшем, в период с 29 мая по 22 июня, объект Mrk 501 находился в относительно спокойном состоянии. Таким образом, можно сделать вывод о том, что результаты, полученные на ГТ-48, находятся в соответствии с данными VERITAS, где показывается спокойное состояние источника Mrk 501 в диапазоне гамма-квантов СВЭ.

Кроме того, используя формулы (1) и (2), был получен средний поток за четыре года (2006–2009 гг.) наблюдений объекта Mrk 501 на телескопе ГТ-48. Его величина составила $0.069 \pm 0.009 \text{ мин}^{-1}$ (достоверность 7.7 стандартных отклонений). Следовательно, поток гамма-квантов в энергиях выше 1 ТэВ, зарегистрированный на ГТ-48 в 2009 году от источника Mrk 501, оказался меньше, чем средний поток от него в период с 2006 по 2009 гг.

5 Заключение

Подводя итоги, можно сделать вывод о том, что активное ядро галактики Mrk 501 являлось источником гамма-квантов СВЭ в 2009 году с достоверностью на уровне 4.8 стандартных отклонений. С еще более высокой достоверностью потоки от источника Mrk 501 обнаружены телескопами RXTE и Fermi. Таким образом, был зарегистрирован поток в широком диапазоне энергий. Исходя из данных потоков ГТ-48, RXTE и Fermi по лунациям за период наблюдений с 15 мая по 28 июля во всех трех диапазонах значений вариаций потоков со временем в пределах ошибок не обнаружено. Также блазар Mrk 501 наблюдался в 2009 году и группой VERITAS, где была зарегистрирована вспышка, когда поток гамма-квантов увеличился в 6 раз по сравнению со своим средним уровнем, после которой объект Mrk 501 находился в относительно спокойном состоянии, что согласуется с данными наблюдений на ГТ-48. Также из полученных данных на ГТ-48 следует, что активность источника Mrk 501 в энергиях выше 1 ТэВ в 2009 году была меньше, чем в период 2006–2009 гг.

Автор выражает благодарность А.В. Жовтану, Ю.И. Нешпору, В.П. Фомину за важные советы, учтенные при написании статьи, а также Г.В. Нехай за помощь в оформлении статьи.

Литература

- Агаронян и др. (Aharonian F., Akhperjanian A.G., Barrio J.A., et al.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 327. L5.
- Акерлоф и др. (Akerlof C.W., Cawley M.F., Chantell M., et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1991. V. 377. L97.
- Андреева Н.А., Зыскин Ю.Л., Калекин О.Р., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Чаленко Н.Н., Шитов В.Г. // *Письма в Астрон. журн.* 2000. Т. 26. № 4. С. 243.
- Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.П., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Шитов В.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1994. Т. 91. С. 74.
- Калекин О.Р., Чаленко Н.Н., Зыскин Ю.Л., Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Фомин В.П., Шитов В.Г. // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* 1999. Т. 63. С. 606.
- Куинн и др. (Quinn J., Akerlof C.W., Biller S. et al.) // *Astrophys. Lett.* 1996. V. 465. L83.
- Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kornienko A.P., Stepanian A.A., Zyskin Yu.L.) // *Exp. Astron.* 1994. V. 5. P. 405.
- Нешпор Ю.И., Елисеев В.С., Жоголев Н.А., Нехай Е.М., Скирута З.Н., Фиделис В.В., Фомин В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2007. Т. 103. № 1. С. 27.
- Фомин и др. (Fomin V.P., Fennell S., Lamb R.C. et al.) // *Astropart. Phys.* 1994. V. 2. P. 151.
- Хуан, Конопелько (Dongqing Huang, Alexander Konopelko) // *Fermi Symposium.* 2009. Washington, D.C. Nov. 2–5.
- RXTE 2009. “ASM/RXTE quick-look results”. http://xte.mit.edu/ASM_lc.html
- Fermi 2009. http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/