

УДК 524.7

Галактика BL Lac – переменный источник гамма-квантов сверхвысоких энергий

*Ю.И. Нешпор, А.А. Степанян, В.С. Елисеев, Н.А. Жоголев, О.Р. Калекин, Е.М. Нехай,
З.Н. Скирута, В.В. Фиделис, В.П. Фомин, В.Г. Шитов*

Крымская астрофизическая обсерватория, 98409, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 4 мая 2003 г.

Аннотация. Наблюдения активного галактического ядра BL Lac проводились на наземном черенковском детекторе КрАО в 2000 году с 28 июля по 17 октября и в 2002 году с 8 июля по 4 декабря. Детектор предназначен для поиска и исследований потоков гамма-квантов сверхвысокой энергии (СВЭ, $E > 1$ ТэВ). В результате анализа данных наблюдений 2000 и 2002 годов делается заключение, что от блазара BL Lac зарегистрировано гамма-излучение СВЭ. Мы также считаем, что имеются указания на положительную корреляцию между потоком гамма-излучения СВЭ и яркостью в оптическом диапазоне.

BL Lac GALACTIC-VARIABLE SOURCE OF ULTRAHIGH – ENERGY GAMMA-RAYS. *by Yu.I. Neshpor, A.A. Stepanian, V.S. Eliseev, N.A. Jogolev, O.R. Kalekin, E.M. Nehay, Z.N. Skiruta, V.V. Fidelis, V.P. Fomin and V.G. Shitov.* Observations of active galactic nuclei BL Lac by ground based Cherenkov telescope have been conducted in 2000 from July 28 to October 17 and in 2002 from July 8 to December 4. The detector is assigned for search and study of ultrahigh-energy gamma-ray fluxes. In the result of analysis of 2000 and 2002 observation data it was concluded that from BL Lac blazar was detected ultrahigh-energy gamma-ray emission. We also consider that there are keys on positive correlation between ultrahigh-energy gamma-ray flux and luminosity in optical band.

Ключевые слова: активные ядра галактик, гамма-кванты, квазары, радиогалактики

1 Введение

Наблюдения на спутнике GRO-COMPTON (Томпсон и др., 1995) показали, что очень многие источники гамма-квантов высоких энергий (ВЭ) – это активные ядра галактик (АЯГ), в основном, объекты типа квазаров и лацертид. Эти галактики начали наблюдать и на наземных детекторах гамма-квантов, которые регистрируют кванты с энергией $10^{11} - 10^{12}$ эВ. Две из них впоследствии были зарегистрированы как источники гамма-квантов сверхвысоких энергий с помощью 10-метрового наземного детектора черенковских вспышек в обсерватории Уиппла в США. Это активные ядра галактик Мк 421 и Мк 501 (Куин и др., 1996). В Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) поток гамма-квантов был обнаружен от блазара 3С 66А (Нешпор и др. 1998, 2000; Степанян и др., 2002), также относящегося к особому классу АЯГ – лацертидам. Объект BL Lac является прототипом немногочисленной группы галактик с активными нестационарными ядрами - лацертид.

Основной признак лацертид – переменность блеска, достигающая в оптическом диапазоне $4^m - 5^m$ (изменение светимости до 100 раз). Вокруг лацертид имеются туманные оболочки. Все лацертиды обладают заметным радиоизлучением, как правило переменным. Для лацертид характерен чисто непрерывный спектр без эмиссионных линий. Степенной характер спектра и сильная поляризация излучения, достигающая 30 – 40 %, позволяет предположить, что это синхротронное излучение. Характерное время переменности излучения, составляющее недели и месяцы, позволяет оценить размер излучающей области лацертид: их поперечник равен 10^{16} см. Красное смещение VL Lас составляет 0.07, что соответствует расстоянию 280 Мпк. Характер процессов, протекающих в этих галактиках дает основание предполагать, что в них происходит ускорение высокоэнергетичных частиц, что может привести к излучению потоков гамма-квантов сверхвысоких энергий (СВЭ, $E > 10^{11}$ эВ).

Галактика VL Lас наблюдалась с помощью наземных детекторов гамма-квантов СВЭ ещё в 70-х годах в обсерватории Уиппла в США (Фазио и др., 1972) и в КраО (Степанян и др., 1975). Был получен верхний предел для потока $S < 1.1 \cdot 10^{-10}$ квантов $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ для энергетического порога $E = 2.2 \cdot 10^{12}$ эВ. Американская группа физиков (Фазио и др., 1972) для энергии $E > 2.5 \cdot 10^{11}$ эВ по наблюдениям 1971 года также определила верхний предел потока $S < 1.2 \cdot 10^{-10}$ квантов $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В 1998 году в КраО исследования галактики VL Lас были возобновлены с использованием нового гамма-телескопа второго поколения ГТ-48 (Владимирский и др., 1994; Нешпор и др., 1998). Наблюдения объекта VL Lас были проведены на наземном черенковском детекторе КраО в 1998 году с 23 июля по 1 сентября. Объект находился в поле зрения детектора более 24 часов. Поток гамма-квантов зарегистрирован с высоким уровнем достоверности (7.2σ) и равен $(2.1 \pm 0.4) \cdot 10^{-11}$ квантов $\cdot \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$. (Нешпор и др., 2001) Наблюдения объекта VL Lас были продолжены в 2000 и 2002 годах, результаты наблюдений представлены ниже.

2 Наблюдения и обработка данных

Наблюдения объекта VL Lас в 2000 и 2002 гг. проводились на гамма-телескопе второго поколения, ГТ-48. Подробное описание установки можно найти в (Владимирский и др., 1994; Нешпор и др., 1998). Гамма-телескоп с многоканальной камерой (телескоп второго поколения) ГТ-48 начал работать в 1989 году. Установка состоит из двух альт-азимутальных монтировок (секций) – северной и южной, расположенных на расстоянии 20 м на высоте 600 метров над уровнем моря. Общая площадь зеркал на обеих монтировках составляет 54 кв. м. Эффективная пороговая энергия регистрации гамма-квантов – 1.0 ТэВ.

Наблюдения объекта VL Lас (координаты на 2000 год: $\alpha = 22^h 02^m 43^s$ и $\delta = 42^\circ 16' 40''$) были проведены в 2000 году в продолжении 31 безлунной ночи в период с 28 июля по 20 ноября и в 2002 году в течение 15 безлунных ночей в период с 8 июля по 4 декабря. Наблюдения велись в режиме источник-фон, т.е. сеанс наблюдения включал в себя наблюдение источника в течение 35 минут, когда объект находился в центре поля зрения приемной камеры телескопа, и фона той же длительности, смещенного по прямому восхождению на 40 минут с тем, чтобы его наблюдение проходило при тех же зенитных и азимутальных углах, что и источника. В 2000 году было проведено 59 сеансов, 21 сеанс из них был исключен из дальнейшей обработки ввиду низкой скорости счета событий или сильной ее неравномерности на источнике или фоне, вызванных плохими погодными условиями, а также некачественного ведения телескопа. В 2002 году было проведено 24 сеанса, 7 сеансов из них были исключены из дальнейшей обработки по тем же причинам. Общая продолжительность наблюдений источника за два года составила 32 ч 5 мин. Полученные данные подвергались первичной обработке:

1. отбрасывались события, во время регистрации которых были замечены сбои в работе системы ведения телескопа (т.е. отклонение оптической оси телескопа от заданного направления превышало 3 угловых минуты);
2. отбрасывались данные, в которых хотя бы в одном канале (ячейке светоприемника) достигалось насыщение преобразователя аналог-код (255 единиц дискрета – 180 фотоэлектронов);

3. корректировались амплитуды сигналов в каналах с учетом калибровочных коэффициентов;
4. отбрасывались вспышки, максимальная амплитуда которых находилась во внешнем кольце ячеек светоприемника;
5. вычислялись первые и вторые моменты распределения яркости, из которых находились параметры изображения черенковской вспышки. Исследование показало, что параметры вспышек малой энергии сильно искажаются. Для гамма-телескопа ГТ-48 считалось, что вспышки малой энергии – это вспышки, амплитуда которых меньше 100 единиц дискрета (т.е. 70 фотоэлектронов), поэтому такие вспышки исключались из рассмотрения. В результате такой первичной обработки для дальнейшего анализа осталось 27820 событий для источника и 27424 событий для фона из наблюдений 2000 года и 7714 событий для источника и 7831 событий для фона – 2002 год (см. таблицу 1).

Для определения возможного потока гамма-квантов необходимо произвести их отбор путем исключения вспышек, вызванных заряженной компонентой космических лучей. Параметры гамма-квантов сверхвысоких энергий мало отличаются от параметров вспышек, вызванных заряженными частицами космических лучей. Тем не менее, используя эти различия и исключив вспышки, преимущественно вызванные космическими лучами, можно существенно уменьшить ошибку разности числа событий, полученных при наблюдениях источника и фона. При этом были использованы координатно-независимые и координатно-зависимые параметры отбора (Нешпор и др., 2002). Результаты такого отбора представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество зарегистрированных и отобранных событий

Методика отбора	Число событий на источнике	Число событий на фоне	Разность	Стандартное отклонение	Год
Без отбора	27820	27424	396	1.68	2000
Отбор по коорд. незав.	604	490	114	3.45	
Отбор по коорд. зав.	299	201	98	4.38	
Без отбора	7714	7831	-117	-0.94	2002
Отбор по коорд. незав.	190	119	71	4.04	
Отбор по коорд. зав.	85	39	46	4.13	

Таким образом, в результате процедуры в 2000 году за весь период наблюдений зарегистрировано 98 ± 22.4 гамма-квантов СВЭ, а в 2002 году 46 ± 11.1 . Средняя скорость счета зарегистрированных гамма-квантов соответственно равна $(0.074 \pm 0.017)_{\text{мин}}^{-1}$ в 2000 году и $(0.077 \pm 0.019)_{\text{мин}}^{-1}$ в 2002 году. Такая скорость счета обеспечивается потоком гамма-квантов с энергией > 1.0 ТэВ равным $(1.7 \pm 0.6) \cdot 10^{-11}$ квантов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в 2000 году и величиной потока $(1.8 \pm 0.6) \cdot 10^{-11}$ квантов $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в 2002 году.

Для определения направления потока гамма-излучения применяется метод пробных источников (Акерлов и др., 1991; Нешпор и др., 1994; Фомин и др., 1994). Метод основан на том, что большие оси эллипсов изображений вспышек от гамма-квантов ориентированы в фокальной плоскости телескопа на источник, а большие оси эллипсов изображений р-ливней (ливни от заряженных частиц) ориентированы в первом приближении равномерно по всем направлениям. Поэтому, если проводить отбор вспышек по координатно-зависимым параметрам, то число оставшихся р-ливней не будет зависеть от положения предполагаемого источника. Число же изображений от гамма-ливней будет существенно зависеть от положения предполагаемого источника и будет иметь максимум в

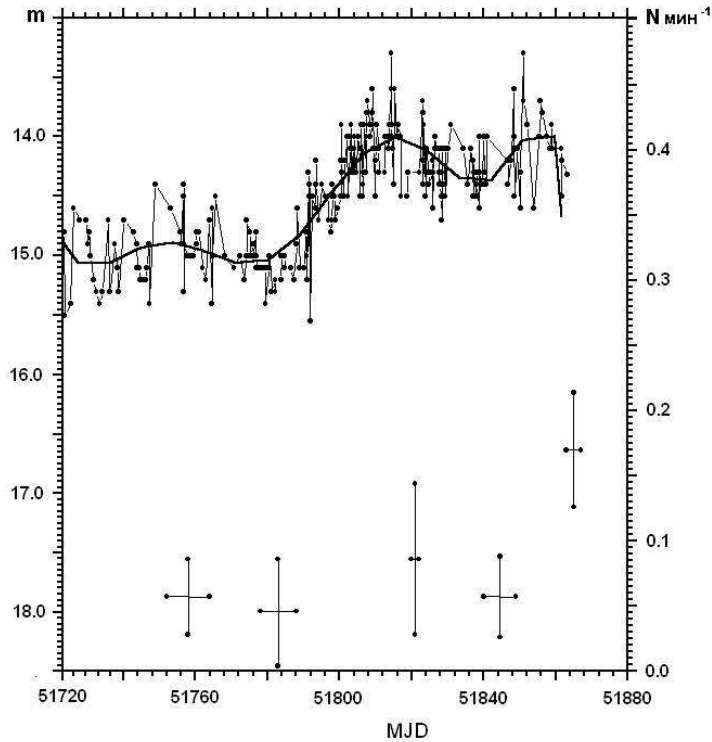


Рис. 1. Яркость объекта BL Lac в оптическом диапазоне и средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ за лунацию в зависимости от времени (2000 год). Левая шкала ординат звездная величина m . Правая шкала ординат средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ $N \text{ мин}^{-1}$ за одну лунацию

направлении на истинный источник. В нашем случае направление на источник совпадало с центром камеры. Направления потоков гамма-квантов СВЭ, определенные по данным 2000 года и по данным 2002 года, в пределах точности метода пробных источников, совпадают между собой. Это направление совпадает с координатами объекта BL Lac.

3 Корреляция потоков гамма-квантов СВЭ и оптического излучения блазаров

Как уже указывалось во введении, у блазара 3C 66A отношение потока энергии в гамма-квантах СВЭ к потоку энергии в оптической области близко к единице в предположении изотропности излучений. То же самое имеет место и для блазара BL Lac, где это отношение равно 0.5. (Степанян и др., 2002) на основе данных четырехлетних наблюдений блазара 3C 66A обнаружили корреляцию потока гамма-квантов СВЭ с потоком в оптическом излучении на больших временных масштабах порядка месяца и коэффициент корреляции составил $r = 0.7 \pm 0.2$

В данной работе мы рассмотрели корреляцию в более мелких временных масштабах, порядка дней, для блазара BL Lac по данным наблюдений 2000 и 2002 годов. Данные об оптическом излучении были нам любезно предоставлены доктором Таичи Като (Taichi Kato) из Мирового Центра по сбору данных о переменных звездах.

На рис. 1 и 2 представлены визуальные измерения яркости объекта BL Lac в оптическом диапазоне и средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ за лунацию (период наблюдений в безлунную ночь) в зависимости от времени. Левая шкала ординат – звездная величина m . Правая шкала

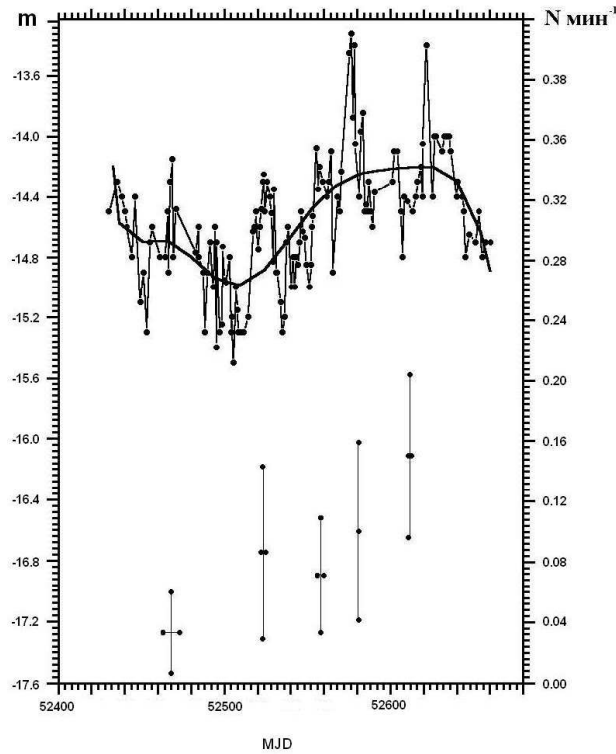


Рис. 2. Яркость объекта BL Lac в оптическом диапазоне и средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ за лунацию в зависимости от времени (2002 год). Левая шкала ординат звездная величина m . Правая шкала ординат средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ $N \text{ мин}^{-1}$ за одну лунацию

ординат – средняя скорость счета гамма-квантов СВЭ $N \text{ мин}^{-1}$ за одну лунацию. Визуальные измерения оптической яркости объекта BL Lac были аппроксимированы полиномом 8-ой степени. По аппроксимированным данным были найдены средние значения оптической яркости для интервала времени каждой лунации. Затем был определен коэффициент корреляции r между средним значением оптической яркости и средним значением скорости счета гамма-квантов. Для данных 2000 года коэффициент корреляции составил $r = 0.68 \pm 0.16$, для данных 2002 года $r = 0.66 \pm 0.15$. Безусловно, коэффициент корреляции не очень высокий, но тем не менее указывает на положительную корреляцию между потоком в гамма-излучении СВЭ и оптическим излучением в видимой области.

Отметим также, что среднее значение оптической яркости за интервал наблюдений на ГТ-48 в 2000 году имеет величину $m = 14.45$ и за тот же интервал времени число гамма-квантов в минуту $N\gamma = (0.074 \pm 0.017) \text{ мин}^{-1}$, для 2002 года соответственно имеем $m=14.48$ и $N\gamma = (0.077 \pm 0.019) \text{ мин}^{-1}$. Из этого видно, что одному и тому же среднему значению оптической яркости объекта BL Lac соответствует одно и то же число гамма-квантов СВЭ, зарегистрированных за одну минуту. Это также подтверждает, что между потоком гамма-излучения СВЭ и оптическим излучением блазара BL Lac существует положительная связь.

4 Заключение

В заключение отметим, что в наблюдательные сезоны 2000 и 2002 годов нами зарегистрирован поток гамма-квантов СВЭ с достоверностью более 4 стандартных отклонений. Имеются указания на положительную корреляцию между потоком гамма-излучения СВЭ и оптическим излучением.

Положительная корреляция между потоком гамма-квантов СВЭ и оптическим излучением блазаров 3C 66A и VL Lac даёт основание предполагать, что источником обоих видов излучения являются одни и те же частицы- электроны высоких и сверхвысоких энергий. Отсюда становится понятно, почему при повышении яркости источника в оптическом диапазоне повышается вероятность обнаружения потока гамма-квантов СВЭ от них.

Авторы выражают особую признательность Таичи Като (Taichi Kato), сотруднику Мирового центра по сбору данных о переменных звездах за представленные данные оптических измерений яркости блазара VL Lac. Авторы благодарят С.Г. Кочеткову за помощь в обработке материала и подготовке статьи. Работа выполнена с поддержкой американского гранта CRDF (UP1-2431-NA-02).

Литература

- Акерлов и др. (Akerlof C.W., Cawley M.F., Chantell M. et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1991. V. 377. L. 97.
- Блум и др. (Bloom S.D., Bertsch D.L., Hartman R.C. et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1997. V. 490. L. 145.
- Владимирский Б.М., Зыскин Ю.Л., Корниенко А.А. и др. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсер.* 1994. Т. 91. С. 74.
- Куин и др. (Quinn J., Akerlof C.W., Biller S. et al.) // *Astrophys. J. Lett.* 1996. V. 456. N. 2. L. 83.
- Нешпор и др. (Neshpor Yu.I., Kornienko A.P., Stepanian A.A., Yu.L. Zyskin) // *Experimental Astronomy.* 1994. V. 5. P. 405.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.Р. и др. // *Письма в Астрон. журн.* 1998. Т. 24. С. 167.
- Нешпор Ю.И., Степанян А.А., Калекин О.Р. и др. // *Астрон. журн.* 2000. Т. 77. С. 723.
- Нешпор Ю.И., Чаленко Н.Н., Степанян А.А., и др. // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78. С. 291.
- Степанян А.А., Нешпор Ю.И., Калекин О.Р., и др. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. С. 702.
- Степанян А.А., Владимирский Б.М., Нешпор Ю. И., Фомин В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1975. Т. 53. С. 29.
- Томпсон и др. (Thompson D.J., Bertsch D.L., Dingus B.L. et al.) // *Astrophys.J.Suppl.ser.* 1995. V. 101. P. 259.
- Фазио и др. (Fazio G.G., Helmken H.F., O'Mongain E.O., Weekes T.C.) // *Astrophys.J. Lett.* 1972. 175. L. 117.
- Фомин и др. (Vomin V.P, Fennell S., Lamb R.C., et al.) // *Astroparticle Physics* 1994. V. 2. P. 151.