

ОБЪЕКТ TeV J2032+4130 ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

В. Г. Синицина¹, В. Ю. Синицина¹, К. А. Балыгин^{1,2}, С. С. Борисов¹,
И. А. Иванов¹, А. М. Кириченко^{1,2}, А. И. Климов^{1,2}, И. П. Кожухова¹,
Р. М. Мирзафатихов¹, Н. И. Мосейко^{1,2}, И. Е. Осташев^{1,2}

Область Cygnus-X включает в себя большое количество источников, генерирующих излучение в широком диапазоне энергий, таких как области активного звездообразования, пульсары и остатки сверхновых. Ряд объектов были обнаружены при высоких и сверхвысоких энергиях. Один из них – TeV J2032+4130, открытый из-за своей близости к известному микроквазару Cyg X-3, является объектом неустановленной природы и активно исследуется при разных энергиях. Представлены результаты двадцатилетних наблюдений объекта – TeV J2032+4130 в эксперименте ШАЛОН. Полученные данные о потоках, форме спектра и морфологии TeV J2032+4130 в дальнейшем помогут установить тип данного объекта и пролить свет на природу источника.

Ключевые слова: область Cygnus-X, излучение сверхвысоких энергий, объект TeV J2032+4130.

Введение. Область Cygnus-X одна из ярчайших областей во всех диапазонах электромагнитного спектра и содержит ряд потенциальных источников ГэВ-го и ТэВ-го излучения. Объекты, связанные с этой областью, включают в себя ассоциацию Лебедь OB2, микроквазар Cyg X-3, остаток сверхновой γ Cygni SNR и TeV J2032+4130. Некоторые из перечисленных объектов были обнаружены при высоких энергиях телескопом

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sinits@sci.lebedev.ru.

² Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, 1.

Fermi LAT [1–3] и ранее телескопом EGRET [4, 5], а также при сверхвысоких энергиях установкой MILAGRO [6] и черенковскими телескопами Whipple [7], HEGRA [8], ШАЛОН [9–11], VERITAS [12] и MAGIC[13].

TeV J2032+4130 был обнаружен в наблюдениях 1999–2001 гг. телескопом HEGRA [8] при энергиях > 1 ТэВ и стал первым источником ТэВ-го излучения, не совпадающим с каким-либо ярким объектом, видимым при других энергиях, а также стал первым протяженным источником излучения сверхвысоких энергий.

На телескопе ШАЛОН впервые получены характеристики источника TeV J2032+4130 в широком диапазоне энергий от 1 до 50 ТэВ. Представленные здесь данные об объекте TeV J2032+4130 являются результатом двадцатилетних исследований области Cygnus-X в эксперименте ШАЛОН.

TeV J2032+4130. В рамках долгосрочных исследований излучения микроквара Cyg X-3 [9–11] при сверхвысоких энергиях, на высокогорных зеркальных черенковских телескопах ШАЛОН проведены наблюдения области Cygnus-X и принадлежащих ей объектов, включающих TeV J2032+4130.

TeV J2032+4130 находится в поле зрения телескопа ШАЛОН на расстоянии $\sim 0.5^\circ$ на север от Cyg X-3. Таким образом, благодаря большому полю зрения телескопа ШАЛОН

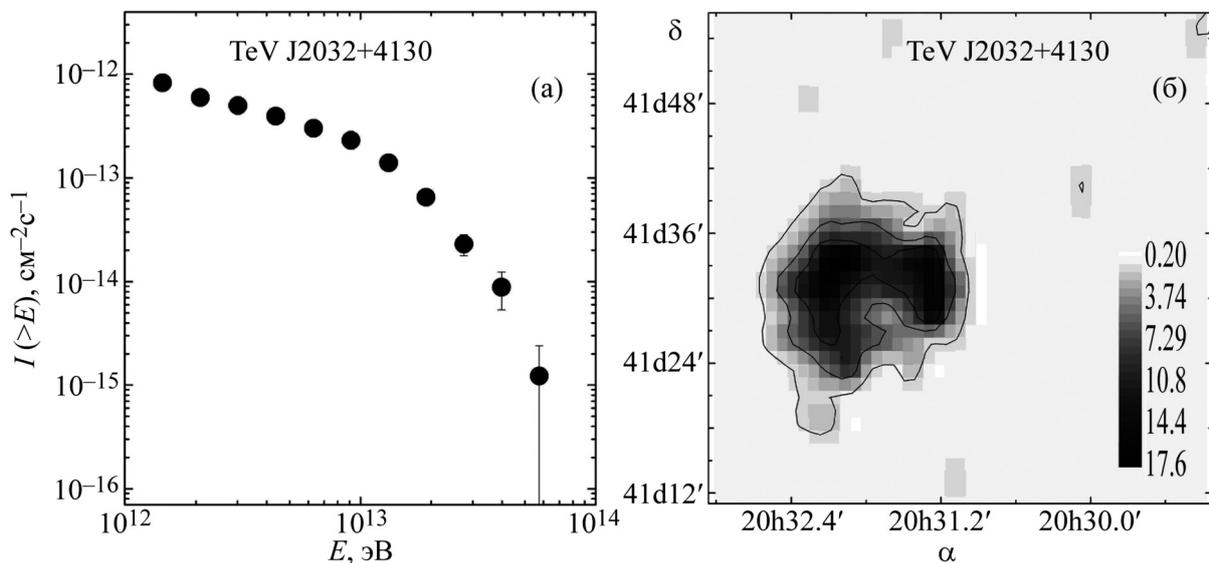


Рис. 1: Характеристики источника TeV J2032+4130: (а) интегральный спектр γ -квантов в области энергий 1–50 ТэВ; (б) изображение TeV J2032+4130 по данным телескопа ШАЛОН в области энергий > 0.8 ТэВ.

(> 8°), наблюдения Суг Х-3 автоматически сопровождаются наблюдениями объекта TeV J2032+4130.

В результате, как источник, сопровождающий Суг Х-3, объект TeV J2032+4130 систематически наблюдается телескопом ШАЛОН (с 1995 г. по настоящее время) в ясные безлунные ночи под зенитными углами от 5 до 34 градусов. Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных γ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений [14–16]. При обработке данных наблюдений TeV J2032+4130 был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне 31σ , определяемом по Li&Ma [17]. Среднее значение интегрального потока при энергиях больше $E = 0.8$ ТэВ для TeV J2032+4130 составляет $I_{TeVJ2032+4130}(> E) = (0.84 \pm 0.05) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (рис. 1(а)). При обработке данных наблюдений Суг Х-3 по критериям отбора относительно самого Суг Х-3 и с привязкой к TeV J2032+4130, количество γ -ливней, общих для первого и второго источника, составило 8.1%. Распознавание принадлежности общих ливней к каждому из перечисленных источников произведено по определению углового расстояния между направлением прихода ливня и координатами источника. В результате количество γ -ливней от Суг Х-3 уменьшилось на $\sim 4\%$, что не меняет зарегистрированную величину потока гамма-излучения от источника Суг Х-3.

При двадцатилетних наблюдениях TeV J2032+4130 телескопом ШАЛОН была обнаружена вариация потока излучения с энергиями > 0.8 ТэВ. Значение среднего интегрального потока при энергиях > 1 ТэВ в периоды наблюдений 1995–1998 гг.; 2003–2006 гг.; 2013–2015 гг. составило $(1.01 \pm 0.15) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$; в 1998 г., 2001 г., 2002 г., 2010 г. и 2016 г. $(0.58 \pm 0.12) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$; а в 1999, 2000, 2011 и 2012 годах был зарегистрирован низкий поток $(0.12 \pm 0.09) \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Энергетический спектр γ -квантов объекта TeV J2032+4130 в диапазоне энергий от 0.8 до 50 ТэВ по данным телескопа ШАЛОН представлен на рис. 1(а). При энергиях 0.8–15 ТэВ интегральный спектр TeV J2032+4130 описывается степенным законом $I(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) \propto E^k$, где $k = -0.73 \pm 0.10$ (см. рис. 1(а)). Также на рис. 1(б) представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН. Анализ направлений прихода γ -ливней показал, что излучение приходит из широкой области размером $\sim 10'$, которая совпадает с данными экспериментов HEGRA [8], VERITAS [12] и MAGIC [13], приведёнными в литературе.

В области сверхвысоких энергий данные об энергетическом спектре TeV J2032+4130 были получены в разные годы на наземных телескопах HEGRA[8], VERITAS [12] и

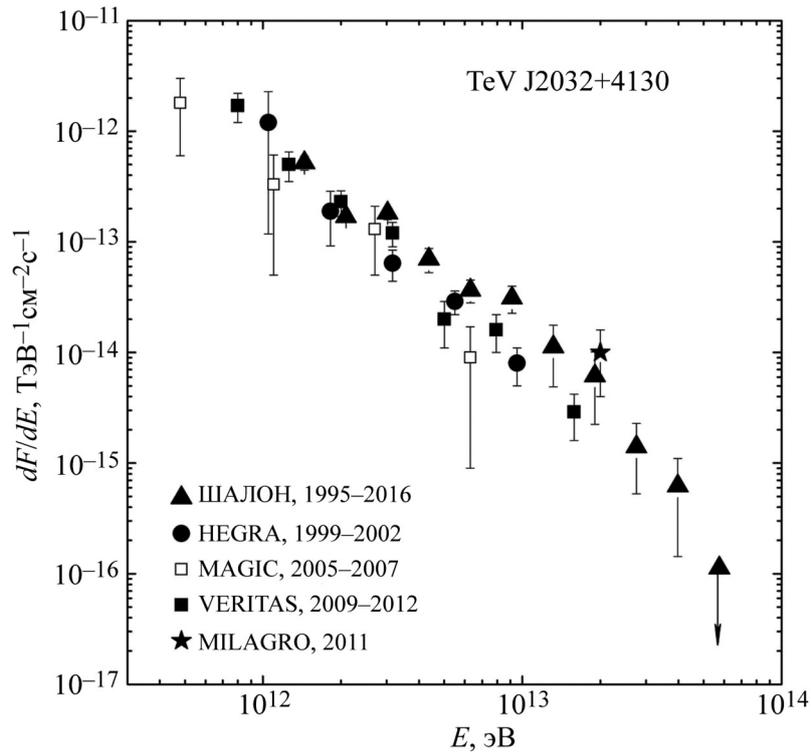


Рис. 2: (а) Дифференциальный спектр источника TeV J2032+4130 по данным телескопа ШАЛОН(▲) в сравнении с результатами экспериментов HEGRA, VERITAS, MAGIC и MILAGRO (см. текст).

MAGIC [13] и на установке MILAGRO [6]. На рис. 2 представлено сравнение дифференциальных спектров TeV J2032+4130 по данным телескопов ШАЛОН (1995–2016 гг.), VERITAS (2009–2012 гг.), MAGIC (2005–2007 гг.) и данные MILAGRO (2011 г.).

В эксперименте VERITAS дифференциальный спектр определён в диапазоне энергий 700 ГэВ–16 ТэВ и описывается степенным законом $dN/dE = C \cdot (E/1\text{TeV})^{-\Gamma}$ с показателем $\Gamma = 2.1 \pm 0.14\text{stat} \pm 0.21\text{sys}$ и $C = (9.5 \pm 1.6\text{stat} \pm 2.2\text{sys}) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ и $\chi^2 = 0.9$ по 5 степеням свободы.

Дифференциальный спектр по данным телескопа MAGIC описывается степенным законом с величиной $\chi^2/\text{Dof} = 0.3$ и может быть представлен в форме $dN/dE = (4.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} \cdot (E/1\text{TeV})^{-2.0 \pm 0.3}$.

Спектр TeV J2032+4130 в диапазоне энергий 1–10 ТэВ был получен телескопом HEGRA в наблюдениях 1999–2002 годов $dN/dE = C \cdot (E/1\text{TeV})^{-\Gamma}$ с параметрами дифференциального спектра $C = (6.2 \pm 1.5\text{stat} \pm 1.3\text{sys}) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ и $\Gamma = 1.9 \pm 0.1\text{stat} \pm 0.3\text{sys}$.

Форма дифференциального спектра, полученного в эксперименте ШАЛОН в диапазоне энергий от 0.8 до 35 ТэВ, описывается жёстким степенным законом с экспоненциальным обрезанием (см. рис. 2, ▲) $dN/dE = (7.1 \pm 1.1) \cdot 10^{-13} \times (E_\gamma/1 \text{ ТэВ})^{-1.50 \pm 0.11} \exp(-E_\gamma/16 \pm 3 \text{ ТэВ})$ с $\chi^2/\text{Dof} = 1.31$ при числе степеней свободы $\text{Dof} = 8$.

Природа протяжённого объекта TeV J2032+4130 до сих пор не ясна. С момента обнаружения TeV J2032+4130 было предпринято несколько наблюдений в рентгеновском диапазоне энергий 0.1–10 кэВ и 0.2–12 кэВ телескопами Chandra, XMM-Newton. Телескопами Chandra и XMM-Newton в области TeV J2032+4130 были обнаружены многочисленные точечные источники, после выделения которых XMM-Newton обнаружил область протяжённого рентгеновского излучения (см. [12, 18]). Радионаблюдения, предпринятые на GMRT, выявили по крайней мере три источника нетеплового радиоизлучения и область нетеплового диффузного излучения. Кроме того, в наблюдениях VLA была зарегистрирована оболочко-образная область слабого радиоизлучения [18], коррелирующая с положением области ТэВ-го излучения обнаруженного в наблюдениях HEGRA, VERITAS, MAGIC и ШАЛОН.

Заключение. Представлены результаты долговременных наблюдений объекта TeV J2032+4130 с помощью зеркального черенковского телескопа ШАЛОН. Полученные и уточнённые данные о потоках, форме спектра в широком диапазоне энергий и морфологии TeV J2032+4130, в дальнейшем помогут установить тип данного объекта и пролить свет на природу источника.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. A. Abdo, B. Allen, D. Berley, et al., *Astrophys. J.* **658**, L33 (2007).
- [2] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Science* **326**, 1512 (2009).
- [3] A. A. Abdo, M. Ackermann, M. Ajello, et al., *Astrophys. J.* **187**, 460 (2010).
- [4] D. J. Thompson, D. L. Bertsch, B. L. Dingus, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **101**, 259 (1995).
- [5] J. A. Esposito, S. D. Hunter, G. Kanbach and P. Sreekumar, *Astrophys. J.* **461**, 820 (1996).
- [6] A. A. Abdo, B. T. Allen, T. Aune, et al., *Astrophys. J.* **734**, 28 (2011).
- [7] J. H. Buckley, C. W. Akerlof, D. A. Carter-Lewis, et al., *Astron. Astrophys.* **329**, 639 (1998).

- [8] F. Aharonian, A. Akhperjanian, M. Beilicke, et al., *Astron. Astrophys.* **431**, 197 (2005).
- [9] V. G. Sinitsyna, in *Proc. 16th European Cosmic Ray Symposium, Madrid, 1998*, ed. J. Medina (Alcala de Henares: Universidad de Alcala, Spain, 1998), p. 383.
- [10] В. Г. Сеницина, В. Ю. Сеницина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **40**(5), 9 (2013).
- [11] V. G. Sinitsyna and V. Y. Sinitsyna, *EPJ Web of Conferences* **145**, 04002 (2017).
- [12] E. Aliu, T. Aune, B. Behera, et al., *Astrophys. J.* **783**, 16 (2014).
- [13] J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, et al., *Astrophys. J.* **675**, L25 (2008).
- [14] V. G. Sinitsyna, *Nuovo Cimento* **19C**(6), 965 (1996).
- [15] В. Г. Сеницина, В. Ю. Сеницина, *Письма в Астрономический журнал* **40**(2-3), 93 (2014).
- [16] V. G. Sinitsyna, V. Y. Sinitsyna, S. S. Borisov, et al., *Adv. Space Res.* doi:10.1016/j.asr.2017.04.007 (2017) (in press).
- [17] T.-P. Li and Y.-Q. Ma, *ApJ* **272**, 317 (1983).
- [18] Y. M. Butt, J. A. Combi, J. Drake, et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **385**, 1764 (2008).

Поступила в редакцию 4 июля 2017 г.