

## ОСТАТОК СВЕРХНОВОЙ ТИХО КАК ИСТОЧНИК КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

В. Г. Синицина, С. И. Никольский, В. Ю. Синицина, Г. Ф. Платонов

*Остаток сверхновой Тихо наблюдался атмосферным черенковским телескопом ШАЛОН высокогорной обсерватории на Тянь-Шане. Этот объект уже давно рассматривается как кандидат в источники адронов космических лучей в Северном полушарии. В работах [1, 2] для описания свойств Тихо использовалась нелинейная кинетическая модель ускорения космических лучей в остатках сверхновых. Ожидаемый поток  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$  простирается до энергий  $> 30$  эВ, тогда как поток  $\gamma$ -квантов, генерируемый процессом обратного комптоновского рассеяния, обрезается выше нескольких ТэВ. Поэтому обнаружение гамма-излучения при энергиях 10 – 80 ТэВ телескопом ШАЛОН является свидетельством его адронного происхождения. Из данных телескопа ШАЛОН в рамках теории [1, 2] получена дополнительная информация о таких параметрах остатка сверхновой Тихо как расстояние и плотность межзвездной среды.*

**Ключевые слова:** гамма-астрономия, остатки сверхновых, остаток сверхновой Тихо.

Наблюдение вспышки сверхновой звезды – весьма редкое событие. Так, две последние вспышки в Галактике наблюдались Тихо Браге в 1572 г. и Кеплером в 1604 г. Остаток сверхновой Тихо был сверхновой типа Ia. Это остаток сверхновой оболочечного типа, происходящий от взрыва белого карлика без образования нейтронной звезды. На рис. 1 представлено изображение остатка сверхновой Тихо (Tycho's SNR), полученное телескопом Чандра. На нём виден “пузырь” расширяющегося вещества внутри более быстро двигающейся оболочки высокоэнергичных электронов. Сверхзвуковое расширение

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Р. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sinits@sci.lebedev.ru.

ние вещества создаёт две ударные волны, излучающие рентген, прямую и обратную. Такой характер смещения ударной волны относительно поверхности “разрыва” расширяет возможности эффективного ускорения космических лучей на ударной волне.

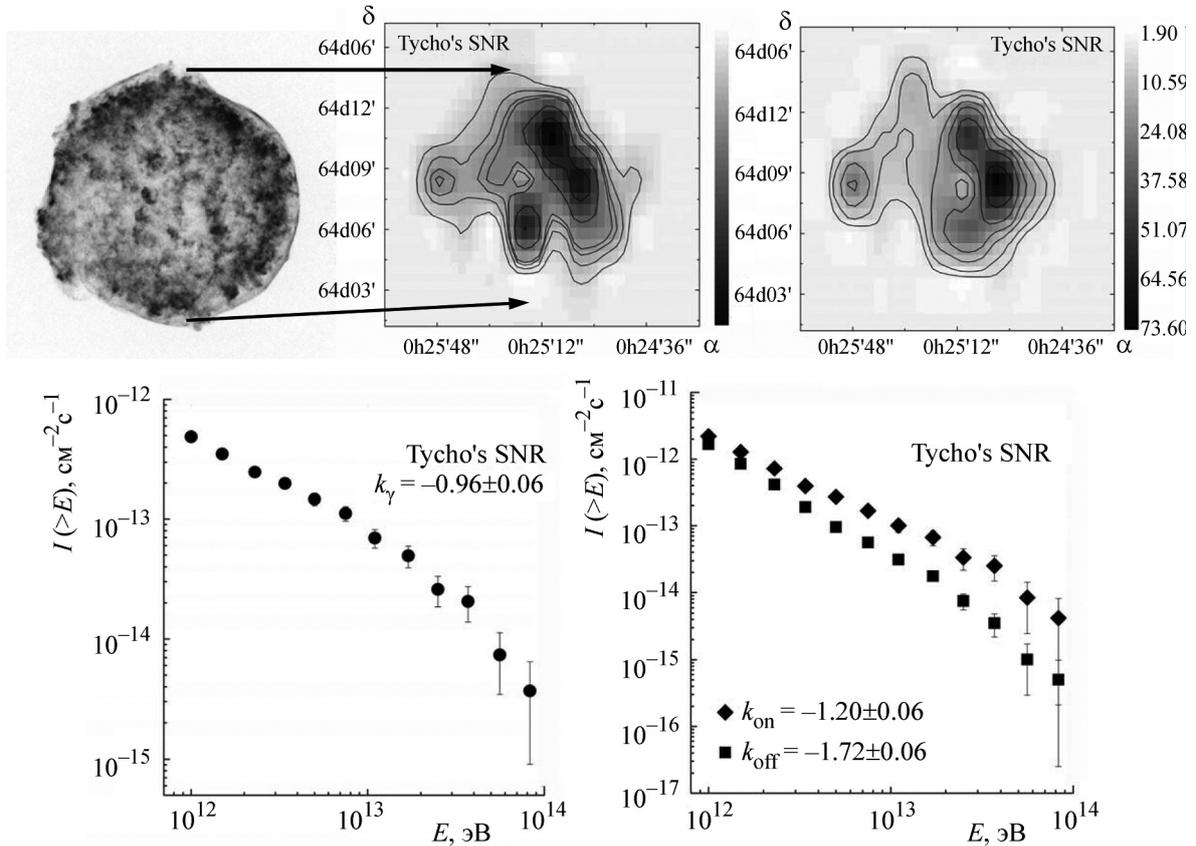


Рис. 1: Характеристики источника Tycho's SNR в рентгене по данным эксперимента Chandra и в области энергий  $> 0.8$  ТэВ по данным телескопа ШАЛОН:верху (слева направо) – изображение Tycho's SNR, полученное телескопом Chandra; изображение источника и его энергетическое изображение в области энергий  $> 0.8$  ТэВ; внизу – интегральный спектр  $\gamma$ -квантов со степеньным показателем  $k_\gamma = -0.96 \pm 0.06$ ; спектр событий, прошедших критерии отбора, без вычета фона  $k_{\text{on}} = -1.2 \pm 0.06$  и спектр фоновых событий, наблюдаемых одновременно с источником,  $k_{\text{off}} = -1.72 \pm 0.06$ .

Остаток сверхновой Tycho's SNR привлекателен для исследований и теоретических предсказаний благодаря высококачественным изображениям и спектрам, полученным с помощью обсерваторий XMM-Newton и Chandra. Он имеет почти сферическую форму, что удобно для моделирования. Возраст Tycho's SNR хорошо известен и составляет 438 лет. Но радиус этого остатка сверхновой известен не так точно. Значение радиуса

зависит от принятого расстояния, которое определяют разными методами, откуда величина радиуса получается примерно 2–3 пк. Также не известны точные значения и характеристики межзвездной среды вокруг остатка. Сравнение результатов моделирования остатка сверхновой с наблюдениями Tycho's SNR позволяет определить значения неизвестных параметров и судить о механизме взрыва сверхновой.

Информация о распределении космических лучей в остатках сверхновых может быть получена из гамма-астрономических наблюдений, поскольку  $\gamma$ -кванты сверхвысоких энергий генерируются электронной компонентой космических лучей в обратном комптоновском рассеянии и адронной компонентой в столкновении адронов, приводящих к рождению  $\pi^0$ -мезонов с последующим их распадом. Присутствие электронной компоненты космических лучей хорошо видно по излучению, генерируемому ею в остатке сверхновой в широком диапазоне длин волн от радио до  $\gamma$ -излучения средних энергий, тогда как ядерная компонента космических лучей может быть обнаружена только по  $\gamma$ -излучению сверхвысоких энергий. Если наличие ядерной компоненты в остатке сверхновой существенно, то в результате неупругих столкновений ядер, приводящих к образованию пионов с их последующим распадом, рождаются  $\gamma$ -кванты сверхвысоких энергий на достаточном для детектирования уровне [1]. Спектры  $\gamma$ -квантов, рождаемых адронной и электронной компонентами космических лучей, имеют подобную форму при энергиях от 1 ГэВ до 1 ТэВ из-за синхротронных потерь электронов [2]. Таким образом, единственная экспериментальная возможность различить адронный и лептонный вклады – это измерить спектр  $\gamma$ -квантов при энергиях выше 1 ТэВ, где ожидается их существенное различие.

Остаток сверхновой Tycho's SNR типа Ia наблюдался атмосферным черенковским телескопом ШАЛОН высокогорной обсерватории на Тянь-Шане [3–13]. Этот объект уже давно рассматривается как кандидат в источники адронов космических лучей в Северном полушарии, хотя казалось, что чувствительность существующего поколения черенковских телескопов возможно слишком мала для его обнаружения.

Tycho's SNR наблюдался телескопом ШАЛОН в разные годы (с 1996 по 2010) в ясные безлунные ночи под зенитными углами от 5 до 35 градусов. Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации о фоне космических лучей и ливнях, инициированных  $\gamma$ -квантами, в одном и том же сеансе наблюдений. Основным способом выделения ливней от  $\gamma$ -квантов на в  $\sim 10^3$  раз большем фоне ливней, генерируемых космическими лучами, служит различие каскадных процессов их образования и поглощения в атмосфере. Выделение электронно-фотонных

ливней среди ШАЛ, образованных протонами и ядрами космических лучей, улучшается путем увеличения точности определения направления оси ливня, которое соответствует направлению на источник первичных  $\gamma$ -квантов. Методика выделения  $\gamma$ -ливней из ливней, генерированных протонами и ядрами космических лучей, используемая в эксперименте ШАЛОН, позволяет отсекают 99.92% фона. Tycho's SNR был зарегистрирован телескопом ШАЛОН при энергиях больше 0.8 ТэВ на уровне  $17\sigma$ , определяемом по Li&Ma [14]. Среднее значение потока при энергиях больше 0.8 ТэВ для Tycho's SNR, слабого в рентгеновском диапазоне и наблюдаемого в области радиоизлучения, составляет  $I_{\text{Tycho}} = (5.2 \pm 0.9) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . На рис. 1 внизу представлены вместе спектры on-событий и off-событий, необходимых для получения спектра гамма-квантов, излучаемых Tycho's SNR. Спектр  $\gamma$ -квантов, излучаемых Tycho's SNR, получается вычитанием спектра фоновых событий, полученных одновременно с наблюдениями источника –  $I_{\text{off}} \propto E^{\text{koff}}$  из спектра спектры событий, пришедших от источника  $I_{\text{on}} \propto E^{\text{kon}}$ .

Энергетический спектр  $\gamma$ -квантов в наблюдаемом диапазоне энергий от 0.8 ТэВ хорошо описывается степенным законом с экспоненциальным обрезанием

$$I(> E_{\gamma}/(1 \text{ ТэВ})) = (0.42 \pm 0.09) \times 10^{-12} \times (E_{\gamma}/(1 \text{ ТэВ}))^{-0.93 \pm 0.09} \exp(-E_{\gamma}/35 \text{ ТэВ}).$$

Энергетический спектр остатка сверхновой Tycho's SNR в диапазоне энергий 0.8–20 ТэВ также можно описать простым степенным законом:

$$F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) \propto E^{k_{\gamma}},$$

где  $k_{\gamma} = -0.96 \pm 0.06$  (см. рис. 1 внизу). Также представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий, полученное с помощью телескопа ШАЛОН и энергетическое изображение Tycho's SNR (рис. 1 вверху). В Tycho's SNR при энергиях  $> 0.8$  ТэВ область наибольшего энерговыделения и область максимальной интенсивности излучения  $\gamma$ -квантов совпадают. При рассматриваемых энергиях основной вклад как в поток частиц, так и в поток по энергии даёт область западного края оболочки источника.

Остаток сверхновой Tycho's SNR был сверхновой типа Ia. Поэтому в расчетах [15] первоначально были использованы параметры, типичные для сверхновых этого типа, такие как масса сброшенного вещества, плотность межзвёздной среды  $N_H$ , температура. Расстояние до источника было взято  $d = 2.3$  кпк и видимый размер  $4'$ . Кинетическая нелинейная модель ускорения космических лучей в остатках сверхновых [1, 2, 15, 16] была применена к Tycho's SNR для сравнения результатов модели с полученными в наблюдениях очень низкими верхними пределами потока  $\gamma$ -квантов при ТэВ-ных энергиях. Фактически, эксперимент HEGRA не обнаружил Tycho's SNR, но был установлен

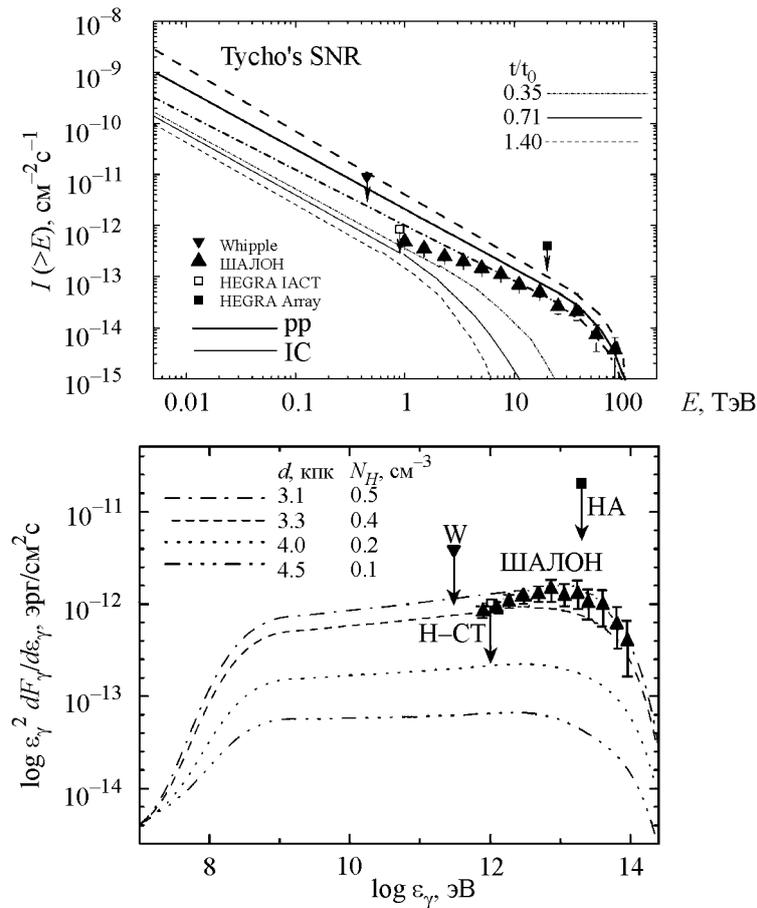


Рис. 2: Сравнение результатов теоретических расчетов [1, 2, 15, 16, 20] и экспериментальных данных для Tycho's SNR: сверху – интегральный спектр  $\gamma$ -квантов по данным телескопа ШАЛОН в сравнении с данными других экспериментов: Whipple [18, 19], HEGRA IACT-system, HEGRA AIROBICC [17] и теоретические расчеты; внизу – спектральное энергетическое распределение  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий от Tycho's SNR (обозначения см. текст).

очень низкий верхний предел при энергиях  $> 1$  ТэВ [17] (см. ниже рис. 2). Эта величина находится в согласии с в 4 раза более высоким значением, опубликованным ранее коллаборацией Whipple при энергии 400 ТэВ, если полагать при сравнении спектральный индекс, равный  $-1.1$  [18, 19]. Поток  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$ , полученный в расчетах [2, 15, 16], оказался несколько больше, чем поток от обратного комптоновского рассеяния при 1 ТэВ, и сильно доминирующим над ним при 10 ТэВ (см. рис. 2 сверху). Предсказанный поток  $\gamma$ -квантов находится в согласии с верхними пределами, опубликованными Whipple и HEGRA.

На рис. 2 вверху представлены результаты наблюдения Tycho's SNR по данным телескопа ШАЛОН ( $\blacktriangle$ ) вместе с теоретическими предсказаниями для данного источника и в сравнении с данными других экспериментов: верхние пределы  $\blacktriangledown$  – Whipple,  $\square$  – HEGRA IACT – system,  $\blacksquare$  – HEGRA AIROBICC. Жирными линиями показаны спектры в случае адронного происхождения  $\gamma$ -излучения сверхвысоких энергий (pp). Тонкие кривые представляют собой спектр  $\gamma$ -квантов, полученный в процессе обратного комптоновского рассеяния (IC). Сейчас остаток сверхновой находится на стадии, близкой к адиабатической стадии, имеющей характерное время  $t_0$ . Спектры обоих происхождений представлены для трёх разных фаз эволюции остатка сверхновой. Сплошные линии с  $t/t_0 = 0.71$  соответствуют текущей стадии эволюции Tycho's SNR.

Предполагаемый поток  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0 F \sim E^{-1}$  простирается выше 40 ТэВ, тогда как поток гамма-лучей, рождённых в процессе обратного комптоновского рассеяния, имеет обрезание при энергиях порядка 10 ТэВ. Таким образом, регистрация телескопом ШАЛОН  $\gamma$ -квантов от остатка сверхновой Tycho's SNR при энергиях 10–80 ТэВ является свидетельством адронного происхождения потока  $\gamma$ -квантов в данном объекте.

Благодаря высококачественным изображениям и спектрам, полученным с помощью обсерваторий XMM-Newton и Chandra, стали доступны уточнённые параметры Tycho's SNR, необходимые для расчетов, такие как энергия взрыва сверхновой  $E_{SN} = 1.2 \times 10^{51}$  эрг. Было найдено [15, 16, 20], что отношение радиусов, характеризующее смещение ударной волны относительно поверхности “разрыва”, имеет большую величину, чем предполагалось ранее, и это расширяет возможности эффективного ускорения космических лучей на ударной волне. Чтобы объяснить полученные в этих измерениях синхротронные спектры и тонкие излучающие структуры, требуются большие значения величин магнитной индукции (внутренних магнитных полей)  $\sim 400 \mu T$  [2]. Заключение относительно расстояния до Tycho's SNR сильно разнятся. Так, в литературе указываются значения, оцененные разными методами, от 2.0–2.8 кпк до 3.1–4.5 кпк [20]. Чтобы поставить ограничения на значения таких параметров источника как расстояние  $d$  и плотность межзвёздной среды вокруг остатка  $N_H$ , сравним полученные в расчётах [2, 15, 16, 20] спектральные энергетические распределения с распределениями из результатов наблюдений данного источника в ТэВ-ой области энергий. На рис. 2 внизу представлено спектральное энергетическое распределение  $\gamma$ -квантов от остатка сверхновой Tycho's SNR, рассчитанное [2, 16] в предположении энергии взрыва сверхновой, равной  $E_{SN} = 1.2 \times 10^{51}$  эрг для четырёх расстояний  $d$  и соответствующих плотностей

межзвёздной среды  $N_H$ .

Таким образом, получена дополнительная информация о параметрах источника Tycho's SNR в рамках нелинейной кинетической теории [2, 15, 16, 20] из данных телескопа ШАЛООН (рис. 2 внизу): расстояние  $d$  находится в пределах 3.1–3.3 кпк, плотность межзвёздной среды  $N_H = 0.4 - 0.5 \text{ см}^{-3}$ , при этом поток  $\gamma$ -квантов от распада  $\pi^0$  составляет  $(2-5) \times 10^{-13} \text{ эрг}/(\text{см}^2\text{сек})$  и простирается почти до 100 ТэВ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] E. G. Berezhko, in *Proc. 27th International Cosmic Ray Conference, Hamburg, Germany, 2001*, Invited, Rapporteur and Highlight papers of ICRC 2001 (Copernicus Gesellschaft, Hamburg, 2002), p. 226.
- [2] H. J. Völk, E. G. Berezhko, L. T. Ksenofontov and G. P. Rowell, *Astron. Astrophys.*, **396**, 649 (2000).
- [3] В. Г. Сеницина, ..., С. И. Никольский, В. Ю. Сеницина и др., *Изв. РАН, Сер. Физ.* **63**(3), 610 (1999).
- [4] V. G. Sinitsyna, ..., S. I. Nikolsky, V. Y. Sinitsyna, et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **97**, 219 (2001).
- [5] В. Г. Сеницина, ..., С. И. Никольский, В. Ю. Сеницина и др., *Изв. РАН, Сер. Физ.* **69**(3), 422 (2005).
- [6] V. G. Sinitsyna, ..., S. I. Nikolsky, V. Y. Sinitsyna, et al., *Int. J. Mod. Phys. A.*, No. 29, 7026 (2005).
- [7] V. G. Sinitsyna, ..., S. I. Nikolsky, V. Y. Sinitsyna, et al., in: *Toward a Major Atmospheric Cherenkov Detector - VII*, ed. by B. Degrange, G. Fontain (Ecole Polytechnique, Palaiseau, 2005), p. 105.
- [8] V. G. Sinitsyna, ..., S. I. Nikolsky, V. Y. Sinitsyna, et al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **151**, 112 (2006).
- [9] V. G. Sinitsyna, ..., S. I. Nikolsky, and V. Y. Sinitsyna, et al., in *Proc. 20 European Cosmic Ray Symposium, Lisbon, Portugal, 2006* (<http://www.lip.pt/events/2006/ecrs/>) S5–53.
- [10] V. G. Sinitsyna, T. P. Arsov, A. A. Malysenko, et. al., *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **175-176C**, 455 (2008).
- [11] V. G. Sinitsyna, F. I. Musin, S. I. Nikolsky, and V. Y. Sinitsyna, *Journal of the Physical Society of Japan*, **78**, Supplement A, 197 (2009).

- [12] V. G. Sinitsyna, A. Y. Alaverdyan, R. M. Mirzafatikhov, et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **196**, 433 (2009).
- [13] V. G. Sinitsyna and V. Y. Sinitsyna, in *Proc. of XLIVth Rencontres De Moriond, "Very High Energy Phenomena in the Universe"*, La Thuile, Aosta Valley, Italy, February 2009, ed. by Jacques Dumarchez and Jean Tran Thanh Van (THE GIOI Publishers, Hanoi, Vietnam, 2009), p. 77.
- [14] T.-P. Li and Y.-Q. Ma, ApJ **272**, 317 (1983).
- [15] H. J. Völk, E. G. Berezhko and L. T. Ksenofontov, in *Proc. 29<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf., Puna* (Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, 2005), vol. 3, p. 235.
- [16] E. G. Berezhko, L. T. Ksenofontov, and H. J. Völk, Astrophysics and Space Science **309**, 385 (2007).
- [17] J. Prahл and C. Prosch, (for the HEGRA Collaboration), in *Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban* (Wesprint, Potchefstroom, South Africa, 1997), Vol. 3, p. 217.
- [18] J. H. Buckley, C. W. Akerlof, D. A. Carter-Lewis, et al., Astron. Astrophys. **329**, 639 (1998).
- [19] M. Catanese and T. C. Weekes, Preprint Series, No. 4811 (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 1999).
- [20] H. J. Völk, E. G. Berezhko, and L. T. Ksenofontov, Astron. Astrophys. **483**, 529 (2008).

Поступила в редакцию 18 октября 2010 г.