

УДК 523.165

# ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СЕЙФЕРТОВСКОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 1275 ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ ЗЕРКАЛЬНЫМИ ЧЕРЕНКОВСКИМИ ТЕЛЕСКОПАМИ ШАЛОН

В. Г. Синицина\*, В. Ю. Синицина

*Сейфертовская галактика NGC 1275 является центральной, доминантной галактикой в скоплении галактик Персея. NGC 1275 известна как мощный источник радио- и рентгеновского излучений. В 1996 г. в наблюдениях телескопом ШАЛОН был обнаружен новый метагалактический источник гамма-излучения сверхвысоких энергий  $> 800$  ГэВ. Положение источника излучения, зарегистрированного в нашем эксперименте, согласуется по своим координатам с Сейфертовской галактикой NGC 1275. Результаты, полученные при высоких и сверхвысоких энергиях, необходимы для понимания процессов генерации излучения во всём широком энергетическом диапазоне.*

**Ключевые слова:** Сейфертовская галактика NGC 1275, гамма-излучение сверхвысоких энергий.

Скопления галактик уже давно рассматриваются как возможные кандидаты в источники ТэВ-ных гамма-лучей, излучаемых протонами и электронами, ускоренными на крупномасштабных ударных волнах или галактическим ветром, или активными ядрами галактик [1–7]. Скопление галактик в созвездии Персея является одним из наиболее изученных скоплений благодаря относительной близости ( $\sim 100$  Мпк или  $z = 0.0179$ ) и яркости. Доминантной галактикой в скоплении Персея является NGC 1275.

*NGC 1275.* Активная галактика NGC 1275 классифицирована различным образом: например, как Сейфертовская галактика типа 1.5 из-за обнаружения широких эмиссионных линий в ее спектре при длинах волн, соответствующих оптическому диапазону

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

\* E-mail: sinits@sci.lebedev.ru.

[8]. Но также, в рамках единой модели Активных Галактических Ядер (АГЯ) [9, 10], она относится и к основному классу блазаров благодаря сильной и быстрой переменности излучения и его поляризации [11]. Следует заметить, что есть свидетельство того, что упомянутая схема объединения АГЯ может быть даже упрощена [12].

NGC 1275 является мощным источником радио- и рентгеновского излучения. В радиодиапазоне объект, найденный в NGC 1275, известный также как Персей А и 3С 84, имеет мощное и компактное ядро, которое хорошо изучено радиотелескопом VLBI [13–15]. NGC 1275 является чрезвычайно яркой в радиодиапазоне и классифицирована как FR I радиогалактика; она имеет ярко выраженную структуру, состоящую из компактного центрального источника и протяженного выброса [15, 16]. Также, имея в центре супермассивную чёрную дыру (с массой  $3.4 \cdot 10^8$  Мсолнца) [17], NGC 1275 обнаруживает прецессию выбросов, которая может быть интерпретирована как возможное проявление того, что NGC 1275 – это результат слияния двух галактик [18].

Радиоизлучение простирается на большие расстояния и демонстрирует явное взаимодействие с газом внутри кластера галактик Персея. Наблюдения ROSAT [19], а позднее и Chandra [20] выявили наличие полостей (каверн) в находящемся внутри скопления газе, присутствие которых предполагает, что выбросы 3С 84 выметают многочисленные “пузыри” в атмосфере скопления Персея (рис. 1).

Окружённый протяжёнными волокнистыми структурами, NGC 1275 исторически вызывал большой интерес благодаря как своему положению в центре Скопления Персея, так и своей возможной “подпитывающей” Скопление роли [21]. Свидетельство “подпитывающей” роли NGC 1275 может быть получено из результатов наблюдений и ROSAT и Chandra, из которых видны оболочки из горячего газа и полости, которые пространственно совпадают с радиоструктурами (рис. 1), тянущимися от центральной, активной части АГЯ. NGC 1275 также вызывает интерес благодаря своему близкому расположению к Земле с красным смещением  $z = 0.0179$  [22], что даёт возможность изучить физику релятивистских выбросов.

Верхние пределы на гамма-излучение кластера галактик Персея и его центральной галактики NGC 1275 были получены в различных экспериментах на спутниках. Первые наблюдения были проведены телескопом COS-B в период с 1975 по 1979 год [23], затем космической установкой EGRET в 1995 [24].

В области сверхвысоких энергий верхние пределы были получены в разные годы на наземных экспериментах, таких как сцинтилляционная установка большой площади Tibet Array при  $E > 3$  ТэВ (1999) [26]; на черенковских телескопах Whipple (2006)

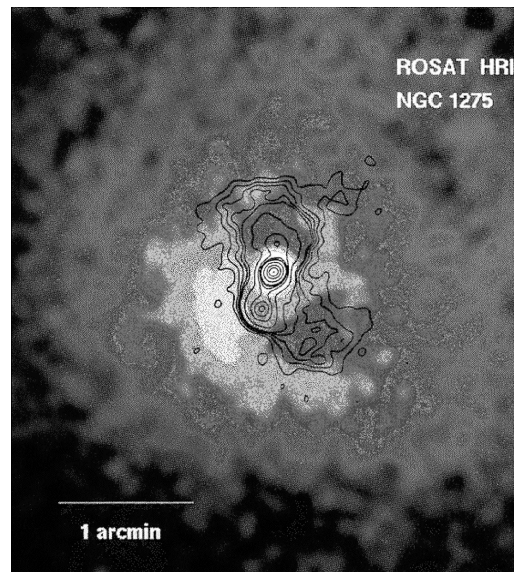


Рис. 1: Изображение источника NGC 1275 в рентгеновском диапазоне (0.1–2.4 кэВ), полученное телескопом ROSAT [19]. Контурами представлена радиоструктура источника по данным радионаблюдений VLA. Максимумы радио- и рентгеновского излучения совпадают с активным галактическим ядром NGC 1275, тогда как рентгеновское излучение практически полностью исчезает в окрестности радиолобов.

[25] при энергиях  $> 400$  ГэВ; MAGIC (2009) [27] при  $E > 100$  ГэВ и Veritas (2009) [28] при  $E > 188$  ГэВ. Недавно NGC 1275 была задетектирована при высоких энергиях 100 МэВ – 300 ГэВ спутниковым телескопом Fermi LAT [29]. Для понимания процессов генерации излучения во всём энергетическом диапазоне необходимо расширение пределов известного спектрального энергетического распределения вплоть до сверхвысоких энергий.

*NGC 1275 при сверхвысоких энергиях.* В эксперименте ШАЛОН, с самого начала его работы [30], проводятся поиски метagalacticких источников гамма-квантов сверхвысоких энергий. В 1996 г. в наблюдениях зеркальным черенковским телескопом ШАЛОН был обнаружен новый метagalacticкий источник гамма-излучения сверхвысоких энергий ( $E > 800$  ГэВ) [31, 32]. Положение источника излучения, зарегистрированного в нашем эксперименте, согласуется по своим координатам с Сейфертовской галактикой NGC 1275 [31–37].

NGC 1275 наблюдался телескопом ШАЛОН 263.4 часа в разные годы (с 1996 по 2010) в ясные безлунные ночи под зенитными углами от 3 до 33 градусов. Наблюдения проводились по стандартной для телескопа ШАЛОН методике получения информации

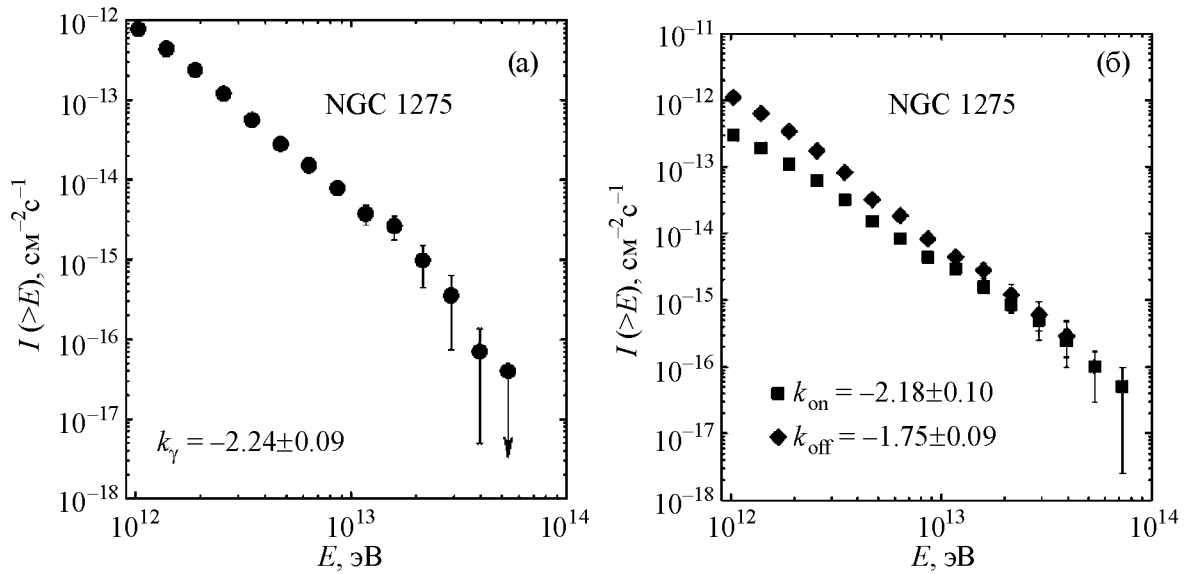


Рис. 2: (а) Спектр гамма-излучения от NGC 1275 со степенным показателем  $k_\gamma = -2.24 \pm 0.09$ . (б) Спектр событий от NGC 1275, прошедших критерии отбора, без вычета фона с показателем  $k_{\text{ON}} = -2.18 \pm 0.10$  и спектр фоновых событий, наблюдаемых одновременно с источником, с показателем  $k_{\text{OFF}} = -1.75 \pm 0.09$ .

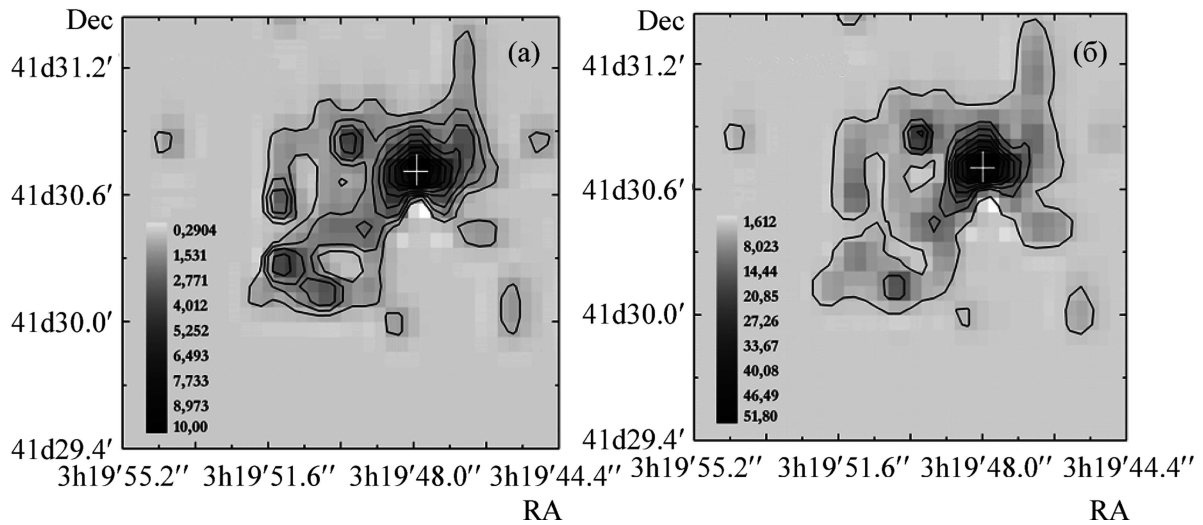


Рис. 3: (а) Изображение источника гамма-квантов NGC 1275 в области энергий  $> 0.8$  ТэВ, полученное с помощью телескопа ШАЛОН. (б) Энергетическое изображение NGC 1275. Цветовая шкала: (а) в единицах превышения над минимальным детектируемым сигналом; (б) в ТэВх.

о фоне космических лучей и ливнях, инициированных гамма-квантами, в одном и том же сеансе наблюдений [30, 38]. Гамма-излучение от NGC 1275 было зарегистрировано телескопом ШАЛОН при энергиях больше 800 ГэВ на уровне  $29.1\sigma$ , определяемом по Li&Ma [39]. Среднее значение интегрального потока при энергиях больше 800 ГэВ для NGC 1275 составляет  $I_{\text{NGC}1275} = (7.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Наблюдаемые вариации потока гамма-излучения не превышают 20%. На рис. 2(б) представлены вместе спектры ON-событий и OFF-событий, необходимых для получения спектра гамма-квантов, излучаемых NGC 1275. Спектр гамма-квантов, излучаемых NGC 1275, получается вычитанием спектра фоновых событий, полученных одновременно с наблюдениями источника –  $I_{\text{Off}} \propto E^{\text{koff}}$ , из спектра событий, пришедших от источника  $I_{\text{On}} \propto E^{\text{kon}}$ . Энергетический спектр гамма-квантов в наблюдаемом диапазоне энергий от 0.8 ТэВ хорошо описывается степенным законом  $F(E_0 > 0.8 \text{ ТэВ}) \sim E^k$ , где  $k = -2.24 \pm 0.09$  (см. рис. 2(а)). Также представлено изображение источника в ТэВ-ом диапазоне энергий (рис. 3(а)) и его энергетическое изображение (рис. 3(б)), полученное с помощью телескопа ШАЛОН.

Для выяснения механизмов генерации излучения сверхвысоких энергий в источнике и проверки моделей, их описывающих, необходимо установить возможные взаимосвязи между областями излучения ТэВ-ных гамма-лучей и фотонов низких энергий: радио- и рентгеновского излучения. Рисунок 1 показывает изображение источника NGC 1275 в рентгене по данным ROSAT контурами представлена радиоструктура источника по данным радионаблюдений VLA. Максимумы радио- и рентгеновского излучения совпадают с активным галактическим ядром NGC 1275, тогда как рентгеновское излучение практически полностью исчезает в окрестности радиолобов [40]. Также были скомбинированы изображения, полученные телескопом ШАЛОН-1 (0.8–40 ТэВ) и телескопом Chandra (рентген, 1.5–3.5 кэВ). На рис. 4 (чёрно-белая шкала) представлено изображение центральной части скопления Персея с центром на NGC 1275 размером  $\sim 5.5 \text{ arcmin}$  в рентгеновском диапазоне энергий 1.5–3.5 кэВ, полученное телескопом Chandra [41]. В рентгеновской области энергий вид ядра скопления Персея, в целом, представляет собой явную циркулярно-симметричную структуру с выраженным максимумом на NGC 1275. Ясно видимые провалы в интенсивности рентгеновского излучения, так же как и провал на NW от центра, известный ещё из наблюдений Обсерватории Эйнштейна 1979 года [42], связаны (коррелируют) с внутренними радиолобами 3C84 (рис. 1). Эти провалы окружены яркими, при энергиях 1.5–3.5 кэВ, областями-дугами с севера и юга. Простейшая интерпретация в том, что яркое излучение этих краёв – это оболочки, окружающие радиополости [41]. Также наблюдается яркое пятно излучения к востоку.

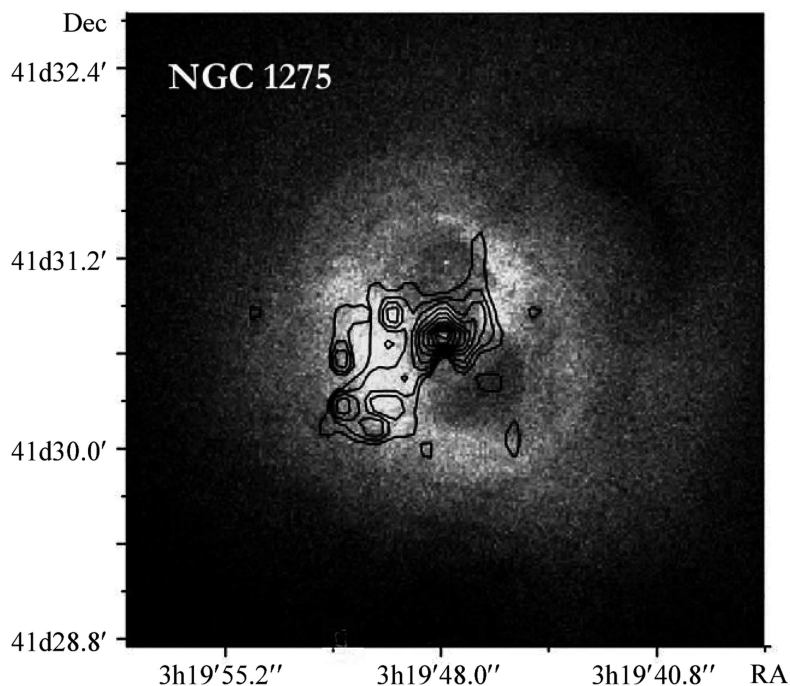


Рис. 4: Изображение источника NGC 1275 в рентгеновском диапазоне (1.5–3.5 кэВ), полученное телескопом *Chandra* [41], контур – данные телескопа ШАЛОН в области энергий 0.8–40 ТэВ.

Наблюдаемые телескопом ШАЛОН области излучения гамма-квантов сверхвысоких энергий NGC 1275 имеют структуру, подобную описанной в [41], и хорошо коррелирует с областями излучения фотонов в диапазоне 1.5–3.5 кэВ (см. рис. 4). Также найдена корреляция излучения с энергиями 0.8–40 ТэВ [34, 35] и рентгеновского излучения и в диапазоне 0.3–7 кэВ [41]. Недавно активная галактика NGC 1275 также была зарегистрирована наземным зеркальным черенковским телескопом MAGIC при энергиях выше 100 ГэВ в наблюдениях 2010–2011 гг. [43]. На рис. 5 представлено сравнение интегрального спектра гамма-квантов NGC 1275 по данным телескопов ШАЛОН (1996–2010), Fermi LAT (2009–2011) [44] и MAGIC (2010–2011)[43].

*Спектральное энергетическое распределение NGC 1275.* Описание многочастотного спектрального энергетического распределения NGC 1275 получено в модели СМ [45] и представляет собой композицию компонент обратного комптоновского рассеяния собственного синхротронного излучения релятивистских электронов трёх отдельных сгустков плазмы, выброшенных из внутренних областей ядра NGC 1275 (рис. 6).

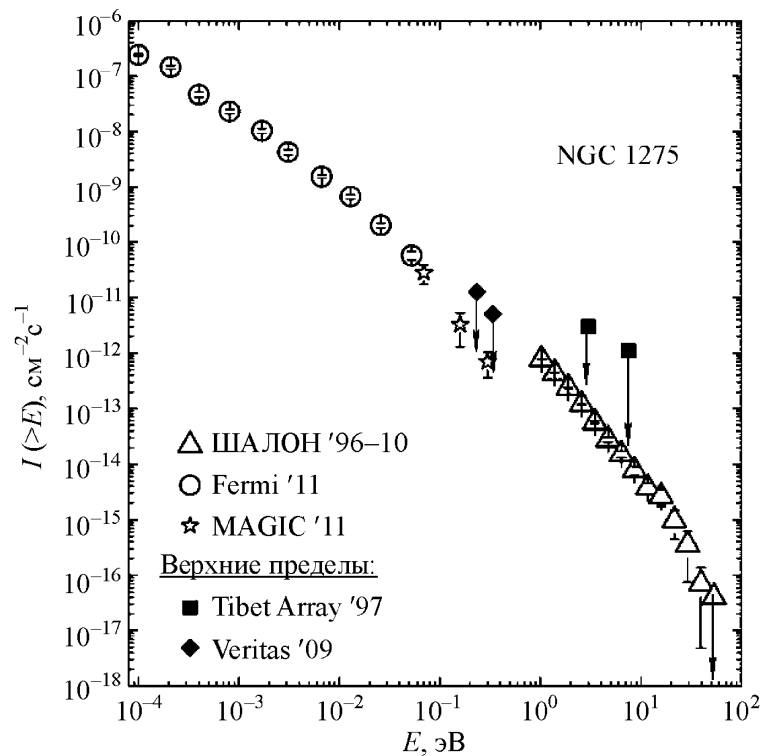


Рис. 5: Интегральный спектр гамма-квантов высоких и сверхвысоких энергий от NGC 1275 по данным телескопа ШАЛОН в сравнении с данными, полученными спутниковым телескопом Fermi LAT, наземными зеркальными черенковскими телескопами MAGIC, VERITAS и цинтилляционной установкой Tibet Array.

Первый сгусток (плазменный шар), имеющий промежуточную энергию и наибольший радиус, излучает фотоны, спектр которых хорошо описывает низкочастотное радиоизлучение, синхротронный пик и соответствующую ему часть высокоэнергичного излучения, рождённого в процессе обратного комптоновского рассеяния, а также исторические данные в рентгеновской области энергий с низким потоком (кривая ---).

Второй, наиболее энергичный и наименьший сгусток, генерирует излучение, спектр которого при высоких частотах описывает данные Fermi LAT и ШАЛОН, но при этом является слабодоминирующим в других областях энергий (кривая - · - · -). Таким образом, имеющиеся данные при высоких энергиях и результаты наблюдений телескопом ШАЛОН при сверхвысоких энергиях хорошо описываются в рамках указанной модели данной компонентой, генерирующей излучение в процессе обратного комптоновского рассеяния собственного синхротронного излучения релятивистских электронов.

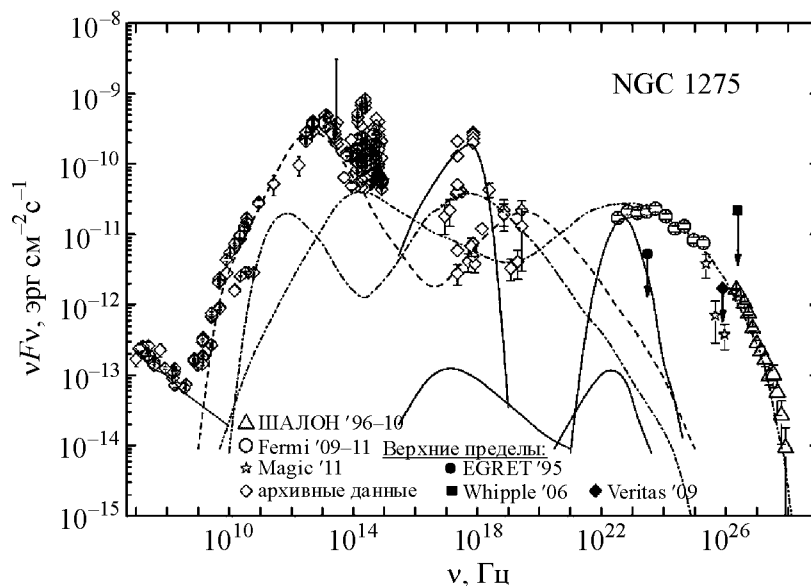


Рис. 6: Спектральное энергетическое распределение гамма-излучения от NGC 1275.  $\Delta$  – данные наземного черенковского телескопа ШАЛОН.  $\circ$  – данные телескопа Fermi LAT. Стрелками показаны верхние пределы по данным EGRET, Whipple и VERITAS (см. текст). Штриховая, штрих-пунктирная и штрих-пунктирная с двумя точками кривые – спектральные энергетические распределения NGC 1275, полученные в модели СМ [45] (см. текст). Сплошные кривые – лептонные и адронные модели [45], описывающие излучение скопления Персея.

Третий, наименее энергичный сгусток плазмы генерирует излучение, которое описывает данные в рентгеновском диапазоне энергий с высоким потоком и соответствующую им часть спектра фотонов, рождённых путём обратного комптоновского рассеяния, но не является доминирующим во всём остальном диапазоне частот (— · — · — чёрная кривая).

Данная СМ модель хорошо описывает спектр NGC 1275, наблюдаемый при 800 ГэВ – 40 ТэВ телескопом ШАЛОН (рис. 6, кривая — · — · —) и данные при МэВ – ГэВ энергиях полученным Fermi LAT, а также оно согласуется с верхними пределами VERITAS и Whipple в ТэВ-ых энергиях.

Различные модели, лептонные и адронные [45] (см. рис. 6, сплошные кривые), описывающие излучение самого скопления Персея, дают оценки значений потоков более чем на порядок ниже наблюдаемых, и также не могут описать спектры, полученные при высоких энергиях.



*Заключение.* Скопление галактик в созвездии Персея, как и другие скопления, уже давно рассматриваются как возможные кандидаты в источники гамма-излучения высоких и сверхвысоких энергий, генерированного различными механизмами. В эксперименте ШАЛОН проводятся долговременные исследования центральной галактики скопления – NGC 1275. Представлены результаты пятнадцатилетних наблюдений активной галактики NGC 1275 при энергиях 800 ГэВ – 40 ТэВ, обнаруженной телескопом ШАЛОН в 1996 году [31–37]. Для описания свойств NGC 1275 в широком диапазоне энергий, в том числе и в ГэВ – ТэВ области, использовалась трёхкомпонентная SM модель [45]. Имеющиеся данные при высоких энергиях Fermi LAT и результаты наблюдений телескопом ШАЛОН при сверхвысоких энергиях хорошо описываются одной из компонент в рамках указанной модели, генерирующей излучение в процессе обратного комптоновского рассеяния собственного синхротронного излучения релятивистских электронов.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] B. P. Houston, A. W. Wolfendale, and E. C. M. Young, *J. Phys. G: Nucl. Phys.* **10**, L147 (1984).
- [2] B. Dennison, *Astrophys. J.* **239**, L93 (1980).
- [3] S. Colafrancesco and P. Blasi, *Astropart. Phys.* **9**, 227 (1998).
- [4] C. L. Sarazin, *Astrophys. J.* **520**, 529 (1999).
- [5] F. Miniati, T. W. Jones, H. Kang, and D. Ryu, *Astrophys. J.* **562**, 233 (2001).
- [6] A. N. Timokhin, F. A. Aharonian, and A. Yu. Neronov, *Astron. & Astrophys.* **417**, 391 (2004).
- [7] S. Colafrancesco and P. Marchegiani, *Astron. & Astrophys.* **502**, 711 (2009).
- [8] M. P. Vèron-Cetty and P. Vèron, *Quasars and Active Galactic Nuclei* (8th edition), 1998.
- [9] B. L. Fanaroff and J. M. Riley, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **167**, 31P (1974).
- [10] C. M. Urry and P. Padovani, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **54**, 215 (1995).
- [11] J.R.P. Angel and H.S. Stockman, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **18**, 321 (1980).
- [12] P. Kharb, M. L. Lister, N. J. Cooper, et al., *Astrophys. J.* **710**, 764 (2010).
- [13] G. B. Taylor and R. C. Vermeulen, *Astrophys. J.* **457**, L69 (1996).
- [14] K. Asada, S. Kameno, Z.-Q. Shen, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **58**, 261 (2006).
- [15] R. C. Vermeulen et al., *Astrophys. J.* **430**, L41 (1994).
- [16] K. Asada et al., *Astron. Soc. Pacific. Conf. Ser.* **402**, 91A (2009).
- [17] R. J. Wilman, A. C. Edge, and R. M. Johnstone, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **359**, 755 (2005).
- [18] F. K. Liu and X. Chen, *Astrophys. J.* **671**, 1272 (2007).

- [19] H. Böhringer et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **264**, L25 (1993).
- [20] A. C. Fabian et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **366**, 417 (2006).
- [21] J. S. Gallagher, *Astron. Nachr.* **220**, 1040G (2009).
- [22] M. Strauss et al., *Astrophys. J. Suppl.* **83**, 29S (1992).
- [23] A. W. Strong, G. F. Bignami, P. A. Caraveo, et al., *Astron. & Astrophys.* **115**, 404 (1982).
- [24] D. J. Thompson et al., *Astrophys. J. Suppl.* **10**, 209 (1995).
- [25] J. S. Perkins et al., *Astrophys. J.* **644**, 148 (2006).
- [26] M. Amenomori, in: *Proc. 26th ICRC* (Ed. by D. Kieda, M. Salamon, and B. Dingus, Salt Lake City), **3**, 418 (1999).
- [27] J. Alèksic et al., *Astrophys. J.* **710**, 634A (2010).
- [28] V. A. Acciari et al., *Astrophys. J.* **706**, L275 (2009).
- [29] A. A. Abdo et al., *Astrophys. J.* **699**, 31 (2009).
- [30] V. G. Sinitsyna, *Nouvo Cimento* **19C**, 965 (1996).
- [31] V. G. Sinitsyna, *Proc. of Towards a Major Cherenkov Detector-V* Ed. O.C. de Jager, (Wesprint-Potchefstrom, South Africa, 1997), p. 136.
- [32] V. G. Sinitsyna et al., *Proc. 16th European Cosmic Ray Symposium*, Ed. J. Medina, (Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, Spain, 1998), p. 367.
- [33] V. G. Sinitsyna, *AIP (Conf. Proc.)*, **515**, 293 (2000).
- [34] V. G. Sinitsyna et al., *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)*, **75A**, 352 (1999); **97**, 215 (2001); **122**, 247, 409 (2003); **151**, 108 (2006); **175–176**, 463 (2008); **196**, 442 (2009).
- [35] В. Г. Синицина и др., *Изв. РАН. (Сер. Физ.)* **66**(11), 1654 (2002); **63**(3), 608 (1999); **71**(7), 941 (2007).
- [36] С. И. Никольский, В. Г. Синицина, *Ядерная физика* **67**(10), 1923 (2004).
- [37] V. G. Sinitsyna, *Rad. Phys. and Chem.* **75**, 880 (2006).
- [38] В. Г. Синицина и В. Ю. Синицина, *Письма в Астрономический Журнал* **37**(9), 676 (2011).
- [39] T-P. Li and Y-Q. Ma, *Astrophys. J.* **272**, 317 (1983).
- [40] H. Böhringer, W. Voges, A. C. Fabian, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **264**, L25 (1993).
- [41] A. C. Fabian, J. S. Sanders, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **318**, L65 (2000).
- [42] A. C. Fabian, E. M. Hu, L. L. Cowie, and J. Grindlay, *Astrophys. J.* **248**, 47 (1981).
- [43] J. Alèksic et al., *Astron. & Astrophys.* **539**, L2 (2012).
- [44] A. M. Brown and J. Adams, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **413**, 2785 (2011).
- [45] S. Colafrancesco et al., *Astron. & Astrophys.* **519**, A82 (2010).

Поступила в редакцию 8 июня 2012 г.