

ВЫДАЮЩИЕСЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА LHAASO В ОБЛАСТИ ГАММА-АСТРОНОМИИ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Ю. В. Стенькин*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
117312, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 октября 2021 г.,
после переработки 4 ноября 2021 г.
Принята к публикации 8 ноября 2021 г.

Обсуждаются недавние результаты, полученные в эксперименте LHAASO. Показано, что благодаря своим выдающимся характеристикам установка Km2A, являющаяся одной из составных частей этого эксперимента и предназначенная для регистрации широких атмосферных ливней, оказалась уникальным инструментом для целей гамма-астрономии. С помощью лишь работающей половины этой установки уже открыты ПэВатроны (природные ускорители частиц до энергий 10^{15} эВ и более) в нашей Галактике, обнаружено много новых астрофизических источников гамма-квантов, измерены энергетические спектры излучаемых гамма-квантов и, что особенно важно, с точностью до 0.05° определены направления их прихода, т. е. с такой точностью локализованы их источники. Это уже позволяет сделать некоторые выводы о природе ПэВатронов, т. е. о возможных механизмах ускорения космических лучей.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 100-летию А. Е. Чудакова

DOI: 10.31857/S0044451022040010
EDN: DPERUF

1. ВВЕДЕНИЕ

Основоположником экспериментальной гамма-астрономии был академик А. Е. Чудаков, под руководством которого еще в начале 1960-х годов в Крыму была создана первая в мире установка для регистрации черенковского излучения от широких атмосферных ливней (ШАЛ), на которой были получены первые в данной области экспериментальные результаты [1]. С тех пор в мире было создано множество подобных установок, техника и особенно электроника шагнули далеко вперед, телескопы стали «имиджевыми», их угловое разрешение и светосила стали намного лучше. В качестве примера можно назвать такие установки, как HESS [2], MAGIC [3], CTA [4], Tunka [5]. Такие установки имеют очень хорошее угловое разрешение. Светосила зависит от площади зеркал, суммарная площадь которых в планируемом телескопе CTA будет 40000 м^2 . Позже появилась техника регистрации

гамма-ливней с помощью водных черенковских детекторов, когда защищенный от света слой воды в несколько метров просматривается фотоумножителями. Примером такой установки является HAWC [6], состоящая из 300 баков с водой диаметром 7.3 м. Несмотря на внушительные размеры этих установок, их регистрирующая площадь все еще мала для регистрации очень слабых потоков гамма-квантов от астрофизических объектов при энергиях более 1 ПэВ (1 петаэлектронвольт равен 10^{15} эВ).

2. ЭКСПЕРИМЕНТ LHAASO

Международный высокогорный эксперимент LHAASO (large high altitude air shower observatory) [7] объединяет в себе все указанные выше методики. Проект находится пока еще в процессе создания в КНР в провинции Сычуань на высоте 4410 м над уровнем моря. Эксперимент является мультизадачным и состоит из нескольких независимо работающих установок. Для целей гамма-астрономии изначально были предназначены две установки: WFCTA (wide field Cherenkov telescope array) — 12 широкоугольных имиджевых

* E-mail: stenkin@sci.lebedev.ru

телескопов, и WCDA (water Cherenkov detector array) — 3 гигантских, разделенных на ячейки водных черенковских бассейна общей площадью $300 \times 260 \text{ м}^2$. Завершение строительно-монтажных работ ожидается в конце 2021 г. Тем не менее эксперименты там уже проводятся с 2019 г., идет расширение действующих установок и набор статистики. Наша группа из ИЯИ РАН участвует в этом эксперименте. Наша цель — измерение спектра и массового состава космических лучей в области энергий 1 ПэВ и выше путем создания установки ENDA из 400 разработанных в ИЯИ РАН электронно-нейтронных детекторов (эн-детекторов), регистрирующих две компоненты ШАЛ: основную адронную (через тепловые нейтроны) и электронную [8].

Основной частью LHAASO является Km2A (km^2 array) — установка для регистрации ШАЛ, состоящая из 5563 наземных электронных детекторов (ED) площадью по 1 м^2 и 1221 заглубленных мюонных детекторов (MD) площадью по 30 м^2 . Детекторы расположены в виде треугольной сетки: ED с шагом 15 м, а MD с шагом 30 м. Общая площадь установки более 1 км^2 . Такая площадь обеспечивает ей рекордную светосилу, более чем на порядок величины превосходящую светосилу WCDA. При этом установка очень плотная и насыщенная, что также делает ее недостижимой для конкурентов. В результате именно это установка первой начала выдавать уникальную научную информацию в области гамма-астрономии.

До сих пор считалось, что угловое разрешение классической ШАЛ-установки составляет несколько градусов. Заметим, что первые ШАЛ-установки (классические) состояли из нескольких десятков детекторов. При этом известно, что угловое разрешение зависит как $1/\sqrt{n}$ от количества n сработавших детекторов. Понятно, что, при прочих равных условиях, отношение разрешения двух установок с количеством вовлеченных в событие детекторов, n_1 и n_2 , будет равно $\sqrt{n_1/n_2}$. Отсюда видно, что при $n_1 = 50$ и $n_2 = 5000$ разрешение второй установки будет в 10 раз меньше, при этом градусы превращаются в доли градуса.

Разрешение также существенно зависит от структуры ливневого диска, от его толщины и от количества ливневых частиц, прошедших через детекторы [9]. При одинаковой мощности ливня большее количество вовлеченных детекторов и большее число зарегистрированных частиц обеспечивают лучшее временное, а значит, и угловое разрешение. Определенное экспериментально [10]

угловое разрешение установки Km2A равно 0.25° для энергий выше 100 ТэВ, а абсолютная ошибка определения направления на источник (pointing accuracy) составляет около 0.05° . Это намного лучше, чем у любой другой ШАЛ-установки как в прошлом, так и в настоящем.

Еще одним важнейшим достоинством установки Km2A является огромная площадь мюонных детекторов (36630 м^2), позволяющая проводить эффективный отбор гамма-ливней на фоне большого количества обычных адронных ШАЛ. Достигнутый к настоящему времени коэффициент подавления адронных ливней равен 10^4 для 100-тераэлектронвольтовых ШАЛ и около 10^5 для петаэлектронвольтовых. И это только по мюонной компоненте. В дальнейшем это параметр будет существенно увеличен путем использования образа и применения алгоритмов машинного обучения.

Пример установки Km2A наглядно демонстрирует «переход количества в качество». Имея такие выдающиеся параметры, эта установка (даже ее действующая половина) уже позволила получить на ней выдающиеся результаты, речь о которых пойдет ниже.

3. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА УСТАНОВКЕ Km2A

В мае 2021 г. вышла статья коллаборации LHAASO [11] по гамма-источникам, обнаруженным с помощью установки Km2A. В таблице приведены эти источники с указанием статистики на момент написания статьи и имеющимися астрофизическими объектами в окрестности каждого из них. Максимальная энергия, зарегистрированная на момент написания статьи (конец 2020 г.), равнялась 1.42 ПэВ от источника LHAASO J2032+4102, находящегося в так называемом Коконе Лебеда, но не совпадающего точно ни с одним из известных астрофизических объектов. Набор статистики продолжается, и сейчас открыто уже несколько ПэВатронов, что, скорее всего, свидетельствует в пользу адронного механизма ускорения — адронных ПэВатронов. Интересной особенностью новых источников, отмеченной в таблице, является то, что только один из них (первая строка) совпадает в пределах ошибок измерения с известным астрономическим объектом — пульсаром в Крабовидной туманности.

При внимательном изучении этой таблицы видно, что поблизости от каждого из 12 найденных ис-

Таблица. Источники гамма-квантов сверхвысоких энергий, обнаруженные установкой Км2А [10]

Источник событий	Число событий	Фон	Время наблюдения, ч	E_{max} , ПэВ	Объекты в окрестности
LHAASO J0534+2202	67	5.5	2236.4	0.88	Crab, PSR
LHAASO J1825-1326	61	3.2	1149.3	0.42	2 PSR
LHAASO J1839-0545	26	4.2	1614.5	0.21	2 PSR
LHAASO J1843-0338	30	4.3	1715.4	0.26	SNR
LHAASO J1849-0003	36	4.8	1865.3	0.35	PSR, YMC
LHAASO J1908+0621	74	5.1	2058.0	0.44	2 PSR, SNR
LHAASO J1929+1745	29	5.8	2282.6	0.71	2 PSR, SNR
LHAASO J1956+2845	34	6.1	2461.5	0.42	PSR
LHAASO J2018+3651	42	6.3	2610.7	0.27	PSR, YMC
LHAASO J2032+4102	45	6.7	2648.2	1.42	Cygnus OB2, PSR, YMC
LHAASO J2108+5157	30	6.4	2525.8	0.43	—
LHAASO J2226+6057	60	6.2	2401.3	0.57	Boomerang Nebula, PSR, SNR

точников находятся один или два пульсара (PSR), скопления молодых звезд (YMC), и в окрестностях только четырех из них имеются остатки сверхновых (SNR). Это весьма удивительно и неожиданно, поскольку, согласно общепринятому на сегодняшний день механизму ускорения, основным источником космических лучей считаются именно остатки сверхновых. По-видимому, сейчас начнется интенсивный поиск новых теорий и механизмов, обеспечивающих работы природных ускорителей частиц — ПэВатронов. Относительно недавно в качестве возможных «стационарных» ПэВатронов были предложены скопления молодых массивных звезд [12], тогда как сверхновые могут ускорять космические лучи до петаэлектронвольтных энергий лишь непродолжительное время после коллапса и не могут обеспечить наблюдаемый поток. В окрестностях трех из найденных источников (в том числе и найденного ПэВатрона LHAASO J2032+4102) действительно имеются такие скопления. Отметим, что в моделях ускорения частиц на оболочках сверхновых не так просто получить степенной энергетический спектр космических лучей, согласующийся с наблюдаемым, как, впрочем, и химический состав космических лучей.

Что касается ускорения космических лучей пульсарами, то данные LHAASO прямо указывают на их присутствие в окрестностях найденных источников. Эти объекты рассматривались и ранее в качестве возможных источников космических лучей (см., например, работу [13] и ссылки в ней). Однако тут то-

же есть трудности с предсказанием энергетического спектра (в расчетах получается очень жесткий спектр), но предсказывается тяжелый состав при ультравысоких энергиях, что отчасти согласуется с экспериментами (по крайней мере на установке обсерватории P. Auger [14]).

Другая недавно опубликованная работа LHAASO [15] посвящена результату, полученному на установках Км2А и WCDA, а именно, всестороннему изучению потока гамма-квантов от известного источника в Крабовидной туманности, являющегося «эталонным светильником» в нашей Галактике. Этот объект представляет собой остаток исторической сверхновой 1054 г. Сейчас внутри туманности находится пульсар, хорошо видимый в оптической, рентгеновской и в других областях спектра. Эксперимент Км2А «видит» этот источник в диапазоне энергий 40–400 ТэВ на уровне выше 46 стандартных отклонений. Спектр выше энергий 1 ТэВ, измеренный установками WCDA и Км2А, в принципе неплохо согласуется с ожидаемым от рассеяния электронов на фотонах (обратный комптон-эффект), свидетельствуя тем самым, что там точно «работает» лептонный механизм ускорения. Однако этот механизм, как ожидается, работает лишь при энергиях ниже 1 ПэВ, поскольку при энергиях в области сотен тераэлектронвольт его эффективность резко падает. Между тем от Крабовидной туманности уже зарегистрированы гамма-кванты с энергией выше 1 ПэВ. Как было отмечено, скорее всего там

работает также и протонный (адронный) ПэВатрон, генерирующий гамма-кванты при распадах нейтральных пионов. А это значит, что пульсары в нашей Галактике являются источниками космических лучей вплоть до энергий 10 ПэВ/нуклон. На самом деле, скорее всего, и больше, поскольку набор статистики продолжается, и где предел возможной энергии гамма-квантов пока не известно, а энергия родительских протонов должна быть примерно на порядок выше, чем энергии образуемых вторичных гамма-квантов (сначала энергия делится между рожденными пионами, затем нейтральный пион порождает два гамма-кванта, и энергия делится еще на 2). Измеренный спектр гамма-квантов от Крабовой туманности в широком диапазоне энергий от 0.3 ТэВ до 1.6 ПэВ хорошо аппроксимируется степенным спектром с дифференциальным показателем 3.12 ± 0.03 .

Дополнительную информацию по упомянутым статьям можно посмотреть по ссылке: <http://english.ihep.cas.cn/doc/4035.html>.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, полученные первые результаты эксперимента LHAASO уже имеют далеко идущие последствия. Можно даже констатировать открытие нового этапа в исследовании космических лучей, их источников, астрофизики. Если до сих пор гамма-астрономия и физика космических лучей существовали порознь, то теперь, при переходе энергий наблюдаемых гамма-квантов в область выше 1 ПэВ и при точном целеуказании на источник, происходит их слияние. Оказывается, что как космические лучи, так и гамма-кванты образуются в одних и тех же источниках, в одних и тех же процессах. Это особенно важно для физики космических лучей. По-видимому, модель ускорения космических лучей в оболочках сверхновых не выдерживает проверки экспериментом, требуются новые модели. В этой связи уместно напомнить, что с самого начала эта модель поддерживалась не всеми учеными. И, что особенно важно для данного выпуска журнала, она не поддерживалась А. Е. Чудаковым, о чем он неоднократно спорил с В. Л. Гинзбургом. Так, в работе [1] есть такие слова: “one cannot exclude the possibility, that the envelope of supernovae is not so powerful source of cosmic rays, as it is assumed at present. If so, the solution of the problem of the cosmic ray origin is to be connected with the objects of another nature, perhaps on the earlier stage of our Galaxy development”. Это

было пророчески написано Чудаковым в 1963 г. На наш взгляд, слова о ранних этапах развития Вселенной очень хорошо коррелируют с гипотезой Агароняна и др. [12], если считать, что процессы, происходящие в ранней Вселенной, были идентичны тем, которые происходят сейчас в скоплениях молодых массивных звезд или в центре Галактики. Наконец, теоретикам следует поискать новые механизмы ускорения космических лучей пульсарами, которые смогли бы объяснить наблюдаемые в эксперименте LHAASO как спектры гамма-квантов, так и близкое, но не полное пространственное совпадение найденных источников с пульсарами и другие особенности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международный высокогорный эксперимент LHAASO, находясь в процессе создания, уже начал получать важнейшие научные результаты. Огромная эффективная площадь установки Km2A, большая плотность детекторов, хорошая и надежная система сбора данных, большая высота над уровнем моря делают этот эксперимент недостижимым для конкурентов в ближайшее десятилетие. За первый год работы лишь части установки уже открыты 12 новых источников, включая ПэВатроны. Всесторонне исследован «эталонный источник» — Крабовидная туманность, в которой также, как оказалось, работает ПэВатрон, а возможно, даже два: лептонный и адронный. Измерены энергетические спектры излучаемых ими гамма-квантов, которые, по крайней мере для некоторых источников, хорошо описываются степенным законом с дифференциальным показателем близким к 3. В ближайшие несколько лет, по мере расширения площади установок и накопления статистики эксперимента LHAASO, можно с уверенностью ожидать новых выдающихся открытий как в гамма-астрономии, так и в астрофизике и физике космических лучей сверхвысоких энергий.

Подробно ознакомиться с программой исследований эксперимента LHAASO и детальным описанием входящих в него установок можно в специальном выпуске журнала Chinese Physics C под названием LHAASO Science Book [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Е. Чудаков, В. Л. Дядькин, В. И. Затсепин, и Н. М. Нестерова, in *Proc. ICRC1963*, Vol. 4, p. 199.

2. <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS>
3. <https://magic.mpp.mpg.de>
4. <https://www.cta-observatory.org>
5. <http://www.sinp.msu.ru/ru/project/14008>
6. <https://www.hawc-observatory.org>
7. <http://english.ihep.cas.cn/lhaaso/index.html>
8. Ю. В. Стенькин, В. В. Алексеенко, Данженглобу, Л. В. Жанг, Д. А. Кулешов, К. Р. Левочкин, В. В. Ли, М. Ю. Лиу, Й. Лиу, С. Х. Ма, Д. Х. Сяо, О. Б. Щеголев, Ш. В. Цюи, Т. Л. Чен, Ц. Ши, Ф. Янг, Изв. РАН, сер. физ. **85**, 540 (2021).
9. A. V. Chernyaev, A. E. Chudakov, D. L. Marchuk, and Yu. V. Stenkin, in *Proc. ICRC1991* (Dublin), Vol. 4, p. 492.
10. The LHAASO Collaborations, *Chin. Phys. C* **45**, 085002 (2021).
11. The LHAASO Collaboration, *Nature* **594**, 33 (2021).
12. F. Aharonian, R. Yang, and E. de Oña Wilhelmi, *Nature Astron.* **3**, 561 (2019).
13. M. Lemoine, K. Kotera, and J. Pétri, *JCAP* **07**, 016 (2015).
14. <https://www.auger.org>
15. The LHAASO Collaboration, *Science* **373**, 425 (2021).
16. LHAASO Science Book, *Chin. Phys. C* **46**, No.3 (2022) (in press).