

УДК 520.6.05

БУДУЩИЙ КОСМИЧЕСКИЙ ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. Н. П. Топчиев^{1, *}, А. М. Гальпер^{1, 2}, И. В. Архангельская², А. И. Архангельский^{1, 2},
А. В. Бакалдин^{1, 3}, Ю. В. Гусаков¹, О. Д. Далькаров¹, А. Е. Егоров¹, В. Г. Зверев¹,
А. А. Леонов^{1, 2}, П. Ю. Наумов², Н. Ю. Паппе¹, М. Ф. Рунцо², Ю. И. Стожков¹,
С. И. Сучков¹, М. Д. Хеймиц², И. В. Чернышева^{1, 2}, Ю. Т. Юркин²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

³Федеральное государственное учреждение “Федеральный научный центр
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук”, Москва, Россия

*E-mail: tnp51@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Будущий космический γ -телескоп ГАММА-400 будет установлен на платформе “Навигатор” российской астрофизической обсерватории. Высокая эллиптическая орбита обеспечит наблюдения в течение 7–10 лет многих областей небесной сферы непрерывно в течение длительного времени (~100 дней). ГАММА-400 будет измерять потоки γ -излучения в диапазоне энергий от ~20 МэВ до нескольких ТэВ и электронов + позитронов до ~20 ТэВ. Гамма-телескоп будет иметь превосходное выделение γ -квантов на фоне космических лучей и электронов + позитронов от протонов и беспрецедентные угловое (~0.01° при $E_\gamma = 100$ ГэВ) и энергетическое (~1% при $E_\gamma = 100$ ГэВ) разрешения лучше, чем у Fermi-LAT, а также наземных γ -телескопов, в 5–10 раз. Наблюдения ГАММА-400 позволят получить принципиально новые данные о дискретных источниках, спектрах γ -излучения и электронов + позитронов.

DOI: 10.1134/S0367676519050375

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральными космическими программами России на 2009–2015 гг. и 2016–2025 гг. продолжаются работы по созданию γ -телескопа ГАММА-400 [1–3]. Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для исследования высокоэнергичного космического γ -излучения и электронно-позитронной (далее электронной) компоненты космических лучей (КЛ) в диапазоне высоких энергий. Полученные данные будут способствовать решению проблемы природы “темной материи” во Вселенной и развития теории происхождения высокоэнергичных КЛ.

В настоящее время исследования высокоэнергичного космического γ -излучения осуществляется как в космосе (AGILE, Fermi-LAT, CALET, DAMPE), так и на поверхности Земли (H.E.S.S., MAGIC, VERITAS, HAWC). Телескопом Fermi-LAT зарегистрировано γ -излучение с энергией от 0.1 до 100 ГэВ от ~3000 дискретных источников, при этом около 1/3 источников не идентифицировано с астрофизическими объектами [4]. Наземные γ -телескопы зарегистрировали γ -излучение с

энергией более 100 ГэВ всего от ~200 источников (<http://tevcat.uchicago.edu/>). Отметим, что энергетические спектры γ -излучения в области энергий около 100 ГэВ от многих источников, зарегистрированные как телескопом Fermi-LAT, так и наземными установками, практически не перекрываются. Энергетические спектры потоков первичных электронов КЛ, полученные Fermi-LAT, PAMELA, AMS-2, CALET, DAMPE в области энергий более 50 ГэВ, практически не совпадают [5]. Поэтому для поиска, идентификации источников и уточнения спектров γ -излучения и электронной компоненты КЛ необходимо разрабатывать телескопы нового поколения с существенно лучшими угловым и энергетическим разрешениями для прямой регистрации γ -излучения высоких и сверхвысоких энергий и электронной компоненты КЛ на космических аппаратах. Именно таким уникальным прибором нового поколения станет телескоп ГАММА-400, который будет установлен на российской астрофизической обсерватории. ГАММА-400 представляет собой сле-

дующее после Fermi-LAT поколение космических γ -телескопов.

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

На рис. 1 представлена физическая схема телескопа ГАММА-400, который включает в себя:

- верхний ($АС_{\text{верх}}$) ($1280 \times 1280 \times 20$ мм) и четыре боковых ($АС_{\text{бок}}$) ($1280 \times 600 \times 20$ мм) двухслойные антисовпадательные сцинтилляционные детекторы, обеспечивающие эффективность регистрации заряженных частиц 0.99995 и временное разрешение 300 пс;

- конвертер-трекер (К), состоящий из 13 пар плоскостей кремниевых стриповых детекторов (X- и Y-координаты) с шагом стрипов 0.08 мм (0.24 мм у Fermi-LAT) и аналоговым съемом информации, что улучшает точность определения места прохождения частицы в два раза, по сравнению с бинарным, используемым у Fermi-LAT. На 11 верхних панелях расположены вольфрамовые конвертеры: на 7 панелях толщиной по 0.1 р.е.д. и на 4 панелях толщиной по 0.025 р.е.д. (р.е.д. – радиационная единица длины). Полная толщина конвертера-трекера для вертикального падения частиц ~ 1 р.е.д.;

- времяпролетную систему (ВПС) из двухслойных пластиковых сцинтилляционных детекторов С1 ($1000 \times 1000 \times 20$ мм) и С2 ($1000 \times 1000 \times 20$ мм). Детекторы С1 и С2 разнесены на расстояние ~ 500 мм; ВПС обеспечивает коэффициент разделения событий, идущих сверху и снизу, не менее 1000 и имеет временное разрешение лучше 300 пс;

- координатно-чувствительный калориметр (КК) площадью 1000×1000 мм². КК состоит из двух частей КК1 и КК2: а) КК1 состоит из 2 слоев. Каждый слой представляет набор сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl) и двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых детекторов с шагом 0.08 мм. Толщина КК1 составляет 2 р.е.д.; б) КК2 состоит из 28×28 кристаллов CsI(Tl). Каждый кристалл размером $36 \times 36 \times 370$ мм расположен в решетке из углепластика толщиной 0.4 мм. Толщина КК2 составляет ~ 20 р.е.д.; в) Общая толщина калориметра для нормального падения частиц составляет ~ 22 р.е.д. (8.6 р.е.д. у Fermi-LAT) или 1.0 я.е.д. (я.е.д. – ядерная единица длины). Общая толщина калориметра при регистрации частиц сбоку – 54 р.е.д. или 2.5 я.е.д.;

- двухслойные пластиковые сцинтилляционные детекторы калориметра С3 и С4 размером $1000 \times 1000 \times 20$ мм;

- двухслойные пластиковые боковые детекторы калориметра (БДК).

Для исключения “обратного” тока частиц (в основном ~ 1 МэВ фотоны), возникающего при взаимодействии с веществом калориметра и на-

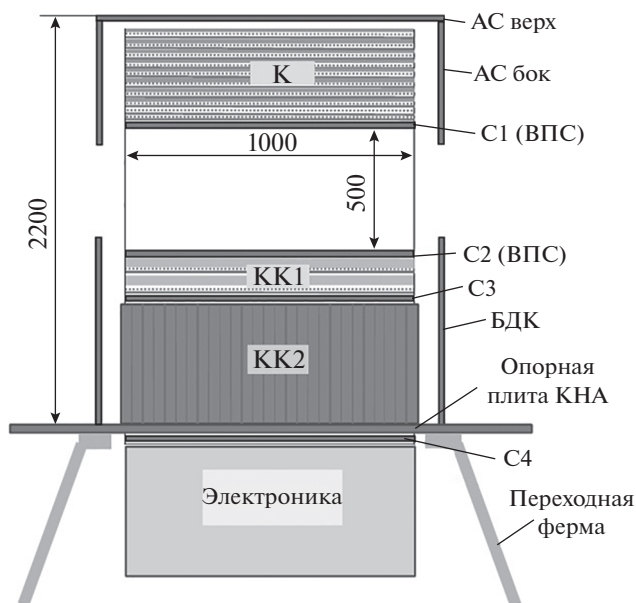


Рис. 1. Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400: $АС_{\text{верх}}$ – верхний антисовпадательный детектор; $АС_{\text{бок}}$ – боковые антисовпадательные детекторы; К – конвертер-трекер; С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы; КК1 и КК2 – координатно-чувствительный калориметр; С3 и С4 – сцинтилляционные детекторы; БДК – боковые детекторы калориметра.

правленного во все стороны, в том числе вверх, что блокирует детектор АС, используются сегментационные и временные методы.

ГАММА-400 способен исследовать потоки γ -квантов в диапазоне энергий от ~ 20 МэВ до нескольких ТэВ и потоки электронной компоненты КЛ в диапазоне энергий от нескольких ГэВ до ~ 20 ТэВ от направлений как сверху вниз (поле зрения ГАММА-400 составляет $\pm 45^\circ$), так и с четырех боковых направлений с общим геометрическим фактором более $3 \text{ м}^2_{\text{ср}}$. В γ -телескопе используется единый триггер $АС \times С1 \times С2$ для регистрации γ -излучения как высоких, так и низких энергий. На рис. 2 представлены эффективная площадь, угловое и энергетическое разрешения ГАММА-400 в зависимости от энергии γ -квантов, а также зависимость эффективной площади от угла падения частиц. ГАММА-400 будет иметь беспрецедентные угловое ($\sim 0.01^\circ$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ) и энергетическое ($\sim 1\%$ при $E_\gamma = 100$ ГэВ) разрешения лучше, чем у Fermi-LAT, а также наземных γ -телескопов, в 5–10 раз. Коэффициент режекции протонов составляет $\sim 5 \times 10^5$. При калибровке макета калориметра на синхротроне С-25Р ФИАН на пучке позитронов с энергией 300 МэВ получено энергетическое разрешение 10%, что соответствует расчетам.

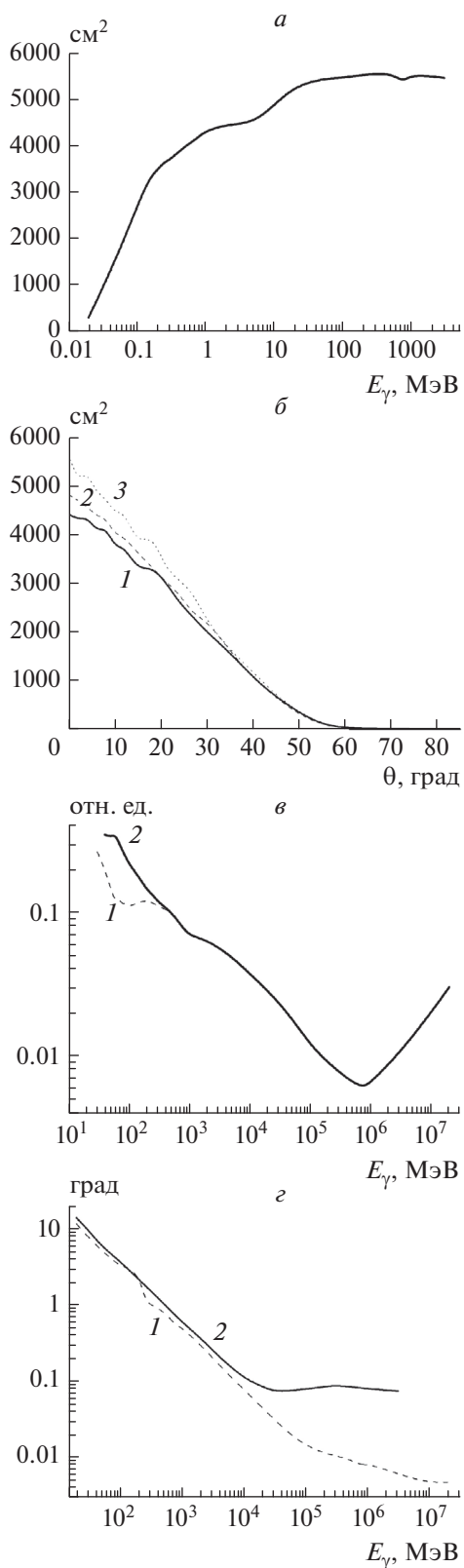


Рис. 2. Характеристики гамма-телескопа GAMMA-400: *a* – зависимость эффективной площади от энергии для вертикально падающих частиц; *б* – зависимость эффективной площади от угла падения частиц для: (1) $E_\gamma = 1$ ГэВ; (2) $E_\gamma = 10$ ГэВ; (3) $E_\gamma = 100$ ГэВ; *в* – зависимость энергетического разрешения от энергии для частей конвертера: (1) из 4 панелей с вольфрамом толщиной по 0.025 р. е. д.; (2) из 7 панелей с вольфрамом толщиной по 0.1 р. е. д.; *г* – зависимость углового разрешения от энергии для: (1) GAMMA-400 (шаг 80 мкм, аналоговый съем информации); (2) Fermi-LAT (шаг 228 мкм, цифровой съем информации).

Основной режим GAMMA-400 – прецизионные измерения отдельных участков небесной сферы, например, области центра Галактики с продолжительностью непрерывных наблюдений до 100 сут на высокоэллиптической орбите вне радиационных поясов и без затенения поля зрения γ -телескопа Землей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гамма-телескоп GAMMA-400 по сравнению с Fermi-LAT обеспечит улучшение углового и энергетического разрешений во всем диапазоне энергий от ~ 20 МэВ до ~ 1000 ГэВ, а для энергий более 10 ГэВ в несколько раз. Для $E_\gamma = 100$ ГэВ угловое разрешение составляет $\sim 0.01^\circ$ и энергетическое разрешение $\sim 1\%$. Возможность непрерывного длительного наблюдения отдельных областей небесной сферы, например центра Галактики, позволяет значительно продвинуться в проведении прецизионного исследования дискретных источников γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, выделения потоков γ -излучения и электрон-позитронной компоненты КЛ, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galper A.M., Adriani O., Aptekar R.L. et al. // Adv. Space Res. 2013. V. 51. № 2. P. 297.
2. Topchiev N., Galper A.M., Bonvicini V. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 675. Art. no. 032009.
3. Galper A.M., Suchkov S.I., Topchiev N.P. et al. // Phys. Atomic Nucl. 2017. V. 80. P. 1141.
4. Acero F., Ackermann M., Ajello M. et al. // Astrophys. J. Suppl. 2015. V. 218. Art. no. 23.
5. Adriani O., Akaike Y., Asano K. et al. // arXiv: 1806.09728. 2018.