

УДК 520.6.05

ЭКСПЕРИМЕНТ “ГАММА-400”: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© 2015 г. Н. П. Топчиев¹, А. М. Гальпер^{1,2}, В. Бонвичини³, О. Адриани⁴, Р. Л. Аптекарь⁵, И. В. Архангельская², А. И. Архангельский², Л. Бергстрем⁶, Е. Берти⁴, Г. Бигонгьяри⁷, С. Г. Бобков⁸, Э. А. Богомолов⁵, М. Боецио³, М. Бонги⁴, С. Бонеки⁷, С. Боттаи⁴, К. А. Боярчук⁹, А. Вакки³, Е. Ваннуччини⁴, Г. И. Васильев⁵, Г. Каstellини¹⁰, П. В. Каттанео¹¹, П. Кумани³, Г. Л. Деденко², В. А. Догель¹, С. Де Донато¹², Б. И. Гнатык¹⁴, М. С. Горбунов⁸, Ю. В. Гусаков¹, Н. Зампа³, В. Г. Зверев², В. Н. Зиракашвили¹⁹, В. В. Кадилин², В. А. Каплин², А. А. Каплун², В. Е. Корепанов¹⁵, Ж. Ларссон¹³, А. А. Леонов², В. А. Логинов², Ф. Лонго³, П. Маестро⁷, П. С. Маррокези⁷, В. В. Михайлов², Э. Моккьютти³, А. А. Моисеев¹⁶, Н. Мори⁴, И. В. Москаленко¹⁷, П. Ю. Наумов², П. Папини⁴, П. Пикоцца¹², М. Пирс¹³, А. В. Попов⁸, Ф. Райд¹³, А. Рапполди¹¹, С. Рикьярини¹⁰, М. Ф. Рунцо², О. В. Сердин⁸, Р. Спарволи¹², П. Спиллантини⁴, С. И. Сучков¹, М. Тавани¹⁸, А. А. Тараскин², А. Тиберио⁴, Е. М. Тюрин², М. В. Уланов⁵, Ч. Фуглесанг¹³, М. Д. Хеймиц², Ю. Т. Юркин²

E-mail: tnp51@rambler.ru

Продолжается разработка γ -телескопа ГАММА-400, предназначенного для измерения потоков γ -излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи, а также для поиска и проведения детального исследования дискретных источников γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, исследования γ -всплесков и γ -излучения активного Солнца. Энергетический диапазон измерений гамма-квантов и электронов (позитронов) составляет от 100 МэВ до 3000 ГэВ. При энергии гамма-квантов 100 ГэВ гамма-телескоп имеет угловое разрешение ~ 0.01 градуса, энергетическое разрешение $\sim 1\%$ и коэффициент режекции протонов $\sim 5 \cdot 10^5$. ГАММА-400 будет установлен на российской космической обсерватории.

DOI: 10.7868/S0367676515030424

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Федеральной космической программой России на 2009–2015 гг. и разрабаты-

ваемой Федеральной космической программой России на 2016–2025 гг. в настоящее время продолжают работы по созданию космической обсерватории с комплексом научной аппаратуры “ГАММА-400”.

Комплекс научной аппаратуры “ГАММА-400” предназначен для исследования γ -излучения в диапазоне высоких энергий, получения данных, способствующих решению проблемы природы “темной материи” во Вселенной и развития теории происхождения высокоэнергичных космических лучей. ГАММА-400 позволит получить информацию:

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва.

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва.

³ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste and Physics Department of University of Trieste, Trieste, Italy.

⁴ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze and Physics Department of University of Florence, Firenze, Italy.

⁵ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

⁶ Stockholm University, Department of Physics; and the Oskar Klein Centre, AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden.

⁷ Department of Physical Sciences, Earth and Environment, University of Siena and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa, Italy.

⁸ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва.

⁹ ОАО “Научно-исследовательский институт электромеханики”, Истра.

¹⁰ Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara - CNR and Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze, Firenze, Italy

¹¹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia, Pavia, Italy.

¹² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma 2 and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy.

¹³ KTH Royal Institute of Technology, Department of Physics; and the Oskar Klein Centre, AlbaNova University Center, Stockholm, Sweden.

¹⁴ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

¹⁵ Lviv Center of Institute of Space Research, Lviv, Ukraine.

¹⁶ CRESST/GSFC and University of Maryland, College Park, Maryland, USA.

¹⁷ Hansen Experimental Physics Laboratory and Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, Stanford, USA.

¹⁸ Istituto Nazionale di Astrofisica IASF and Physics Department of University of Rome Tor Vergata, Rome, Italy.

¹⁹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкина РАН, Троицк.

- об особенностях в энергетических спектрах высокоэнергичного γ -излучения от дискретных и протяженных источников и электрон-позитронной компоненты, которые могут быть связаны с частицами “темной материи”;

- о переменности высокоэнергичного γ -излучения от дискретных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках;

- о γ -всплесках, включая всплески высокой энергии;

- об энергетическом спектре высокоэнергичных легких ядер;

- о высокоэнергичном γ -излучении, потоках электронов и позитронов, ядер в возникающих солнечных вспышках.

Одна из актуальных задач эксперимента ГАММА-400 – наблюдение высокоэнергичного γ -излучения центральной области нашей Галактики, которое даст уникальную информацию о галактическом центре и находящейся вблизи центра сверхмассивной черной дыре и ее аккреционном диске, который возможно содержит, как и центр Галактики, гипотетические частицы “темной материи”. Чтобы выделить линейчатое γ -излучение от частиц “темной материи” на фоне излучения от других источников в галактическом центре, телескопы должны обладать высоким угловым и энергетическим разрешениями. Предполагается, что ГАММА-400 в диапазоне энергий более 10 ГэВ будет иметь угловое и энергетическое разрешения значительно лучше, чем гамма-телескопы Fermi-LAT [1–3] и AGILE [4], работающие в настоящее время на орбите, а также работающие и проектируемые наземные γ -телескопы MAGIC [5], H.E.S.S. [6], VERITAS [7], CTA [8].

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ГАММА-400”

1. Основным прибором комплекса научной аппаратуры “ГАММА-400” (КНА “ГАММА-400”) является γ -телескоп ГАММА-400 [9–11]. В состав КНА “ГАММА-400” также входят магнитометры (2 шт.) для измерения магнитного поля; звездные датчики (2 шт.) для определения оси γ -телескопа с погрешностью $\sim 5''$; система регистрации γ -всплесков “Конус-ФГ” (четыре детектора направлений, два спектрометрических детектора), регистрирующая γ -всплески практически со всей небесной сферы в диапазоне энергий 10 кэВ–10 МэВ и работающая одновременно с γ -телескопом ГАММА-400.

2. Гамма-телескоп ГАММА-400.

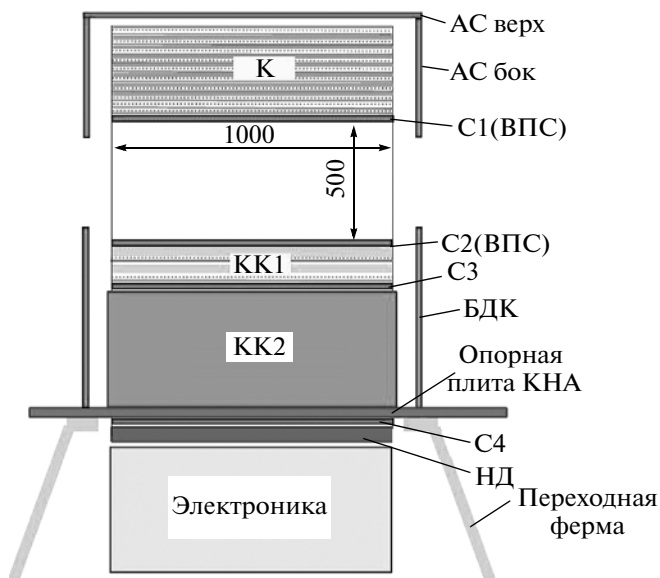


Рис. 1. Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400: АС_{верх} – верхний антисовпадательный детектор; АС_{бок} – боковые антисовпадательные детекторы; К – конвертер-трекер; С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы; КК1 и КК2 – координатно-чувствительный калориметр; С3 и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

2.1. Физическая схема γ -телескопа ГАММА-400 представлена на рис. 1. По сравнению с физической схемой, представленной ранее в [9–11], увеличены размеры калориметра (КК1 и КК2), С2, С3, С4 и НД до 1000 × 1000 мм вместо прежних 800 × 800 мм. При этом масса КНА увеличена до 4100 кг вместо 2600 кг. Это стало возможно благодаря переходу к более мощной ракете-носителю “Протон-М”.

Гамма-телескоп ГАММА-400 включает в себя

- верхний (АС_{верх}) и 4 боковых (АС_{бок}) антисовпадательных детектора;

- конвертер-трекер (К), представляющий собой 10 слоев двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых координатных детекторов (шаг стрипов 0.1 мм). Восемь слоев содержат дополнительно вольфрамовые пластины толщиной 0.1 р. е. д. (р. е. д. – радиационная единица длины). Общая толщина конвертера-трекера составляет ~ 1.0 р. е. д.;

- времяпролетную систему (ВПС) из сцинтилляционных детекторов С1 и С2, разнесенных на расстояние 500 мм;

- координатно-чувствительный калориметр (КК), состоящий из КК1 и КК2:

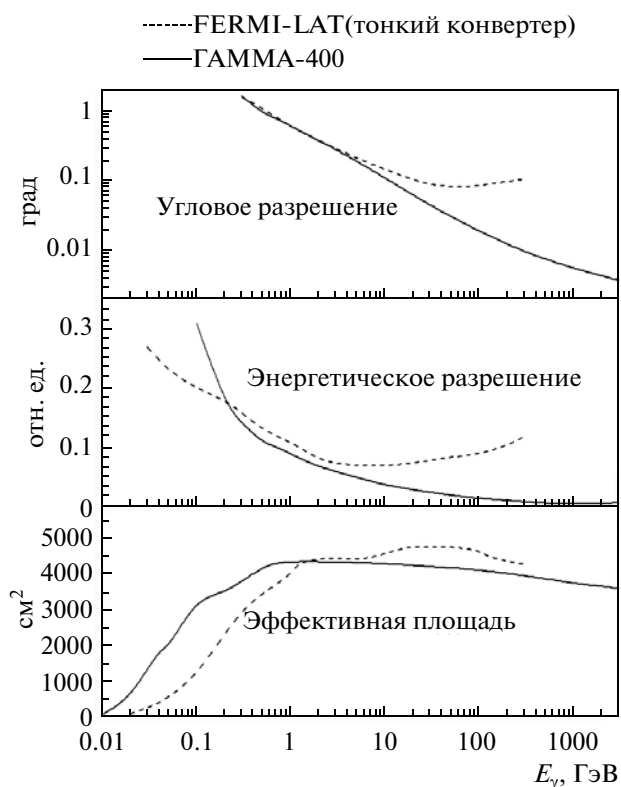


Рис. 2. Зависимости эффективной площади, энергетического и углового разрешений от энергии регистрируемых гамма-квантов для ГАММА-400 и Fermi-LAT.

а) КК1 — состоит из двух групп детекторов. Каждая группа содержит детекторы с CsI(Tl) и двухслойные (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевые стриповые детекторы с шагом стрипов 0.1 мм. Толщина КК1 составляет ~2 р. е. д.

б) КК2 состоит из кристаллов CsI(Tl). Толщина КК2 составляет ~23 р. е. д.

Общая толщина калориметра для нормального падения частиц составляет ~25 р. е. д. или 1.2 я. е. д. (я. е. д. — ядерная единица длины). Общая толщина калориметра при регистрации частиц с боковых направлений составляет 54 р. е. д. или 2.5 я. е. д.

— сцинтиляционные детекторы калориметра С3 и С4;

— боковые детекторы калориметра (БДК);

— нейтронный детектор (НД).

2.2. Гамма-кванты конвертируются в электрон-позитронную пару в конвертере-трекере. Электромагнитный ливень развивается в калориметре и регистрируется в КК1, КК2 и сцинтиляционных детекторах С3 и С4. Антисовпадательные детекторы, расположенные вокруг конвертера-трекера, помогают идентифицировать γ -кванты, а

временнóлетная система определяет направление падающих частиц. При регистрации частиц, движущихся сверху вниз, используются две триггерные системы: для γ -квантов при отсутствии сигнала в АС; для электронов (позитронов) и ядер при наличии сигнала в АС. Электроны и позитроны, легкие ядра могут регистрироваться также с боковых направлений.

Для уменьшения влияния частиц “обратного тока”, возникающих при взаимодействии падающих γ -квантов с веществом калориметра и движущихся в обратном направлении, используются временные и сегментационные методы [12].

2.3. Расчет физических характеристик ГАММА-400 проводился тремя независимыми группами институтов: ФИАН + НИЯУ МИФИ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и INFN (Национальный институт ядерной физики, Италия). На рис. 2 представлены результаты расчетов эффективной площади, энергетического и углового разрешений. Для сравнения приведены соответствующие характеристики для тонкого конвертера γ -телескопа Fermi-LAT (http://www.slac.stanford.edu/exp/glast/groups/canda/lat_Performance.htm), при использовании которого достигается наилучшее угловое разрешение. Из рис. 2 видно, что для $E_\gamma > 1$ ГэВ эффективная площадь ГАММА-400 (~4000 см²) почти сравнима с эффективной площадью Fermi-LAT (~4500 см²), а угловое и энергетическое разрешения ГАММА-400, начиная с $E_\gamma > 10$ ГэВ, становятся лучше и достигают при энергии $E_\gamma = 100$ ГэВ величины ~0.01° и ~1% соответственно.

В таблице приведено сравнение основных характеристик ГАММА-400 и Fermi-LAT.

2.4. При регистрации первичных космических заряженных частиц, в том числе электронов и позитронов, необходимо осуществлять режекцию протонов. Режекция осуществляется с использованием анализа сигналов детекторов С1 и С2 ВПС, калориметра КК1 и КК2, детекторов С3 и С4, НД. Расчетный суммарный коэффициент режекции составил $\sim 5 \cdot 10^5$ в диапазоне энергий протонов от 50 до 1000 ГэВ.

3. Космическая обсерватория, в составе которой комплекс научной аппаратуры “ГАММА-400” установлен на космической платформе “Навигатор”, разрабатываемой в НПО им. С.А. Лавочкина, будет выведена в космос на высокоэллиптическую орбиту с начальными параметрами: апогей 300 000 км, перигей 500 км, наклонение 51.4°. Время жизни космической обсерватории не менее 7 лет. Запуск космической обсерватории планируется на начало 2020-х годов.

Таблица 1. Сравнение основных характеристик Fermi-LAT (тонкий конвертер) и ГАММА-400

	Fermi-LAT (тонкий конвертер)	ГАММА-400
Орбита	круговая, 565 км	высокоэллиптическая, 500–300000 км (без затенения Землей)
Энергетический диапазон	20 МэВ–300 ГэВ	100 МэВ–3000 ГэВ
Эффективная площадь		
$E_\gamma = 10$ ГэВ	4500 см ²	4000 см ²
$E_\gamma = 100$ ГэВ	4500 см ²	4000 см ²
Координатные детекторы	Si стрипы (шаг 0. 23 мм)	Si стрипы (шаг 0. 1 мм)
Угловое разрешение		
$E_\gamma = 10$ ГэВ	0.2°	0.09°
$E_\gamma = 100$ ГэВ	0.08°	0.015°
Калориметр	CsI	CsI(Tl)+Si стрипы
толщина	8.5X ₀	25X ₀
Энергетическое разрешение		
$E_\gamma = 10$ ГэВ	8%	3.5%
$E_\gamma = 100$ ГэВ	10%	1.5%
Коэффициент режекции	~10 ⁴	~5 × 10 ⁵
Масса телескопа	2800 кг	4100 кг
Объем информации	15 Гбайт/сут	100 Гбайт/сут

Работа выполнена при поддержке Совета РАН по космосу, Федерального космического агентства, Национального института ядерной физики Италии (INFN) и Итальянского космического агентства (ASI).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Atwood W.B. et al.* // *Ap. J.* 2009. V. 697. P. 1071.
2. *Abdo A.A. et al.* // *Astropart. Phys.* 2009. V. 32. P. 193.
3. *Ackermann M. et al.* // *Astrophys. J. Suppl.* 2013. V. 209. P. 34.
4. *Tavani M. et al.* // *arXiv:0807. 4254.*
5. *Aleksic J. et al.* // *Astropart. Phys.* 2012. V. 35. P. 435.
6. *Stegmann C. et al.* // *AIP Conf. Proc.* 2012. V. 1505. P. 194.
7. *VERITAS Collaboration* // *arXiv:1308. 6173.*
8. *CTA Consortium* // *arXiv:1008. 3703.*
9. *Galper A.M. et al.* // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. № 2. P. 297.
10. *Galper A.M. et al.* // *AIP Conf. Proc.* 2013. V. 1516. P. 288.
11. *Гальпер А.М., Адриани О., Аптекарь Р.Л., Архангельская И.В., Архангельский А.И., Боецио М., Бонвичини В., Боярчук К.А., Вакки А., Вануччини Е., Гусакон Ю.В., Зампа Н, Зверев В.Г., Зиракашвили В.Н., Каплин В.А., Качанов В.А., Леонов А.А., Лонго Ф., Мазец Е.П., Маестро П., Маррокези П., Мереминский И.А., Михайлов В.В., Моисеев А.А., Моккьюти Е., Мори Н., Москаленко И., Наумов П.Ю., Папини П., Пикоцца П., Родин В.Г., Рунцо М.Ф., Спарволи Р., Спиллантини П., Сучков С.И., Тавани М., Топчиев Н.П., Фрадкин М.И., Хеймиц М. Д., Юркин Ю.Т.* // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2013. Т. 77. № 11. С. 1605; *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2013. V. 77. № 11. P. 1339.
12. *Гинзбург В.Л., Каплин В.А., Рунцо М.Ф., Топчиев Н.П., Фрадкин М.И.* // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2009. Т. 73. № 5. С. 703; *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2009. V. 73. № 5. P. 664.