

УДК 520.6.05

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАММА-ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400 ДЛЯ ПОИСКА СЛЕДОВ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

© 2013 г. А. М. Гальпер^{1,2}, О. Адриани³, Р. Л. Аптекарь⁴, И. В. Архангельская², А. И. Архангельский², М. Боецио⁵, В. Бонвиччини⁵, К. А. Боярчук⁶, А. Вакки⁵, Е. Вануччини³, Ю. В. Гусаков¹, Н. Зампа⁵, В. Г. Зверев², В. Н. Зиракашвили⁷, В. А. Каплин², В. А. Качанов⁸, А. А. Леонов², Ф. Лонго⁵, Е. П. Мазец⁴, П. Маестро⁹, П. Маррокези⁹, И. А. Мереминский², В. В. Михайлов², А. А. Моисеев¹⁰, Е. Моккьюти⁵, Н. Мори³, И. Москаленко¹¹, П. Ю. Наумов², П. Папини³, П. Пикоцца¹², В. Г. Родин¹³, М. Ф. Рунцо², Р. Спарволи¹², П. Спиллантини³, С. И. Сучков¹, М. Тавани¹⁴, Н. П. Топчиев¹, М. И. Фрадкин¹, М. Д. Хеймиц², Ю. Т. Юркин²

E-mail: tnp51@rambler.ru

Разрабатываемый в настоящее время γ -телескоп ГАММА-400 предназначен 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 проведения глубокого обзора небесной сферы с целью поиска и исследования дискретных источников γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, исследования γ -всплесков, γ -излучения активного Солнца. Рабочий диапазон измеряемых энергий ГАММА-400 от 100 МэВ до 3000 ГэВ. Гамма-телескоп имеет угловое разрешение $\sim 0.01^\circ$, энергетическое разрешение $\sim 1\%$ и коэффициент режекции протонов $\sim 10^6$. ГАММА-400 будет установлен на российской космической платформе “Навигатор”. Начало наблюдений планируется на 2018 год.

DOI: 10.7868/S036767651311015X

ВВЕДЕНИЕ

В списке особо важных проблем современной космологии на начало XXI века нобелевский лауреат академик В.Л. Гинзбург отметил “проблему темной материи и ее детектирования” [1]. Сегодня

хорошо известно, что плотность темной материи ($\sim 25\%$) во Вселенной в несколько раз превышает плотность обычной (барионной) материи ($\sim 5\%$). Одним из кандидатов на роль частиц темной материи являются вимпы (WIMPs – Weakly Interacting Massive Particles). В настоящее время ученые из разных стран мира проводят эксперименты по поиску вимпов, используя как прямые, так и косвенные методы детектирования. Косвенные методы основаны на регистрации в космическом излучении продуктов аннигиляции или распада вимпов, которыми могут быть обычные частицы и их античастицы (в том числе нейтрино, электроны, позитроны), а также γ -кванты. Гамма-кванты играют здесь существенную роль, поскольку они распространяются в космосе практически без взаимодействия и поэтому с их помощью можно определить направление на источник γ -излучения.

Обработка результатов измерений γ -телескопа Fermi-LAT из района центра Галактики указывает на особенность в спектре γ -излучения в области энергий 130 ГэВ [2]. Теоретические исследования

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

² Научный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва.

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

⁴ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург.

⁵ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, Trieste, Italy.

⁶ Открытое акционерное общество “Научно-исследовательский институт электромеханики”, Истра.

⁷ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, Троицк.

⁸ Федеральное государственное бюджетное учреждение “Государственный научный центр Российской Федерации – Институт физики высоких энергий”, Протвино.

⁹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa and Physics Department of University of Siena, Siena, Italy.

¹⁰ NASA Goddard Space Flight Center and CRESST/University of Maryland, Greenbelt, Maryland, USA.

¹¹ Hansen Experimental Physics Laboratory and Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Stanford University, Stanford, USA.

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

¹³ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, Москва.

¹⁴ Istituto Nazionale di Astrofisica – IASF and Physics Department of University of Rome “Tor Vergata”, Rome, Italy.

Таблица 1. Основные характеристики γ -телескопа ГАММА-400

Энергетический диапазон измерения γ -квантов	100 МэВ–3000 ГэВ
Угол обзора, ср	~ 1.2
Эффективная площадь, см ²	~ 4000
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 1\%$
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 0.01^\circ$
Толщина калориметра, р.е.д.	~ 25
Коэффициент режекции протонов	$\sim 10^6$
Объем передаваемой информации, Гбайт/сутки	100
Масса, кг	2600
Габаритные размеры, м	$2.0 \times 2.0 \times 3.0$
Энергопотребление, Вт	2000

этой особенности предполагают существование узких γ -линий от аннигиляции или распада вимпов, которые можно надежно выделить только с помощью будущих экспериментов с существенно лучшим угловым и энергетическим разрешениями [3–7].

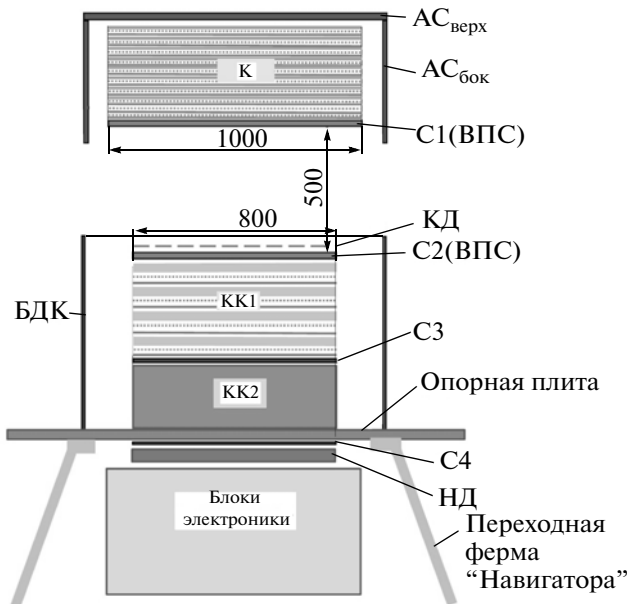


Рис. 1. Физическая схема γ -телескопа ГАММА-400: АС_{верх} – верхний антисовпадательный сцинтилляционный детектор; АС_{бок} – боковые антисовпадательные сцинтилляционные детекторы; К – конвертер-трекер; С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы; КК1 и КК2 – координатно-чувствительный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

В настоящее время в России реализуется программа создания гамма-телескопа ГАММА-400, отвечающего этим задачам, и проведения внеатмосферных наблюдений в гамма-астрономии с одновременным измерением потоков электрон-позитронной компоненты космических лучей. ГАММА-400 будет обладать уникальными возможностями как по выделению γ -линий в энергетических спектрах от частиц темной материи, так и по определению направления на источник этого излучения.

ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для измерения потоков γ -излучения и электрон-позитронной компоненты космических лучей, которые могут быть связаны с аннигиляцией или с распадом частиц темной материи, а также для проведения глубокого обзора небесной сферы с целью поиска и исследования дискретных источников γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, исследования γ -всплесков, γ -излучения активного Солнца в диапазоне энергий от 100 МэВ до 3000 ГэВ.

Основные характеристики ГАММА-400 приведены в табл. 1. Описанная ранее в [8, 9] физическая схема ГАММА-400 была изменена и представлена на рис. 1. Гамма-телескоп ГАММА-400 состоит из следующих систем и детекторов:

- верхнего (АС_{верх}) и боковых (АС_{бок}) антисовпадательных детекторов;

- конвертера-трекера (К), представляющего собой 10 прослоенных вольфрамом плоскостей двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых координатных детекторов (шаг 0.1 мм). Общая толщина конвертера-трекера составляет $1.0X_0$ (в настоящее время итальянскими и американскими специалистами рассматривается возможность установки в конвертере-трекере 15 дополнительных кремниевых стриповых плоскостей с целью улучшения характеристик ГАММА-400 в области энергий ниже 300 МэВ);

- времяпролетной системы (ВПС) из сцинтилляционных детекторов С1 и С2, разнесенных на 500 мм;

- координатно-чувствительного калориметра из двух частей:

- а) КК1, содержащего четыре слоя, каждый из которых представляет собой набор кристаллов CsI(Tl) и двухслойных (с взаимно перпендикулярным расположением стрипов) кремниевых стриповых детекторов с шагом 0.5 мм. Толщина КК1 составляет $3X_0$.

- б) КК2 из кристаллов ВГО (размером $25 \times 25 \times 250$ мм). Толщина КК2 составляет $22X_0$.

Общая толщина калориметра для нормального падения частиц составляет $25X_0$ или $1.2\lambda_0$. Общая толщина калориметра для бокового падения частиц $70X_0$ или $3.5\lambda_0$.

- сцинтилляционных детекторов С3 и С4;
- боковых детекторов калориметра (БДК);
- нейтронного детектора (НД).

Гамма-кванты конвертируются в электрон-позитронную пару в конвертере-трекере, которая в дальнейшем регистрируется в детекторах. Антисовпадающие детекторы помогают идентифицировать γ -кванты, а времяпролетная система определяет направление падающих частиц и формирует апертуру телескопа. Электромагнитный ливень, созданный электрон-позитронной парой, развивается в двух частях калориметра и регистрируется в калориметре и сцинтилляционных детекторах С3 и С4.

Регистрация γ -квантов осуществляется при отсутствии сигнала в АС. Регистрация электронов (позитронов) осуществляется при наличии сигнала в АС при пролете как сверху вниз, так и с боковых направлений.

Использование калориметра толщиной $\sim 25X_0$ позволяет расширить энергетический диапазон регистрируемых частиц до нескольких ТэВ и повысить энергетическое разрешение γ -телескопа до $\sim 1\%$ при энергиях более 10 ГэВ. Методом Монте-Карло была рассчитана зависимость энергетического разрешения ГАММА-400 от энергии падающих γ -квантов, представленная на рис. 2а (для сравнения приведена такая же зависимость для Fermi-LAT [10]). Видно, что в области энергий от 10 до 10000 ГэВ энергетическое разрешение составляет $\sim 1\%$, что крайне важно при выделении γ -линий от частиц темной энергии.

Высокое угловое разрешение достигается с помощью определения точки конверсии в многослойном конвертере и реконструкции оси ливня в КК1. Этот метод позволяет достичь высокого углового разрешения $\sim 0.01^\circ$ при энергиях более 100 ГэВ (рис. 2б), что позволит определить направление на источник γ -линий от частиц темной энергии.

При взаимодействии падающих частиц высокой энергии с веществом калориметра образуются частицы “обратного тока”, движущиеся в обратном направлении. Для исключения из регистрации таких событий наряду с общепринятым (Fermi-LAT [10, 11], AGILE [12]) сегментационным методом используется метод разделения падающих частиц и частиц “обратного тока” по времени пролета.

При регистрации электронов и позитронов с использованием калориметра, нейтронного и других детекторов, обеспечивается режекция протонов до $\sim 10^6$.

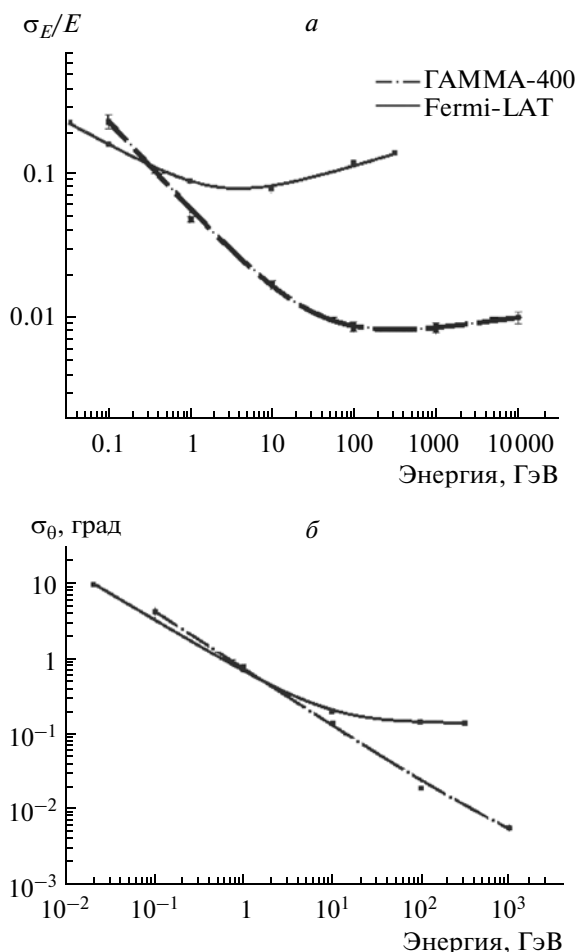


Рис. 2. Зависимости энергетического (а) и углового (б) разрешений от энергии для гамма-телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT.

Полученные характеристики ГАММА-400 позволят надежно выделять γ -линии от частиц темной материи. Для сравнения в табл. 2 приведены основные характеристики существующих и планируемых космических Fermi [10], AMS-2 [13] и наземных MAGIC [14], HESS-II [15], CTA [16] экспериментов. Видно, что характеристики ГАММА-400 значительно превосходят характеристики приведенных выше экспериментов.

Космическая обсерватория, в которой ГАММА-400 установлен на служебной платформе “Навигатор”, разрабатываемой в НПО им. С.А. Лавочкина, будет выведена в космос на высокоэллиптическую орбиту с начальными параметрами: апогей 300000 км, перигей 500 км, наклонение 51.8° . Примерно через полгода орбита эволюционирует до почти круговой с радиусом ~ 150000 км, т.е. обсерватория полностью выйдет из радиационного пояса Земли. Время жизни космической обсерватории не менее 7 лет. Запуск космической обсерватории планируется на 2018 г.

Таблица 2. Сравнение основных характеристик существующих и планируемых космических и наземных экспериментов

	Космические эксперименты			Наземные эксперименты		
	Fermi	AMS-2	ГАММА-400	H.E.S.S.-II	MAGIC	СТА
Диапазон энергий, ГэВ	0.02–300	10–1000	0.1–3000	>30	>50	>20
Поле зрения, ср	2.4	0.4	1.2	0.01	0.01	0.1
Эффективная площадь, м ²	0.8	0.2	0.4	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁶
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	0.2°	1.0°	~0.01°	0.07°	0.05°	0.06°
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	10%	3%	~1%	15%	15%	10%

Работа выполнена при поддержке Совета РАН по космосу и Федерального космического агентства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гинзбург В.Л. // УФН. 2004. Т. 174. № 11. С. 1240.
2. Bringmann T. et al. // arXiv:1203.1312.
3. Bergström L. et al. // arXiv:1207.6773.
4. Hooper D., Linden T. // arXiv:1208.0828.
5. Bringmann T., Weniger C. // arXiv:1208.5481.
6. Bergström L. // arXiv:1208.6082.
7. Hooper D. et al. // arXiv:1209.3015.
8. Galper A. et al. // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. P. 75.
9. Galper A. et al. // arXiv:1201.2490.
10. Atwood W.B. et al. // *Astrophys. J.* 2009. V. 697. P. 1071.
11. Moiseev A. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. P. 339.
12. Tavani M. et al. // arXiv:0807.4254.
13. Jacholkowska A. et al. // *Phys. Rev. D.* 2006. V. 74. 023518.
14. Magic Collaboration, Aleksic J. et al. // *Astropart. Phys.* 2012. V. 35. P. 435.
15. Stegmann C. et al. // *AIP Conf. Proc.* 2012. V. 1505. P. 194.
16. CTA Consortium // arXiv:1008.3703.