

УДК 629.7.001.5:52

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОЕКТА ГАММА-400

© 2011 г. А. М. Гальпер^{1,2}, Н. П. Топчиев¹, Р. Л. Аптекарь³, И. В. Архангельская²,
М. Боецио⁴, В. Бонвичини⁴, А. Вакки⁴, В. Я. Геча⁵, Б. А. Долгошеин², Н. Зампа⁴,
В. Г. Зверев², В. А. Каплин², В. А. Качанов⁶, Е. П. Мазец³, А. Л. Меньшенин⁵, П. Пикоцца⁷,
О. Ф. Прилуцкий⁸, В. Г. Родин⁸, М. Ф. Рунцо², П. Спиллантини⁹, С. И. Сучков¹,
М. О. Фарбер², М. И. Фрадкин¹, Ю. Т. Юркин²

E-mail: tnp51@rambler.ru

Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для исследования в диапазоне энергий 0.1–3000 ГэВ дискретных источников высокоэнергичного γ -излучения, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного γ -излучения, исследования γ -всплесков и γ -излучения активного Солнца. Гамма-телескоп имеет угловое разрешение $\sim 0.01^\circ$, энергетическое разрешение $\sim 1\%$ и коэффициент режекции протонов $\sim 10^6$. Специальная задача – измерение потоков γ -излучения, электронов и позитронов, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

ВВЕДЕНИЕ

Внеатмосферные наблюдения астрофизических объектов в высокоэнергичном γ -диапазоне позволяют получить чрезвычайно важную информацию об основополагающих процессах, протекающих как в дискретных источниках (пульсарах, галактиках с активными ядрами, блазарах и т.п.), так и в межгалактическом и межзвездном пространстве. Проведение внеатмосферных γ -астрономических наблюдений в диапазоне высоких энергий определяется возможностью преодоления целого ряда физико-технических трудностей, связанных с созданием γ -телескопов, обладающих высоким угловым и энергетическим разрешением, и с созданием космических аппаратов, позволяющих проводить эти наблюдения.

С момента первых внеатмосферных наблюдений было реализовано несколько программ: АННА-3 [1], SAS-II [2], COS-B [3], ГАММА-1 [4], EGRET

[5], AGILE [6], и наконец, FERMI [7], выполняемая в настоящее время.

Из результатов первого года наблюдений Fermi-LAT в диапазоне энергий 100 МэВ–100 ГэВ отметим следующее: 1) число зарегистрированных дискретных γ -источников, по сравнению с данными EGRET, возросло в несколько раз и достигло ~ 1500 (значительная часть источников не отождествлена [8]); 2) в области энергий 100 ГэВ не наблюдается согласие с результатами измерений наземными γ -телескопами [9]; 3) измеренный спектр диффузного γ -излучения от центральной части Галактики не совпадает с данными EGRET [10]; 4) подтверждено, что значительная часть дискретных источников обладает переменностью в γ -диапазоне [11].

На Fermi-LAT проведены также измерения суммарного потока e^- и e^+ до энергии в несколько сотен ГэВ [12]. В результате обнаружен некоторый избыток в $(e^- + e^+)$ -потоке, который, опираясь на результаты эксперимента PAMELA [13], интерпретируется в некоторых публикациях как результат аннигиляции или распада частиц темной материи.

Для успешного развития γ -астрономических наблюдений необходимо создание γ -телескопов следующего поколения, которые по сравнению с Fermi-LAT должны проводить измерения высокоэнергичного γ -излучения, по крайней мере до нескольких ТэВ, с более высокими энергетическим и угловым разрешениями, иметь более высокий уровень исключения фоновых событий как при измерении γ -квантов, так и при измерении e^- и e^+ .

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва.

² Научно-исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва.

³ Учреждение Российской академии наук Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

⁴ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Trieste, Italy.

⁵ Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики, Москва.

⁶ Институт физики высоких энергий, Протвино.

⁷ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma 2, and Physics Department of University of Rome “Tor Vergata”, Rome, Italy.

⁸ Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН, Москва.

⁹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze, and Physics Department of University of Florence, Italy.

1. ГАММА-ТЕЛЕСКОП ГАММА-400

Для повышения углового разрешения увеличивается пролетная база между конвертером и калориметром; используются координатные кремниевые стриповые детекторы с малым шагом для измерения точки конверсии γ -кванта в многослойном конвертере, места входа в калориметр и определения пространственной картины развития электронно-фотонного ливня в первой части калориметра.

Для расширения энергетического диапазона и увеличения точности измерения энергии регистрируемых высокоэнергичных γ -квантов, e^- и e^+ используется толстый (~30 р. е. д.) координатно-чувствительный калориметр из кристаллов ВГО, прослоенных кремниевыми стриповыми детекторами, общим размером вдоль оси телескопа, в 2–3 раза превышающим расстояние до максимума развития электромагнитного ливня.

Для подавления фона, создаваемого протонно-ядерной компонентой космических лучей, для формирования сигнала запуска телескопа при регистрации γ -квантов используются сегментированный антисовпадательный детектор и дополнительные сигналы системы “обратного тока” (для устранения методом времяамплитудного анализа эффекта от частиц, возникших при взаимодействии с веществом калориметра и движущихся в “обратном” направлении от калориметра к конвертору). На стадии наземной обработки и анализа зарегистрированных событий используются также показания детектора переходного излучения и нейтронного детектора.

Основные характеристики ГАММА-400 и физическая схема приведены в табл. 1 и на рис. 1. Гамма-кванты проходят без взаимодействия антисовпадательный детектор АС и конвертируются в $(e^- + e^+)$ -пару в многослойном конвертере К (0.84 р.е.д.). Времяпролетная система ВПС, состоящая из разнесенных на ~100 см детекторов С1 и С2 определяет направление прихода γ -кванта. Координатные детекторы КД7–КД8 определяют точки прохождения через них $(e^- + e^+)$ -пары, образовавшейся при конверсии γ -кванта. Далее $(e^- + e^+)$ -пара создает в двух частях координатно-чувствительного калориметра КК1 и КК2 (30.5 р.е.д. или 1.5 я.д.) электромагнитный ливень. Для определения количества частиц, выходящих из КК1 и КК2, установлены детекторы С3 и С4. Для выделения γ -квантов, e^- и e^+ из потока протонов космических лучей используются детектор переходного излучения ДПИ; КК2 по различию в продольном и поперечном профилях электромагнитного и адронного ливней; нейтронный детектор НД по количеству нейтронов, образовавшихся в калориметре при прохождении электромагнитного и адронного ливней. Суммарный коэффициент режекции протонов составляет $\sim 10^6$. В процессе измерений в γ -телескопе одновремен-

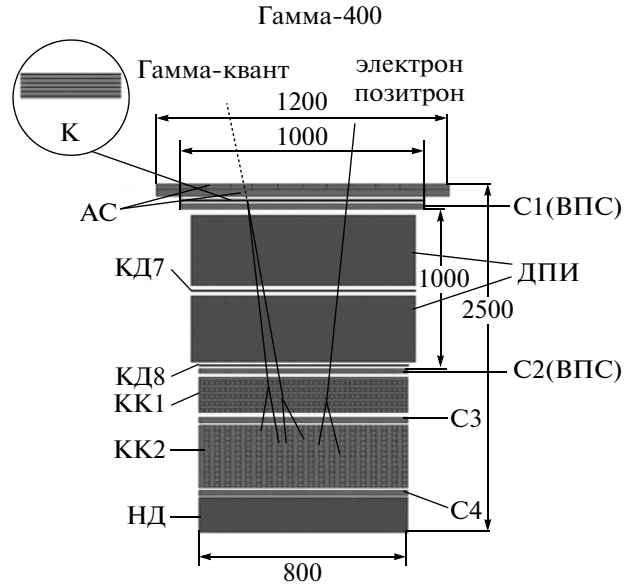


Рис. 1. Физическая схема γ -телескопа ГАММА-400: АС – антисовпадательный сцинтилляционный детектор; К – конвертор, состоящий из 6 слоев вольфрама толщиной 0.14 р.е.д. (К1–К6), прослоенных двойными (x, y) кремниевыми стриповыми координатными детекторами с шагом 0.1 мм (КД1–КД6); С1 (ВПС) и С2 (ВПС) – сцинтилляционные детекторы времяпролетной системы; КД7–КД8 – двойные (x, y) кремниевые стриповые координатные детекторы с шагом 0.1 мм; КК1 – координатно-чувствительный калориметр, состоящий из 10 слоев кристаллов ВГО размером $1 \times 2 \times 40$ см, прослоенных двойными (x, y) кремниевыми стриповыми координатными детекторами с шагом 0.5 мм; КК2 – координатно-чувствительный калориметр, полностью состоящий из кристаллов ВГО размером $2 \times 2 \times 40$ см; С3 и С4 – сцинтилляционные детекторы; ДПИ – детектор переходного излучения; НД – нейтронный детектор.

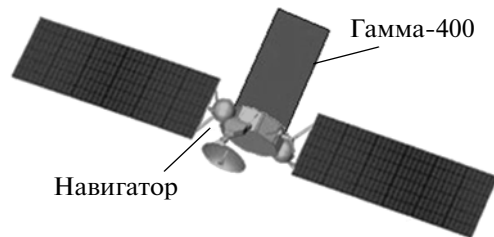


Рис. 2. Космическая обсерватория “ГАММА-400” с платформой “Навигатор”.

но используются две основные триггерные системы: первая – для регистрации γ -квантов (при отсутствии сигналов в АС), вторая – для регистрации e^- и e^+ (при наличии сигнала в АС).

Сравнение основных характеристик γ -телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT приведено в табл. 2. Видно, что угловое и энергетическое разрешения, а также режекция протонов у ГАММА-400 существенно лучше.

Таблица 1. Основные характеристики γ -телескопа ГАММА-400

Энергетический диапазон измерения γ -квантов	100 МэВ–3000 ГэВ
Чувствительная площадь, см ²	6400
Чувствительность ($E_\gamma > 100$ МэВ), фотон/(см ² · с)	$2 \cdot 10^{-9}$
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 0.01^\circ$
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 10$ ГэВ)	$\sim 1\%$
Толщина калориметра	30.5 р.е.д.
Коэффициент режекции протонов	$\sim 10^6$
Точность определения ориентации γ -телескопа (по звездному датчику)	0.005°
Объем передаваемой информации, Гбайт/сут	100
Масса, кг	2600
Максимальные размеры, м	$2.0 \times 2.0 \times 3.0$
Энергопотребление, Вт	2000

Таблица 2. Сравнение основных характеристик γ -телескопов ГАММА-400 и Fermi-LAT

	Fermi-LAT	ГАММА-400
Орбита, км	560	500–300000
Энергетический диапазон измерения γ -квантов	0.1–100 ГэВ	0.1–3000 ГэВ
Чувствительная площадь, м ²	1.6	0.64
Координатные детекторы	Si (x, y) стрипы с шагом 0.22 мм	Si (x, y) стрипы с шагом 0.1 мм
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	0.05°	0.01°
Калориметр	CsI	BGO + Si-стрипы
– толщина, р.е.д.	8.5	30.5
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 10$ ГэВ)	10%	$\sim 1\%$
Коэффициент режекции протонов	10^4	$\sim 10^6$
Чувствительность ($E_\gamma > 100$ МэВ), фотон/(см ² · с)	$\sim 5 \cdot 10^{-9}$	$\sim 2 \cdot 10^{-9}$

2. КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ “ГАММА-400”

Космическая обсерватория “ГАММА-400” (рис. 2), в которой ГАММА-400 установлен на платформе “Навигатор” (разрабатывается в НПО им. С.А. Лавочкина), будет выведена в космос на высокоэллиптическую орбиту с апогеем 300 000 км, перигеем 500 км, с наклоном 51.8°. Время жизни космической обсерватории не менее 7 лет. Время проведения наблюдений будет составлять не менее 90%. Предполагается, что будут реализованы три основных режима наблюдений: 1) режим γ -квантового мониторинга небесной сферы (поиск новых дискретных источников и мониторинг уже известных переменных источников); 2) длительное непрерывное наблюдение наиболее интересных дискретных источников; 3) автоматическая переориентация наблюдения по сигналу установленного на космической обсерватории “ГАММА-400” прибора “КОНУС” (для регистрации γ -всплесков), а также по команде с Земли, связанной со срочной информацией от других астрономических наблюдений, например, с информацией о солнечной активности.

Начало наблюдений планируется на 2016–2017 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волобуев С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. Т. 34. № 11. С. 2259.
2. Fichtel C. et al. // *Astrophys. J.* 1975. V. 198. P. 163.
3. Bignami G. et al. // *Space Sci. Instr.* 1975. V. 1. P. 245.
4. Akimov V. et al. // *Space Sci. Rev.* 1988. V. 49. P. 125.
5. Kanbach G. et al. // *Ibid.* P. 69.
6. Tavani M. et al. // *Nucl. Instrum. Methods. A.* 2008. V. 588. P. 52.
7. Atwood W.B. et al. // *Astrophys. J.* 2009. V. 697. P. 1071.
8. Abdo A.A. et al. // *Astrophys. J. Suppl.* 2010. V. 188. P. 405.
9. Abdo A.A. et al. // *Astrophys. J.* 2009. V. 707. P. 1310.
10. Tibaldo L. et al. // arXiv:1002.1576v1.
11. Гальпер А.М., Кириллов-Угрюмов В.Г., Лучков Б.И. // УФН. 1974. Т. 112. № 3. С. 491.
12. Bernardo G.Di. et al. // arXiv:0912.3887v1.
13. Adriani O. et al. // *Nature.* 2009. V. 458. P. 607.