

МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛЕТА ГАММА-КВАНТОВ В СИСТЕМЕ КОНВЕРТЕР И КАЛОРИМЕТЕР

А. М. Гальпер^{1,2}, С. В. Борисов², В. Г. Зверев², С. И. Сучков¹,
Н. П. Топчиев¹, М. О. Фарбер², М. И. Фрадкин¹, Ю. Т. Юркин²

В современной гамма-астрономии при проектировании приборов одной из важнейших задач остается достижение максимально высокого углового разрешения. Работа посвящена методу восстановления направления прилета первичного гамма-кванта с энергией $E_\gamma > 10$ ГэВ в спутниковом эксперименте ГАММА-400. На примере гамма-телескопа ГАММА-400 показаны возможности улучшения углового разрешения гамма-телескопов, содержащих систему “конвертер + калориметр”. Анализируется зависимость углового разрешения от шага кремниевых стрипов, используемых для определения координат падающих частиц в конвертере и калориметре, и расстояния между конвертером и калориметром.

Ключевые слова: гамма-телескоп, направление прихода квантов.

В современной гамма-астрономии при проектировании приборов одной из актуальных задач остается достижение максимально высокого углового разрешения. При этом принцип регистрации гамма-квантов часто [1–4] заключается в использовании двух блоков детекторов, один из которых представляет собой конвертер гамма-квантов, а второй – калориметр. Важной задачей при подготовке таких экспериментов является выбор методики для восстановления направления прилета гамма-кванта, которая для заданной конфигурации характеризуется угловым разрешением. В данной работе приведен метод восстановления направления прилета гамма-кванта в эксперименте ГАММА-400 [5, 6].

¹ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tnp51@rambler.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”.

Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для исследования дискретных источников высокоэнергетического гамма-излучения (остатков сверхновых, пульсаров, черных дыр, молекулярных облаков и т.д.) в диапазоне энергий 0.1-3000 ГэВ, измерения энергетических спектров галактического и внегалактического диффузного гамма-излучения, исследования гамма-всплесков, приходящих из космического пространства, гамма-излучения активного Солнца. Специальной задачей является изучение потоков гамма-излучения, электронов и позитронов, которые могут быть связаны с аннигиляцией или распадом частиц темной материи.

ГАММА-400 будет установлен на космическую платформу "Навигатор". Данный эксперимент проводится Физическим институтом имени П. Н. Лебедева РАН (Москва) в сотрудничестве с НИЯУ "МИФИ" (Москва), Национальным институтом ядерной физики (Италия), Всероссийским научно-исследовательским институтом электромеханики (Москва), Институтом физики высоких энергий (Протвино), Физико-техническим институтом им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Институтом космических исследований РАН (Москва).

Гамма-телескоп ГАММА-400 предназначен для регистрации гамма-квантов, электронов и позитронов с высоким угловым и энергетическим разрешением. Некоторые характеристики ГАММА-400 и вариант физической схемы приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Т а б л и ц а 1

Ожидаемые характеристики гамма-телескопа ГАММА-400

Диапазон энергий	100 МэВ – 3000 ГэВ
Чувствительная площадь, см ²	6400
Чувствительность ($E_\gamma > 100$ МэВ), фотон/(см ² с)	$\sim 2 \times 10^{-9}$
Угловое разрешение ($E_\gamma > 100$ ГэВ)	$\sim 0.01^\circ$
Энергетическое разрешение ($E_\gamma > 10$ ГэВ)	$\sim 1\%$
Режекция протонов	$\sim 10^6$

Принцип регистрации. Гамма-кванты проходят без взаимодействия антисовпадаемый сегментированный сцинтилляционный детектор АС и конвертируются в электрон-позитронную пару в конверторе К. Конвертор представляет собой 6 слоев вольфрама толщиной по 0.14 р.е.д. (радиационная единица длины), под каждым из которых расположены кремниевые стриповые (x, y) координатные детекторы КД1-КД6 с шагом 0.1 мм. С1 и С2 образуют времяпролетную систему ВПС, состоящую из двух

сцинтилляционных детекторов, разнесенных на расстояние 100 см. Кремниевый стриповый (x, y) координатный детектор КД7 с шагом 0.1 мм определяет точки прохождения через него электрон-позитронной пары, образовавшейся при конверсии гамма-кванта. Далее электрон-позитронная пара создает в двух частях координатно-чувствительного калориметра (КК1 и КК2) электромагнитный ливень. КК1 представляет собой сборку из 10 слоев кристаллов ВГО размером $1 \times 2 \times 40$ см³, прослоенных кремниевыми стриповыми (x, y) координатными детекторами с шагом 0.5 мм. КК2 собран полностью из кристаллов ВГО размером $2 \times 2 \times 40$ см³. Толщина КК1 составляет 10 р.е.д., КК2 – 21.5 р.е.д. Для определения количества частиц, выходящих из КК1 и КК2, установлены сцинтилляционные детекторы С3 и С4. Для выделения гамма-квантов, электронов и позитронов на фоне протонов космических лучей используются: детектор переходного излучения ДПИ, КК1 и КК2 – по отличию в продольном и поперечном профилях электромагнитного и адронного ливней, нейтронный детектор НД по количеству нейтронов, образовавшихся в калориметре при прохождении электромагнитного и адронного ливней.

В гамма-телескопе используется система “обратного тока”, позволяющая исключить срабатывание детектора АС, вызванное частицами, движущимися в обратном направлении от калориметра к АС. Для исключения “обратных” событий используется два метода: амплитудно-временной анализ, а также сегментирование детектора АС.

В процессе наблюдений (измерений) в гамма-телескопе одновременно используются две основные триггерные системы: первая – для регистрации гамма-квантов, при отсутствии сигналов в АС и вторая для регистрации электронов и позитронов, при наличии сигнала в АС.

В составе ГАММА-400 имеется система определения ориентации (звездный датчик), позволяющая знать направление оси гамма-телескопа с точностью до 0.005° .

Метод восстановления направления прилета гамма-квантов. Угловое разрешение гамма-телескопов отражает точность определения направления прилета регистрируемых гамма-квантов. На данный момент в связи с недостаточным угловым разрешением телескопа Fermi-LAT около половины зарегистрированных дискретных гамма-источников остаются неотождествленными [7]. Метод, который предполагается использовать в эксперименте ГАММА-400, дает существенно более высокое угловое разрешение по сравнению с существующими и проектируемыми телескопами.

Для восстановления направления прилета первичного гамма-кванта в данной работе используется информация с кремниевых стрипов плоскостей КК1 и с КД6. Алгоритм

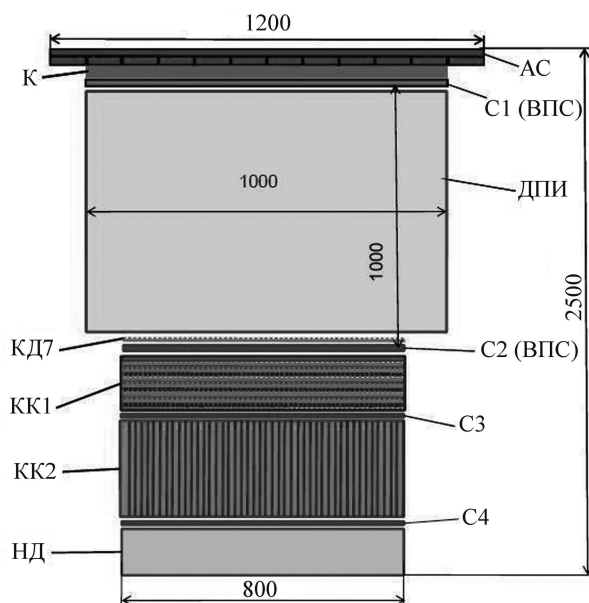


Рис. 1: Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400. АС – детектор антисовпадения, К – конвертер 6 слоев по 0.14 р.е.д. вольфрама + $Si(x, y)$ стриповые детекторы (шаг 0.1 мм), КД7 – $Si(x, y)$ стриповый детектор (0.1 мм), С1, С2 – ВПС детекторы, ДПИ – детектор переходного излучения, КК1 – позиционно-чувствительный калориметр (10 р.е.д.) 10 слоев – $Si(x, y)$ стриповые детекторы (шаг 0.5 мм) + ВГО (1 р.е.д.), КК2 – электромагнитный ВГО калориметр (21.5 р.е.д.), С3, С4 – сцинтилляционные детекторы, НД – нейтронный детектор.

восстановления заключается в следующих шагах:

1. На первом этапе определяется ось ливня, развившегося в КК1. Алгоритм определения оси описан подробно в статье [8] и успешно применялся при обработке данных в эксперименте РАМЕЛА [9]. Напомним суть метода:

1.1. Для каждой из стриповых плоскостей определяются центры тяжести \bar{x}_i (здесь и далее аналогично для y -координаты) потерь энергии по формуле:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_j x_{ij} E_j}{\sum_j E_j},$$

где j – номер стрипа в плоскости, E_j – потери энергии в j -ом стрипе, $i = 1 \dots 10$ – номера стриповых плоскостей. На первой итерации суммирование идет по всем стрипам плоскости (см. п. 1.3).

1.2. Полученная зависимость \bar{x}_i от глубины z_i (ось z перпендикулярна осям x и y)

фитируется как линейная функция методом наименьших квадратов. Т.е. коэффициенты функции

$$\bar{x} = A \cdot z + B \quad (1)$$

(здесь $z = 0$ соответствует плоскости $i = 1$) имеют вид:

$$A = \frac{\sum_2^{10} x_i z_i \omega_i - \sum_2^{10} x_i \omega_i \sum_2^{10} z_i \omega_i}{\sum_2^{10} z_i^2 \omega_i - \left(\sum_2^{10} z_i \omega_i \right)^2}, \quad (2)$$

$$B = \frac{\sum_2^{10} x_i \omega_i \sum_2^{10} z_i^2 \omega_i - \sum_2^{10} z_i \omega_i \sum_2^{10} x_i z_i \omega_i}{\sum_2^{10} z_i^2 \omega_i - \left(\sum_2^{10} z_i \omega_i \right)^2}. \quad (3)$$

Как видно, в данном случае рассматриваются плоскости со 2 по 10. Такой выбор обусловлен тем, что для рассматриваемых энергий в указанных плоскостях ливень достаточно развит [8].

Здесь $\omega_i = \frac{E_i}{E_{N_{\text{tot}}}}$ – веса, пропорциональные энерговыделению E_i в соответствующих плоскостях ($\sum_i \omega_i = 1$), $E_{N_{\text{tot}}}$ – полное энерговыделение в выбранном для восстановления оси ливня наборе плоскостей.

1.3. Затем предыдущие два шага повторяются в несколько итераций, при этом центр тяжести \bar{x}_i данной итерации вычисляется суммированием по стрипам, находящимся внутри области $\bar{x} \pm r_s$, где \bar{x} вычислен по формуле (1) в предыдущей итерации, а r_s – параметр, определяющий границы суммирования в количестве стрипов. Значение r_s выбиралось по результатам оптимизации. Таким образом, получены коэффициенты А и В (для каждой из проекций x и y), определяющие направление прихода гамма-кванта по данным КК1.

2. На следующем этапе используется информация с плоскостей КД6 (x и y):

2.1. Находится стрип j_{max} с максимальным энерговыделением внутри интервала $((A + dA)Z_{KD6} + B, (A - dA)Z_{KD6} + B)$, Z_{KD6} – z -координата КД6; dA выбрано равным 3σ расчетного распределения по А, полученного на основе данных моделирования и обработки этих данных по алгоритму 1.1–1.3. Таким образом, вводится ограничение на количество рассматриваемых стрипов КД6, что уменьшает влияние “обратного тока” от калориметра на получаемые результаты.

2.2. Итак, КД6 дает еще одну точку (по координатам x и y) $\bar{x}_{j_{\text{max}}}$, и снова получена зависимость \bar{x} от z (уже для 10 точек), которая фитируется линейной функцией

методом наименьших квадратов, что, как будет показано ниже, существенно улучшает разрешение по A в сравнении с п. 1. При этом для текущих A и B \bar{x} в КК1 находятся так же, как указано в п. 1.3, с тем же ограничителем r_s . Вес W_{KD6} точки $\bar{x}_{j\max}$ выбирается $W_{KD6} = \left(\frac{ds}{ds_{KD6}}\right)^2 \cdot \frac{Z_{KK1}}{Z_{KK1} + H} \cdot \frac{1}{N}$ где ds – шаг стрипов КК1, ds_{KD6} – шаг стрипов КД6; Z_{KK1} – толщина КК1 (равна примерно 15 см), H – расстояние между КД6 и КК1. $N = 10$ – число точек для фитирования. Здесь квадрат выражения $\left(\frac{ds}{ds_{KD6}}\right)$ обусловлен важностью относительной ширины стрипов КД6 с точки зрения вклада в вес точки. Веса остальных точек соответственно $\omega_i = (1 - W_{KD6}) \frac{E_i}{E_{N\text{tot}}}$.

2.3. Затем предыдущие два шага повторяются в несколько итераций, при этом на второй итерации dA уменьшается в 2 раза (значение выбрано, исходя из проведенных расчетов) по сравнению с первой. В последующие несколько итераций dA уменьшается на 10% каждую итерацию.

Как будет показано ниже, идея расположить конвертер (и стриповые детекторы) на расстоянии от калориметра дает значительный выигрыш в угловом разрешении.

Результаты. В среде Geant4.9.2.p03 [10] проведено моделирование прохождения потоков гамма-квантов различных энергий через гамма-телескоп ГАММА-400. Результаты моделирования обрабатывались программами восстановления направления прилета гамма-кванта.

На рис. 2 представлены распределения восстановленных значений A (A – это тангенс угла наклона к оси z) при восстановлении только по данным КК1 (рис. 2(а)) и для системы КК1 + КД6 (рис. 2(б)) для вертикального потока гамма-квантов. Частицы падают в центр прибора. Энергия гамма-квантов равна 100 ГэВ. Расчеты приведены для следующей конфигурации: $H = 60$ см; шаг стрипов КД6 – 0.1 мм, шаг стрипов КК1 – 0.5 мм. Из сравнения двух распределений видно, что добавление точки возле конвертера в этом случае улучшает угловое разрешение на порядок (значения приведены в градусах). Под угловым разрешением в данной работе принимается среднее квадратичное отклонение соответствующего распределения по A .

На рис. 3 приведена зависимость углового разрешения только КК1 от энергии для шагов стрипов 0.5 мм и 1.0 мм.

Как и следовало ожидать, угловое разрешение КК1 улучшается при уменьшении шага стрипов.

На рис. 4 приведена зависимость углового разрешения системы КД6 + КК1 гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии для различных шагов стрипов при расстоянии меж-

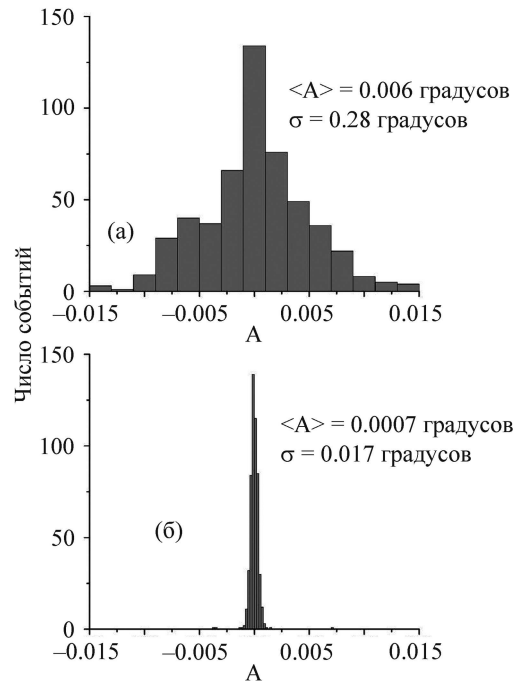


Рис. 2: Распределения восстановленных значений A (а) только по данным $KK1$; (б) по данным системы $KK1 + KДБ$.

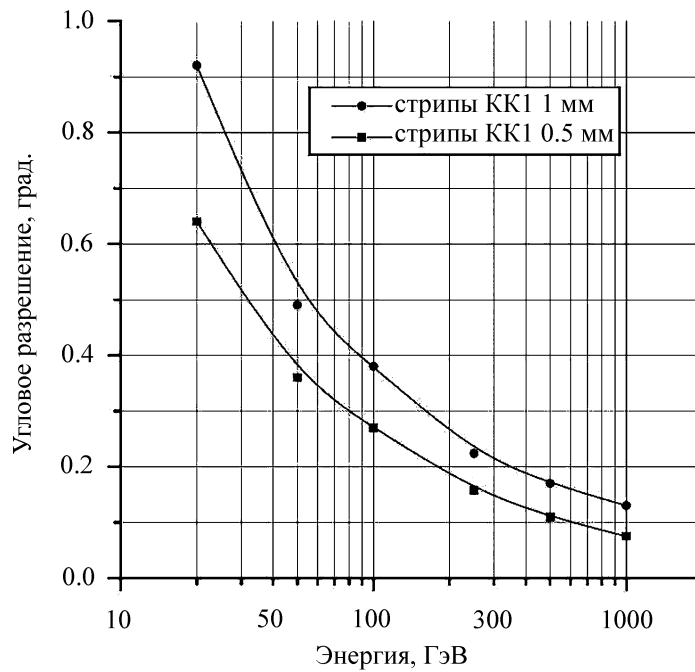


Рис. 3: Зависимость углового разрешения системы $KK1$ от энергии.

ду конвертером и калориметром $H = 60$ см. Здесь параметр $r_s = 10$ для всех точек, кроме точек для конфигурации КД6 – 0.5 мм; КК1 – 0.5 мм, где для точек $E = 250, 500, 1000$ ГэВ по результатам оптимизации выбран $r_s = 15$. Наилучшее разрешение из рассмотренных конфигураций получено для стрипов КД6 – 0.1 мм и стрипов КК1 – 0.5 мм.

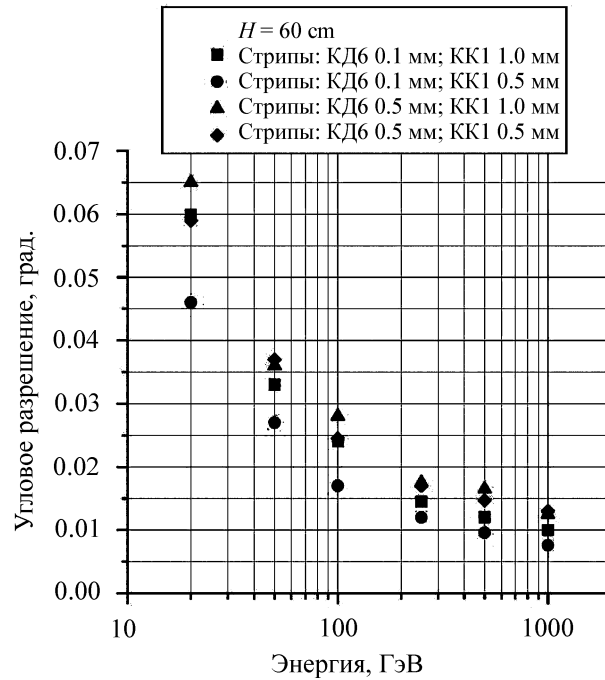


Рис. 4: Зависимость углового разрешения системы КД6 + КК1 гамма-телескопа ГАММА-400 от энергии.

На рис. 5(а) и 5(б) приведена зависимость рассчитанного углового разрешения ГАММА-400 (для конфигурации: КД6 – 0.1 мм; КК1 – 0.5 мм) от расстояния между конвертером и калориметром для энергий 100 и 1000 ГэВ, соответственно. Как и ожидалось, зависимости приблизительно линейные.

На рис. 6 приведены зависимости углового разрешения ГАММА-400 от энергии для конфигурации: шаг стрипов КД6 – 0.1 мм; шаг стрипов КК1 – 0.5 мм. Рассмотрены значения $H = 60$ см и $H = 100$ см.

Таким образом, для конфигурации гамма-телескопа ГАММА-400 (шаг стрипов КД6 – 0.1 мм; шаг стрипов КК1 – 0.5 мм; $H = 100$ см) имеем угловое разрешение лучше 0.015° для энергии гамма-квантов более 100 ГэВ, что существенно лучше, чем у существующих и проектируемых гамма-телескопов.

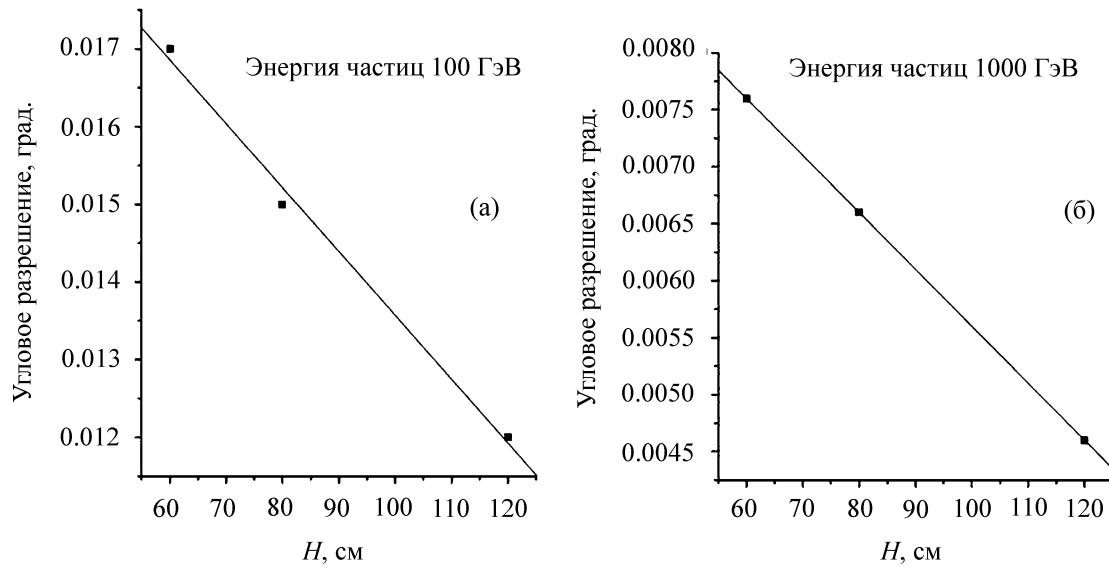


Рис. 5: Зависимость углового разрешения ГАММА-400 от расстояния между конвертером и калориметром (H), (а) для энергии частиц 100 ГэВ, (б) 1000 ГэВ.

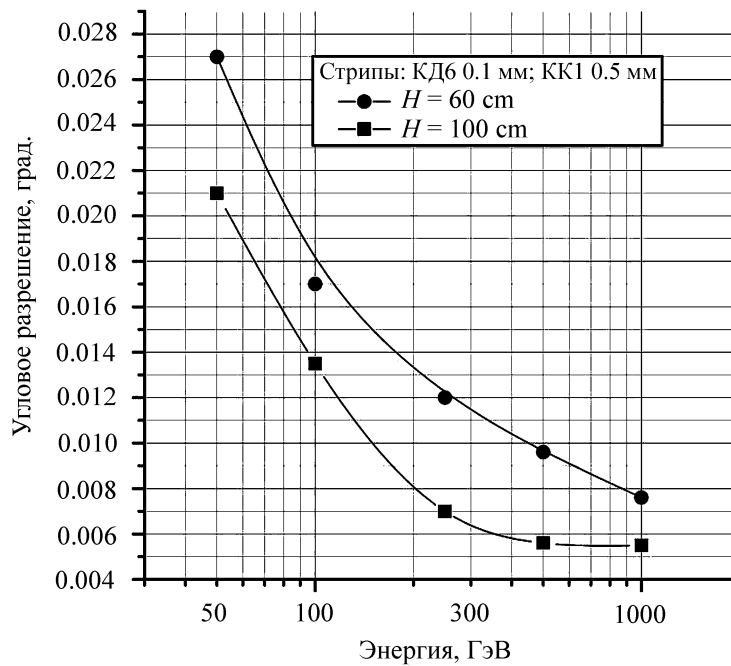


Рис. 6: Зависимость углового разрешения ГАММА-400 от энергии для различных H .

В дальнейшем для улучшения точности определения направления прилета гамма-квантов в ГАММА-400 планируется также использовать информацию с детекторов

КД1–КД5 (что позволит лучше определять точку конверсии гамма-кванта и соответственно уменьшит роль многократного рассеяния в конвертере), КД7 и ВГО детекторов. Также планируется учитывать распределение заряда по стрипам при прохождении частицы (что улучшает координатное разрешение детекторов).

Точность определения направления прилета гамма-квантов определяется как конфигурацией гамма-телескопа так и методикой обработки получаемых данных. Большинство современных гамма-телескопов включает в себя систему из конвертера гамма-квантов и калориметра. В данной работе на примере телескопа ГАММА-400 показана зависимость углового разрешения системы от параметров конфигурации, таких как шаг стрипов и расстояние между конвертером и калориметром. Также представлена методика восстановления направления прилета частицы, основанная на методике, использованной в эксперименте PAMELA и оптимизированная под новые задачи.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] F. Diego Torres et al., *Advances in Space Research* **33**, 450 (2004).
- [2] M. Basset et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **572**, 474 (2007).
- [3] John F. Krizmanic et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **418**, 161 (1998).
- [4] S. Torii et al., *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements* **166**, 43 (2007).
- [5] V. Ginzburg et al., *The GAMMA-400 Project*, Preprint LPI, no. 10 (Moscow, LPI, 2009).
- [6] А. М. Гальпер и др. *Известия РАН, сер. физ.*, № 3, 471 (2011).
- [7] A. A. Abdo et al., *Astrophys. J. Suppl.* **188**, 405 (2010).
- [8] А. В. Карелин и др., *Письма в ЭЧАЯ*, № 1 (157), 68 (2010).
- [9] M. Circella et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **518**, 153 (2004).
- [10] S. Agostinelli et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **506**, 250 (2003).

Поступила в редакцию 20 января 2011 г.