

ПРОЕКТ ОЛВЭ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2009 г. Д. М. Подорожный¹, Э. В. Аткин², Л. С. Бурылов³, А. Г. Воронин¹, Н. В. Кузнецов¹, М. М. Меркин¹, Р. А. Мухамедшин⁴, А. Ю. Павлов³, А. В. Романов³, Л. Г. Свешникова¹, Л. Г. Ткачёв⁵, А. Н. Турундаевский¹, А. П. Чубенко⁶

E-mail: ant@eas.sinp.msa.ru

Представлены предложения по Обсерватории лучей высоких энергий (ОЛВЭ) в составе комплекса научной аппаратуры с повышенной энерговооруженностью. При длительном экспонировании (>7 лет) предлагается провести исследования спектра и зарядового состава ядер КЛ вплоть до $E_0 \sim 10^{16}$ эВ, определить ход энергетического спектра электронов КЛ в области энергий >100 ГэВ и гамма-излучения в области энергий >50 ГэВ. Геометрический фактор аппаратуры в зависимости от типа частиц составляет $6.0\text{--}9.0 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$.

ВВЕДЕНИЕ

Современная экспериментальная техника требует предельно допустимой точности в изучении процессов взаимодействия частиц высоких энергий. Детекторы вторичных заряженных и нейтральных частиц на современных ускорителях представляют собой сложнейшие комплексы, имеющие в своем составе несколько миллионов независимых датчиков. Использование ускорительных технологий физики высоких энергий в космофизических экспериментах с космическим излучением при энергиях $10^{12}\text{--}10^{16}$ эВ сдерживается прежде всего, благодаря жестким ограничениям на потребляемую мощность в орбитальных комплексах. Даже с учетом успешного развития субмикронных и нанотехнологий в современной микроэлектронике трудно ожидать в обозримом будущем снижения требования к мощности потребления на один канал менее 5–10 мВт. Таким образом, современный комплекс, в состав которого входит несколько сотен тысяч независимых датчиков, практически нереализуем для орбитального эксперимента, в котором используются в качестве источников питания солнечные батареи, вследствие чего появление космических платформ с повышенной энерговооруженностью на основе ядерно-энергетической установки открывает принципно

ально новые возможности для исследования космических излучений высоких энергий.

1. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Чрезвычайно актуальна задача проверки астрофизических моделей рождения, ускорения и распространения космических лучей (КЛ) высоких энергий в нашей Галактике, в частности одной из центральных проблем – определения природы феномена первого излома в энергетическом спектре КЛ, обнаруженным по данным ШАЛ в области энергий $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ [1]. Недостаток экспериментальных данных по соотношению интенсивностей вторичных к первичным ядрам КЛ при высоких энергиях не позволяет выбрать модель перехода от наблюдаемого потока КЛ к спектру в источниках; определить, существует ли доускорение КЛ во время распространения до Земли, а также уточнить информацию о структуре гало Галактики, наличии крупномасштабных турбулентностей и галактического ветра [2]. Одной из основных особенностей КЛ является сильная анизотропия их потока [3]. По причине недостатка статистического объема экспериментальных данных оценку анизотропии определяют на Земле обычно по спектрам мюонов, которые отражают, в первую очередь, первичные спектры протонов.

Измерение спектров электронов в области высоких энергий чрезвычайно актуально с точки зрения исследования гипотезы о близком источнике частиц. Энергетические потери ускоренных электронов на синхротронное излучение и обратное комптоновское рассеяние пропорциональны квадрату энергии, поэтому спектры электронов КЛ за

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

² Московский инженерно-физический институт.

³ ФГУП КБ “Арсенал”, Санкт-Петербург.

⁴ Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН, Москва.

⁵ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна.

⁶ Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва.

метно мягче спектров заряженной компоненты. Предположительно, при энергии несколько ТэВ они могут доходить до Земли только в случае их происхождения в близком (1 кпк по расстоянию) и молодом (не более 10^5 лет по возрасту) источнике [4, 5]. Кроме того, последнее время ряд исследователей считают, что неоднородности в спектре электронов в КЛ могут помочь в поиске частиц темной материи [6].

Исследование диффузного гамма-излучения высоких энергий предоставляет уникальную возможность исследования КЛ вдали от Солнечной системы, причем как в нашей Галактике, так и за ее пределами. Выделение фона экстрагалактического диффузного излучения потенциально содержит в себе информацию о ранних стадиях Вселенной, новых источниках. Как и в случае энергетического спектра первичных электронов в последнее время ряд исследователей считают, что неоднородности в спектре гамма-излучения в области энергий >50 ГэВ могут помочь в поиске частиц темной материи [7].

Первые предположения о частицах странной материи были выдвинуты в 70-х годах прошлого века, их поиски продолжаются в настоящее время. Рядом исследователей было показано, что кварковая материя, составленная из известных кварков, но в определенном их соотношении, может иметь меньшую энергию на барион, чем обычные ядра, и такие ядра могут быть базовым состоянием вещества [8]. Странная материя может быть стабильной и метастабильной, и если она существует, то должна сильно влиять на формирование нейтронных звезд [9]. При их слиянии могут образовываться странглеты (частицы с аномально малым отношением заряда и массового числа Z/A) среди потока обычных КЛ [10]. Обнаружение странглетов или определение нового верхнего предела на их поток может дать возможность тестирования гипотезы странной материи.

2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАУЧНОЙ АППАРАТУРЕ

Совместный анализ всех компонент космического излучения высоких энергий очень плодотворен. Комплексное их изучение позволяет иметь целостную картину высокоэнергичных катастрофических галактических и метагалактических процессов взаимодействия вещества, имитация которых невозможна в земных условиях. Но именно в этих процессах можно найти ключевые ответы на самые фундаментальные вопросы мироздания. Главной сложностью одновременного экспериментального изучения частиц высоких энергий разного типа является тот факт, что их потоки различаются на несколько порядков по своей интенсивности. Кроме того, аппаратура для регистрации каждой из компонент имеет свои характерные особенности.

Фактор экспозиции для измерения ядер КЛ должен быть не менее $10000 \text{ м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{сут}$, что при гарантийном сроке эксплуатации космического аппарата, например более 7 лет, влечет за собой требование к величине эффективного геометрического фактора не менее $4 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$ для всех компонент, включая протоны. Аппаратура должна уверенно разделять ядра КЛ по зарядовым группам во всем исследуемом диапазоне энергий 10^{14} – 10^{16} эВ/частица. Энергетическое разрешение должно составлять не менее 50%. Вероятность ошибочной идентификации протонов в области энергий 10^{15} – 10^{16} эВ/частица не должна превышать 10% (с учетом воздействия обратного тока). Для эффективного выделения вторичных ядер в общем потоке вероятность ошибочной идентификации вторичных ядер (Li, Be, B, ядра группы subFe) в области энергий 10^{11} – 10^{14} эВ/частица не должна превышать 20% с учетом воздействия физических флуктуаций, всех искажающих факторов и учета реальных потоков излучения. При указанном факторе экспозиции для измерения КЛ в аппаратуре необходимо обеспечить порог регистрации КЛ на уровне 10^{11} эВ, что позволит детально изучать анизотропию.

Поток электронов имеет интенсивность на два-три порядка ниже, чем поток первичных протонов, поэтому необходимо в аппаратуре осуществить уровень коэффициента режекции (коэффициент подавления потока протонов по отношению к потоку электронов) не менее $K_p \approx 10^{-4}$ в области энергий $>10^{12}$ эВ. Для определения неоднородностей в спектре энергетическое разрешение должно составлять не менее 30%.

Ожидаемый поток диффузного гамма-излучения в области энергии $>10^{11}$ эВ приблизительно в 10 раз ниже, чем поток электронов, что требует увеличения коэффициента режекции до уровня $K_p \sim 10^{-5}$.

Частицы странной материи (странглеты) характеризуются аномально малым соотношением Z/A , поэтому аппаратура должна выделять такие частицы из общего потока КЛ по этому параметру с коэффициентом режекции не менее $K_p \sim 10^{-4}$ в области энергий 10^{12} – 10^{14} эВ.

3. ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СОСТАВУ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ОЛВЭ

Для максимально возможного увеличения геометрического фактора научной аппаратуры планируется разработать и изготовить трехмерный мелкосекционный ионизационный калориметр (ИК) кубической формы. Для обеспечения максимального эффективного фактора экспозиции материал поглотителя ИК должен представлять собой композит из легкого и тяжелого вещества. Глубина ИК должна составлять не менее 20 каскадных единиц. В состав композиционного веще-

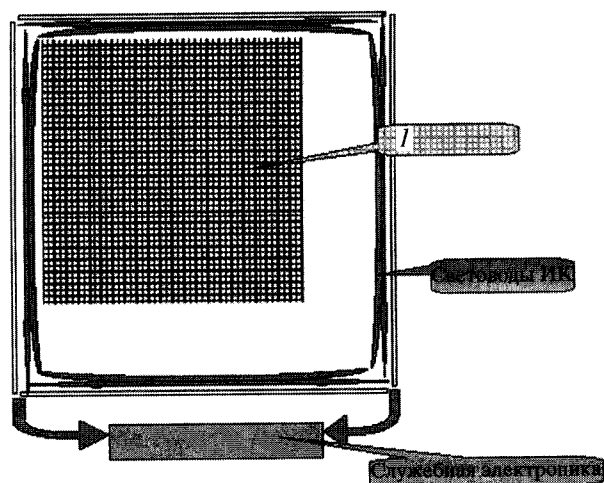


Рис. 1. Схематическое изображение состава научной аппаратуры. 1 – секционированный сцинтилляционный калориметр.

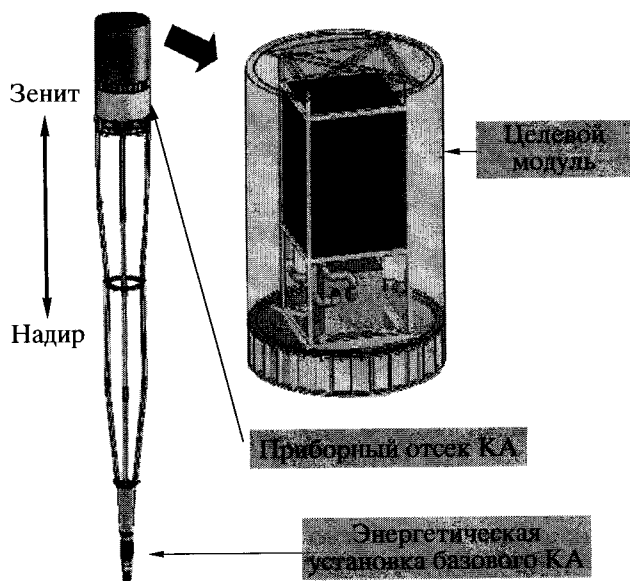


Рис. 2. Вариант размещения целевого модуля ОЛВЭ на базовом КА.

ства ИК должен входить гадолиний для захвата нейтронов и последующей запаздывающей эмиссии гамма-квантов. Все датчики ИК должны иметь дополнительный режим работы счетчиков ней-

тронов, который включается после считывания полезного сигнала до момента выработки следующего триггера. Режим счетчиков нейтронов остается включенным вплоть до прихода следующего триггера.

Детектирование заряда предлагается осуществить при помощи нескольких (не менее четырех) слоев падовых кремниевых детекторов. Система должна перекрывать площадь всех шести граней кубического ИК с минимальными технологическими зазорами, размер пада $\sim 1 \text{ см}^2$.

Для определения энергии кинематическими методами аппарата должна определять образ пространственной плотности распределения вторичных частиц каскада по двум координатам с погрешностью $\sim 17 \text{ мкм}$. Система должна обеспечивать регистрацию как минимум двух точек максимума каскада, для этой цели необходимо как минимум четыре слоя микростриповых детекторов с расположением стрипов соседних слоев во взаимно ортогональных направлениях. Погрешность в определении проекции оси каскада в область детекторов заряда, расположенных на противоположной грани ИК, должна составлять десятые доли мм.

Схематическое изображение состава научной аппаратуры приведено на рис. 1.

4. ЭФФЕКТИВНЫЙ ФАКТОР ЭКСПОЗИЦИИ

В табл. 1 приведены значения эффективного геометрического фактора и фактора экспозиции в зависимости от типа частиц и глубины каскада. Данные получены при помощи Монте-Карло-моделирования трехмерного ИК с габаритными размерами $850 \times 850 \times 850 \text{ мм}$. Плотность композиционного материала $\sim 5.6 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

5. ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗМЕЩЕНИЮ ОЛВЭ НА БАЗОВОМ КА

Предварительный вариант размещения целевого модуля ОЛВЭ НУКЛОН на базовом космическом аппарате (КА) представлен на рис. 2. Основные характеристики ОЛВЭ приведены в табл. 2. Основные характеристики базового КА приведены в табл. 3.

Таблица 1

	Глубина каскада X , рад.ед.	ρ	He	C	Fe	e, γ
Геометрический фактор, $\text{м}^2 \cdot \text{ср}$	5	6.1	6.9	7.7	9.1	–
	15	4.2	4.9	5.6	6.9	7.1
Фактор экспозиции (за 7 лет), $\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{год}$	5	42.7	48.3	53.9	63.7	–
	15	29.4	34.3	39.2	48.3	49.7

Таблица 2

Аппаратура	Масса, кг	Кол-во каналов	Вт
Ионизационный калориметр/световоды	2100	50000	5000
Система измерения заряда	160	250000	600
Трекер и кинематический спектрометр энергии	160	400000	3000
Служебная электроника	50		2500
Кабельная система	10		
Силовая конструкция	100		
ГК и СОТР*	220		
Суммарно	2800	700000	11500

* Гермоконтейнер и система обеспечения терморегуляции.

Таблица 3

Параметр	Значение
Высота рабочей орбиты КА, км	1500
Ориентация КА на орбите	Трехосная
Точность ориентации, град	± 0.5
Объем телеметрии	$4 \text{ Гб} \cdot \text{сут}^{-1}$
Точность стабилизации, град $\cdot \text{с}^{-1}$	± 0.005
Уровни нейтронного и гамма-излучений от источника энергии	
Флюенс нейтронов ($E > 0.1 \text{ МэВ}$), нейтрон $\cdot \text{см}^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{11}$
Поглощенная доза фотонов, рад	$7.4 \cdot 10^4$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проект ОЛВЭ нацелен на решение актуальных задач экспериментальной физики космического излучения высоких энергий. Масштабность решаемых научных задач требует создания исключительно сложной, не имеющей аналогов научной аппаратуры, что возможно только при использовании КА нового поколения с повышенной энергооборуженностью.

Задачи экспериментальной физики космических излучений ОЛВЭ носят фундаментальный характер, и как показывает ход истории “новой” физики, рожденной в конце XIX – начале XX века, решение ключевых вопросов фундаментального естествознания кардинально влияет на весь научно-технический прогресс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернов С.И., Соловьева В.И., Хренов Б.А., Христиансен Г.Б. Космические лучи и проблемы космофизики. Новосибирск: Наука, 1964. С. 103.
2. Berezhko E.G., Volk H.J. // *Astron. and Astrophys.* 2000. V. 357. P. 283.
3. Munakata K. et al. // *Phys. Rev. D.* 1997. V. 56. P. 23.
4. Bell A.R., Lucek S.G. // *Mont. Not. RAS* 2001. V. 321. P. 433.
5. H.E.S.S. <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS.html>
6. Yiou F. et al. // *J. Geophys. Res.–Oceans.* 1997. V. 102. P. 26783.
7. Valle G. // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 424. P. 765.
8. Hofman W. http://www-rccn.icrr.u-tokyo.ac.jp/icrc2003/talks/HESS_Lecture-Hofmann.pdf
9. Hörandel J.R. *astro-ph/0508014*. 2005.
10. Hunter S.D. et al. // *Astrophys. J.* 1997. V. 481. P. 205.