

Известно, что в реакциях радиационного захвата нейтронов (*s*- и *r*-процессы) образуются химические элементы. В результате фотоядерных реакций происходит образование наиболее легких стабильных изотопов данного элемента. В ряде случаев реакции, идущие под действием интенсивных потоков γ -квантов, могут быть основным механизмом образования таких изотопов. По аналогии с *s*- и *r*-процессами в звездах в реакциях, идущих под действием γ -квантов, следует учитывать две возможности образования легких изотопов данного химического элемента:

1) путем движения вдоль левой границы долины стабильности изотопов — к ядрам с меньшим *Z* (медленный γ -процесс);

2) под действием взрывных, интенсивных потоков γ -квантов (быстрый γ -процесс), в результате чего первоначально образуются ядра, сильно перегруженные протонами, а распад протоноизбыточных ядер приводит к образованию наиболее легких стабильных изотопов.

Литература

1. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1998. № 1. С. 22.
2. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 2. С. 6 (Moscow University Phys. Bull. 1997. No. 2. P. 8).
3. Бородина С.С., Ишханов Б.С., Мокеев В.И., Павлов С.И. Препринт НИИЯФ МГУ № 99-32/950. М., 1999.
4. Borodina S.S., Ishkhanov B.S., Mokeev V.I. // Intern. Nucl. Phys. Conf. (INPC/98), August 24–28. Paris, 1998. P. 794.
5. Brun R., Bruyant F., Maire M. et al. GEANT 3.21 (User's Guide). CERN, Geneva, Switzerland, 1987.
6. Nuclear Wallet Cards. N. Y., 2000 (<http://www.nndc.bnl.gov>).
7. Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. Atlas of Giant Dipole Resonance. IAEA Nuclear Data Section. Austria, Vienna, 1999.
8. Dietrich S., Berman B.L. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1998. No. 38. P. 199.

Поступила в редакцию
05.04.00

УДК 539.167; 537.591

ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В. В. Александров, Д. И. Бугров, Г. К. Гарипов, А. Кордеро, Дж. Линсли,
У. Салазар, О. А. Сапрыкин*), А. А. Силаев, В. С. Сыромяников*),
М. И. Панасю Б. А. Хренов

(НИИЯФ)

Приводится описание экспериментальной установки для изучения космических лучей предельно высоких энергий, которая может быть установлена на борту российского сегмента Международной космической станции.

Для решения одной из самых актуальных проблем астрофизики — поиска источников космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) с энергией каждой частицы выше 10^{19} эВ и объяснения происхождения частиц столь высоких энергий — создается прибор для исследования КЛ ПВЭ (оптическая камера с площадью зеркала более 10 м^2 и сеткой фотоприемников в его фокусе, регистрирующая флуоресценцию атмосферы Земли с орбиты спутника Земли — рис. 1). Проект изучения КЛ ПВЭ с помощью оптического детектора на борту российского сегмента Международной космической станции предложен в 1997 г. [1].

Имеющиеся данные о существовании частиц с энергией $(2-3) \cdot 10^{20}$ эВ (выше энергии «реликтового обрезания» спектра космических лучей [2, 3]) могут быть объяснены либо присутствием новых астрофизических объектов — ускорителей заряженных частиц, находящихся в Галактике или в галактиках, расположенных на расстояниях не далее 50 Мпк,

либо «высыпанием» частиц «Великого объединения» с массой 10^{24} эВ из «топологических дефектов», допускаемых космологической теорией [4].

Для детектирования космических лучей сверхвысокой энергии на поверхности Земли приходится создавать дорогостоящие сети из большого числа детекторов частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ): действующая установка AGASA [5], проект ШАЛ-1000 [6], или сети из оптических станций регистрации флуоресцентного трека ШАЛ: установка Hires [7], проект TA [8], или сеть из детекторов обоих типов: проект Оже — «The Pierre Auger Observatory» [9]. Так, в проекте Оже для наблюдения космических лучей в области энергий $10^{19}-10^{21}$ эВ создается сеть из более чем 3000 детекторов частиц (площадь каждого 10 м^2), покрывающих площадь на поверхности Земли до 6000 км^2 . Для регистрации флуоресцентных треков ШАЛ создается система оптических детекторов, содержащих около 200 зеркал-концентраторов сигнала (эффективная площадь

*) Ракетно-космическая корпорация «Энергия». Консорциум «Космическая регата».

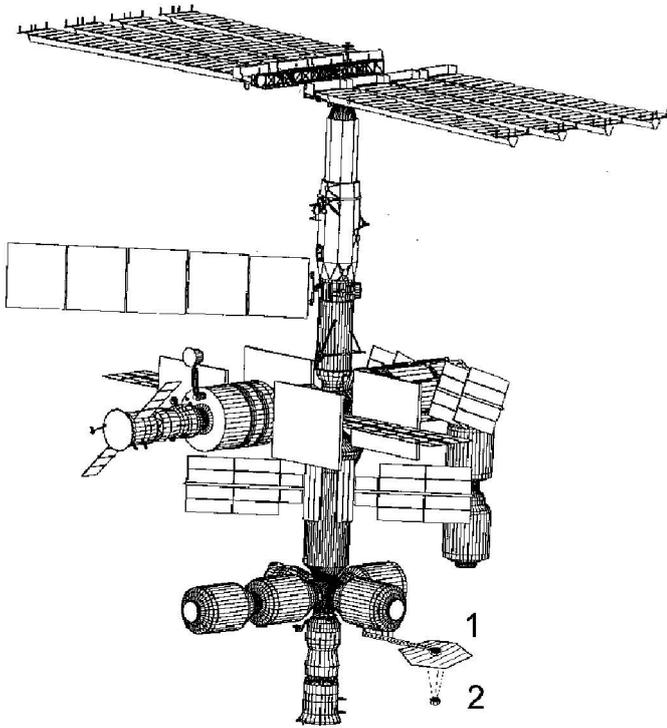


Рис. 1. Общий вид российского сегмента Международной космической станции с детектором КЛ ПВЭ: 1 — зеркало детектора, 2 — фотоприемник

каждого около 3 м^2) и до 30 000 фотоумножителей (фотоумножителей). Создание подобных детекторов — непростая задача. При наблюдении флуоресцентных треков ШАЛ в тропосфере возникают принципиальные трудности, связанные с поглощением света и нестабильностью прозрачности атмосферы из-за присутствия аэрозолей.

Наблюдение флуоресцентных треков ШАЛ с орбиты спутника оказывается более эффективным: один оптический детектор может просматривать огромные площади атмосферы Земли. Предлагаемый оптический детектор КЛ ПВЭ на российском сегменте Международной космической станции будет иметь геометрический фактор больше, чем в наземных установках ($2 \cdot 10^4 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$ на первом этапе) и позволит за один-два года работы на станции набрать статистические данные, необходимые для решения проблемы происхождения космических лучей с энергиями $10^{19} \div 3 \cdot 10^{20} \text{ эВ}$. На рис. 2 представлен ожидаемый энергетический спектр первичных частиц (в соответствии с имеющимися наземными данными установки AGASA [10]) со статистическими ошибками в случае измерений на орбите детектором КЛ ПВЭ в течение года работы. Следует отметить, что при измерениях с помощью детектора КЛ ПВЭ в области энергий, больших $3 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$, погрешность определения энергии в каждом событии будет менее 10%, в то время как в работе [10] она составляет 30%. Главным результатом подобных измерений будет проверка наличия «провала» в спектре при энергиях около $5 \cdot 10^{19} \text{ эВ}$ (на рис. 2 «провал» в интенсивности составляет 5 стандартных отклонений от ожидаемого «регулярного» спектра). Быстрое уменьшение интенсивности частиц будет указывать

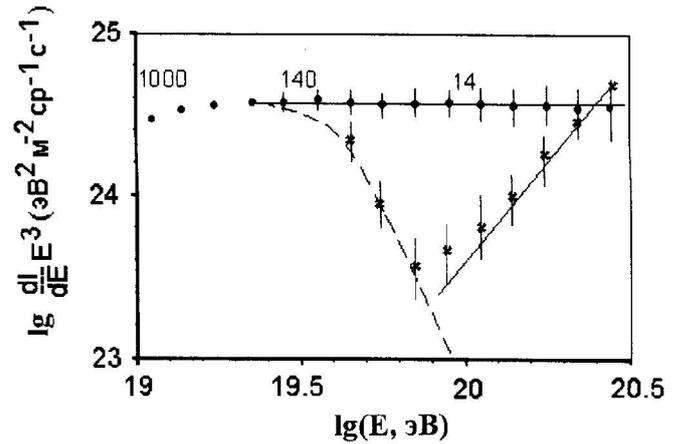


Рис. 2. Ожидаемый энергетический спектр космических лучей, который может быть получен в результате измерений с помощью детектора КЛ ПВЭ в течение года работы на орбите (абсолютная интенсивность основана на данных [10]): кружки — степенной спектр с дифференциальным показателем 3, крестики — спектр с «провалом» в соответствии с реликтовым обрезанием (штриховая линия) и ростом интенсивности за счет новой компоненты космических лучей (сплошная линия), цифры над «экспериментальными» точками — число ожидаемых событий в одном интервале энергии ($0, 1 \lg E$)

на реликтовое обрезание спектра космических лучей внегалактического «далекого» происхождения, а восстановление потока космических лучей при энергиях более 10^{20} эВ — на иное происхождение частиц со столь высокой энергией.

При дальнейшем развитии метода наблюдения с помощью орбитальной оптической камеры возможны увеличение геометрического фактора детектора до $10^6 \text{ км}^2 \cdot \text{ср}$ и постановка экспериментов по изучению космических лучей с энергиями до 10^{21} эВ (проект EUSO [11]).

Помимо главного преимущества — создания детектора с огромным геометрическим фактором — наблюдение с орбиты спутника имеет ряд важных особенностей, способствующих получению дополнительных данных о КЛ ПВЭ. Орбитальная камера позволяет наблюдать события с направлением частиц, близким к горизонтальному, и тем самым использовать всю толщу атмосферы Земли, от малых ($100\text{--}200 \text{ г/см}^2$) до больших ($>1000 \text{ г/см}^2$) глубин. Это позволит эффективно регистрировать события, инициируемые не только протонами и ядрами космических лучей, но и релятивистскими пылинками, порождающими сравнительно короткие лавины вторичных частиц, а также нейтрино, создающими ливни в глубине атмосферы.

В последнее время интерес к поиску релятивистской пыли как компоненты космических лучей вырос в связи с новыми экспериментальными данными о сосуществовании пыли и плазмы. Ожидается [12], что взрывы Сверхновых могут сопровождаться всплесками потока релятивистских пылинок.

Поиск и изучение нейтрино сверхвысоких энергий с помощью детектора КЛ ПВЭ особенно интересны в связи с тем, что масса обзореваемого вещества мишени (атмосферы), где могут взаимодействовать нейтрино, исключительно велика — 10^{11} т . Выделе-

ние событий от нейтрино возможно благодаря различию сечений взаимодействия нейтрино и протонов: ожидается, что при энергиях около 10^{20} эВ сечение нейтрино в сотни раз меньше сечения протонов. Поэтому события, инициированные глубоко в атмосфере, должны быть отнесены к взаимодействиям нейтрино. Будут разделены события от мюонных, тау-нейтрино и электронных нейтрино. Мюонные и тау-нейтрино создадут в атмосфере характерный длинный трек с несколькими максимумами, который резко отличается от треков с одним максимумом, ожидаемых от электронных нейтрино. Следует заметить, что длинные треки от мюонных и тау-нейтрино трудно (практически невозможно) регистрировать с помощью наземных установок.

Первый детектор КЛ ПВЭ (оптическая камера, содержащая зеркало с диаметром и фокусным расстоянием около 3 м) создается на основе принципиально новой конструкции зеркала — «зеркала Френеля», разрабатываемого совместно с РКК «Энергия». В этой конструкции зеркало-концентратор представляет собой систему отражающих колец с переменным радиусом кривизны, расположенных на плоской поверхности. Плоская конструкция дает возможность плотно упаковать большие фрагменты зеркала при транспортировке к космической станции и затем на станции простыми средствами разворачивать зеркало до полной площади. Новая конструкция зеркала позволяет значительно удешевить и другие проекты с использованием зеркал-концентраторов.

Сетка фотоприемников в фокальной плоскости зеркала аналогична приемникам в наземных оптических детекторах. Она выполняется из ФЭУ с ультрафиолетовым окном и световодов с УФ-фильтрами на входном окне. Поле зрения камеры $15^\circ \times 15^\circ$ перекрыто сеткой из 2500 ячеек с размером 15 мм (угловое разрешение 5 мрад).

Камера, направленная вертикально вниз к Земле (надир), регистрирует флуоресцирующий в атмосфере трек ливня, генерированного частицей космических лучей, в пределах площади 100×100 км. В каждом событии определяется направление прихода частицы и каскадная кривая ливня (число вторичных электронов, вызывающих флуоресценцию, как функция глубины в атмосфере). По интегральному значению числа электронов в каскаде определяется энергия первичной частицы (калориметрический метод), а по положению максимума кривой делается оценка природы первичной частицы. На рис. 3 представлено распределение событий по глубине максимума каскада для различных первичных частиц (протон, ядро, нейтрино, релятивистская пылинка). Для протонов и ядер существуют экспериментальные результаты, полученные на наземной установке «Fly's Eye» [13] (на рис. 3 они изображены как точки с ошибками). Расчетные данные [14] для протонов и ядер железа указывают на смешанный состав наблюдаемых космических лучей. Для релятивистских пылинок приведена оценка распределения для модели «суперпозиции»: каждый из 10^{10} нуклонов пылинки имеет энергию 10^{10} эВ и создает часть суммарного ливня.

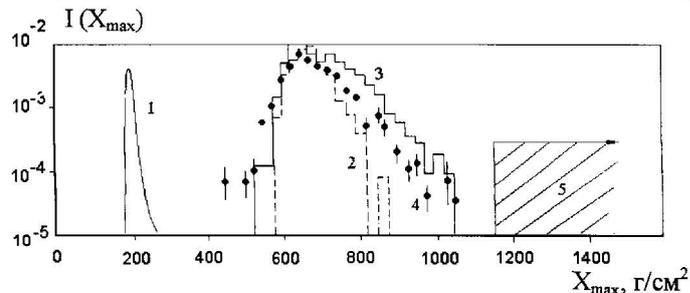


Рис. 3. Распределение событий по глубине максимума каскада для различных первичных частиц: 1 — релятивистская пылинка (расчет авторов), 2 — ядро железа (штриховая линия), расчет [14]; 3 — протон (сплошная линия), расчет [14]; 4 — экспериментальные данные [13]; 5 — нейтрино

Для нейтрино ожидаемая область значений глубин максимума лежит правее области протонов и ядер.

Для определения абсолютной глубины максимума каскада используется информация о рассеянном назад черенковском свете ШАЛ. Высота рассеивающей свет поверхности (облака, море, суша) измеряется по времени прихода контрольного сигнала от бортовой лампы-вспышки, импульсы которой генерируются немедленно после регистрации трека ШАЛ.

Как видно из рис. 3, каскадная кривая от релятивистских пылинок резко отличается от других каскадных кривых (малое абсолютное значение глубины максимума, короткий каскад), поэтому выделение пылинок среди других частиц возможно в индивидуальных событиях. Нейтрино резко отличается от других частиц большим абсолютным значением глубины максимума каскада.

Разделение протонов и ядер по данным о глубине максимума будет проводиться лишь статистически — для выделенных групп частиц, например приходящих из заданного участка небесной сферы (от источника).

Дополнительные сведения о природе первичных частиц, излучаемых источником, могут быть получены из данных о степени близости их направлений к направлению на источник. В случае нейтральных первичных частиц (фотоны, нейтрино) направление их движения совпадает с направлением на источник (в пределах инструментальной ошибки камеры). Первичные протоны и ядра могут быть отклонены магнитными полями Галактики. Величина отклонения зависит от энергии и заряда частицы и интегрального магнитного поля, пересекаемого частицей на пути к наблюдателю. Ядра отклоняются в большей степени — пропорционально заряду ядра. Чтобы применить подобный косвенный метод определения состава частиц, необходимо знать распределение магнитных полей в Галактике (сведения о магнитных полях Галактики уже имеются и их точность и достоверность постоянно улучшаются).

Особенный интерес вызывает выделение первичных фотонов среди других частиц космического излучения в связи с тем, что фотоны должны быть основной компонентой космических лучей предельно высокой энергии, возникающих в распадах сверхтяжелых частиц. Их выделение возможно по глу-

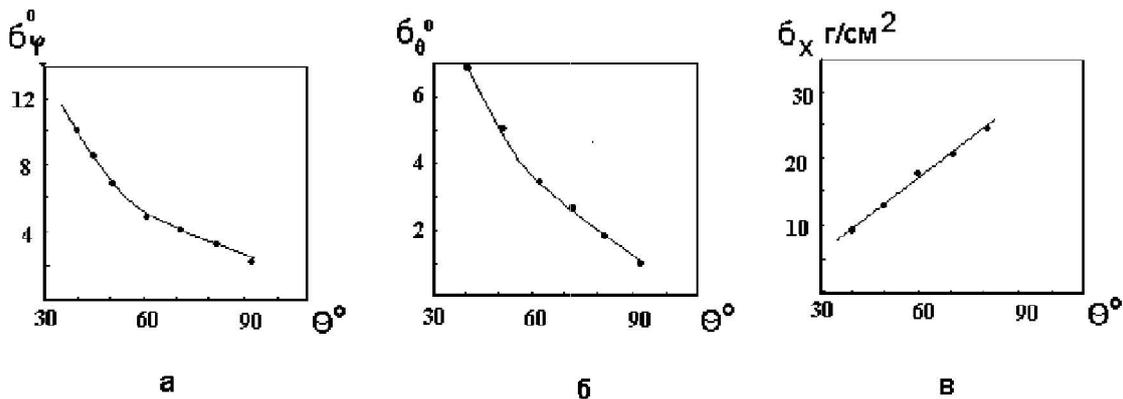


Рис. 4. Погрешность измерения азимутального угла φ (а), зенитного угла θ (б) для направления движения первичной частицы и глубины максимума каскада (в) как функция зенитного угла. Первичная энергия частицы $3 \cdot 10^{19}$ эВ

бине максимума каскада, которая больше, чем для протонов, в соответствии с эффектом Ландау–Померанчука–Мигдала для энергий выше $5 \cdot 10^{19}$ эВ. К сожалению, этот метод работает лишь в случае, когда частицы подходят к Земле вдоль магнитных силовых линий поля Земли. При пересечении магнитных силовых линий фотоны теряют энергию (идет каскадный процесс до входа в атмосферу [15]), и различие каскадных кривых в ливнях от протонов и фотонов исчезает. Использование орбитального детектора позволит выбрать события с направлением вдоль силовых линий и воспользоваться отличием глубины максимума каскада в ливнях от фотонов и протонов.

Ожидаемая частота регистрации событий с пороговой энергией 10^{19} эВ составляет около 30 в час. При пороговой энергии сигнал в ячейках, регистрирующих максимум каскада, в 5 раз превышает шум (оценки сигнал–шум см. в работе [1]). Точность определения первичной энергии в каждом событии не хуже 5–10% (при этом учитываются не только статистические ошибки в числе фотоэлектронов, но и систематические ошибки, связанные с поглощением света в атмосфере, с зависимостью выхода флуоресценции от плотности воздуха и т. п.). Погрешность определения направления прихода первичной частицы зависит от зенитного угла, как показано на рис. 4. Для основного массива данных, при зенитных углах более 45° , ошибка в определении направления составляет менее 4° при энергии $3 \cdot 10^{19}$ эВ и уменьшается с ростом энергии до $1\text{--}2^\circ$.

Высококонтрастный оптический детектор с концентратором света большой площади и сравнительно высоким угловым разрешением ($10'$), необходимый для исследований КЛ ПВЭ, найдет применение и в смежных областях науки. Например, с помощью детектора КЛ ПВЭ по флуоресцентному свету атмосферы можно составлять подробные карты выпадения частиц из радиационных поясов Земли.

Измерения рассеянного назад сигнала от лампы-вспышки с помощью оптического детектора с большой апертурой позволят получить прецизионные данные о свойствах отражающих свет слоев атмосферы и поверхности Земли. Применяя

на лампе-вспышке узкополосные фильтры, можно получить спектральные данные об отраженных сигналах. Такие данные безусловно найдут приложения в географии, экологии и геологии.

Разработка детектора КЛ ПВЭ на российском сегменте Международной космической станции стимулирует развитие технологии создания зеркал-концентраторов света с площадью в десятки квадратных метров. Эта технология представляет большой интерес в связи с развитием техники солнечных энергетических установок в космосе.

Литература

1. Garipov G.K., Gorshkov L.A., Khrenov B.A. et al. // AIP. 1998. **433**. P. 108; Garipov G.K., Khrenov B.A., Nikitsky V.P. et al. // Ibid. P. 403.
2. Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1966. **4**. С. 78.
3. Greisen K. // Phys. Rev. Lett. 1966. **16**. P. 748.
4. Hill C.T. // Nucl. Phys. 1983. **B224**. P. 469; Sigl G. // Space Sci. Rev. 1996. **75**. P. 375.
5. Nagano M. (AGASA collaboration) // Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays / Ed. M. Nagano, F. Takahara. World Scientific, 1992. P. 335.
6. Khristiansen G.B. (EAS-1000 collaboration) // Ibid. P. 354.
7. Loh E.C. (HIRES collaboration) // Ibid. P. 345.
8. Teshima M. (Telescope Array Collaboration) // Proc. 25 ICRC. 1997 (Durban). V. 5. P. 369.
9. Cronin J. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl.). 1992. **B28**. P. 213; The Pierre Auger Project, Design Report. 1996.
10. Takeda M., Hayashida N., Honda K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. **81**. P. 1163.
11. Scarsi L. // Extreme Universe Space Observatory (EUSO) Proposal for the ESA F2/F3 Missions, 2000.
12. Bingham R., Tsyтович V.N. // Astroparticle Phys. 1999. **12**. P. 35.
13. Bird D.J., Boyer J., Clay R.W. et al. // Proc. 23 ICRC (Rome). 1993. V. 2. P. 38.
14. Wibig T. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1999. **29**. P. 557.
15. Aharonian F.A., Kanevsky B.L., Sahakian V.A. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1991. **17**. P. 1909.