

Хотя при малой толщине поглотителя оба метода дают довольно высокие погрешности, ограничения массы в баллонных и орбитальных экспериментах ведут к необходимости создания легкой аппаратуры. Поэтому целесообразно рассматривать варианты с различной толщиной поглотителя. При большом геометрическом факторе прибор с поглотителем толщиной примерно 5 см свинца или 7 см железа позволит восстанавливать спектры космических лучей, несмотря на высокую погрешность определения энергии в индивидуальном случае (0.60–0.70). Разумеется, измерения с более высокой точностью более предпочтительны, однако выбор схемы установки будет определяться условиями эксперимента.

Приведенные результаты исследования удельного энерговыделения в максимуме адронного каскада, инициируемого частицами высокой энергии, мало зависят от использованной модели неупругого взаимодействия. С учетом того, что модельные представления FLUKA, QGSM близки к использованным экспериментальным данным, можно заключить, что указанную величину целесообразно взять в качестве основы для метода восстановления первичной энергии частиц. При этом возможная методическая точность составляет 30–40% в энергетической области выше 1 ТэВ.

Литература

1. Григоров Н.Л., Мурзин В.С., Рапопорт И.Д. // ЖЭТФ. 1958. **34**, № 2. С. 506.

2. Иваненко И.П., Подорожный Д.М., Рапопорт И.Д. и др. // Каскадная теория ливней. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1996. С. 102.
3. Guzik T.G., Adams J., Ampe J. et al. // Proc. 26 ICRC. Salt Lake City, USA, 1999. V. 5. P. 9.
4. Watts J.W., Lee J., Lowell L.W. et al. // Proc. 26 ICRC. Salt Lake City, USA, 1999. V. 5. P. 457.
5. Демьянов А.И., Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Ядерно-каскадный процесс в плотном веществе. М.: Наука, 1977.
6. GEANT User's Guide. CERN DD/EE/83/1. Geneva, 1983.
7. Fesefeldt H.C. Simulation of hadronic showers, physics and applications. Technical Report PITHA 85-02, III Physikalisches Institut, RWTH Aachen Physikzentrum. 1985.
8. Ranft J., Ritter S. // Z. f. Phys. C. 1983. **C20**, No. 4. P. 347.
9. Fasso A., Ferrari A., Ranft J. et al. // Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. 1993. **A332**, No. 2. P. 459.
10. Амелин Н.С., Гудима К.К., Сивоклоков С.Ю., Тонеев В.Д. // Ядерная физика. 1990. **52**, № 1. С. 272.
11. Амелин Н.С., Гудима К.К., Тонеев В.Д. // Ядерная физика. 1990. **51**, № 2. С. 512.
12. Иваненко И.П., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я. и др. // Препр. НИИЯФ МГУ № 89-29/106. М., 1989.
13. Иваненко И.П., Рапопорт И.Д., Шестоперов В.Я. и др. // Препр. НИИЯФ МГУ № 88-6/83. М., 1988.
14. Kolchuzkin A.M., Vespilov V.I. // Proc. 16 ICRC. Kyoto, Japan, 1979. V. 9. P. 222.

Поступила в редакцию
09.02.01

УДК 537.591.15

АНТАРКТИЧЕСКИЙ АЭРОСТАТНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕГИСТРАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Р. А. Антонов, Л. А. Кузьмичев, М. И. Панасюк, Д. В. Чернов,
С. И. Никольский^{*)}, Т. И. Сысоева^{*)}

(НИИЯФ)

E-mail: antr@decl.npi.msu.su

Приводится описание проектируемого антарктического эксперимента на базе модернизированной аэростатной установки СФЕРА. В течение длительного полета на высоте 30–40 км по замкнутой циркуполярной траектории может быть измерен энергетический спектр космических лучей в области энергий от 10^{18} до $(3-5) \cdot 10^{20}$ эВ. Подобный эксперимент имеет ряд преимуществ по сравнению с проектируемыми спутниковыми экспериментами.

Изучение космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) в области энергий $E > 10^{20}$ эВ является одной из наиболее интересных проблем астрофизики. По современным представлениям, источники частиц такой энергии не могут находиться вне нашей Галактики, так как они должны испыты-

вать взаимодействие с реликтовыми гамма-квантами (эффект «реликтового обрезания», предсказанный Зацепиным–Кузьминым–Грейзеном).

В то же время за период многолетних измерений с помощью больших наземных установок («Акено», «Хавера-Парк», «Мушиный глаз», Якутская

^{*)} Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

установка) [1] было зарегистрировано несколько событий с такой энергией. Точность определения энергии этих событий, однако, недостаточна высока. Отсутствие «реликтового обрезания» означало бы, что в нашей Галактике существуют объекты с гигантским энерговыделением. Предположение о существовании ускорительных механизмов подобного масштаба в нашей Галактике чрезвычайно трудно объяснить с точки зрения современных теоретических представлений. Величина потока частиц с энергией свыше 10^{20} эВ по совокупности данных наземных установок составляет ~ 10 частиц в год на площадь 1000 км^2 из угла 1 ср [1]. Экспериментальные данные «Акено» показывают, что в области энергий $\sim 10^{19}$ эВ имеет место особенность, а при больших энергиях спектр становится значительно более пологим. Если частицы с энергией свыше 10^{20} эВ генерируются в пределах нашей Галактики в процессах распада магнитных монополей, стрингов, доменов и т. п., то из теоретических представлений можно ожидать, что в области энергий $10^{20} \div 10^{25}$ эВ спектр будет значительно более пологим, чем при энергиях ниже 10^{20} эВ [1]. Экстраполяция спектра, измеренного на Тянь-Шаньской установке [2], свидетельствует о возможности несколько большей величины потока частиц в области энергий свыше 10^{20} эВ, чем это следует из вышеупомянутых данных наземных установок.

Для определения формы энергетического спектра в области энергий свыше 10^{20} эВ планируется создание гигантских наземных установок площадью до 5000 км^2 (международный проект Оже) и больших орбитальных установок.

В связи с малостью потока частиц КЛ ПВЭ особую роль играет надежность определения энергии в индивидуальном событии. Наиболее адекватной калориметрической методикой определения энергии в этой области является определение интегрального потока черенковского света и ионизационного свечения частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ) в атмосфере.

Схема эксперимента

Настоящий проект базируется на идее, предложенной академиком А.Е. Чудаковым [3–5], и предполагает одновременную регистрацию черенковского света ШАЛ и ионизационного света частиц ШАЛ с помощью модернизированной аэростатной установки СФЕРА [6–8]. Основой модернизированного варианта установки будет сферическое зеркало диаметром 1–2 м, в фокальной поверхности которого расположен светоприемник, состоящий приблизительно из 100 ячеек. Применение корректирующей диафрагмы Шмидта позволит обеспечить такую дискретность при полном угле обзора 1 ср . Эксперимент должен проводиться в ночное время.

Установка поднимается над покрытой снегом поверхностью Земли с помощью аэростата. Распределение освещенности заснеженной поверхности черенковским светом и изображение трека ионизационного свечения ШАЛ в атмосфере проецируется на светоприемник. В каждом канале измеряется форма импульса с дискретностью 100 нс. Это позволит восстанавливать каскадную кривую развития ШАЛ в атмосфере и определять направление прихода первичной частицы.

Флуоресцентный свет ШАЛ излучается в узком частотном диапазоне (от 300 до 400 нм), что позволяет понизить величину энергетического порога регистрации ШАЛ путем применения светофильтров, пропускающих только эту полосу частот. При этом интенсивность фонового света звездного неба ослабляется примерно в 15 раз.

Основной цикл измерений будет проводиться в процессе полета аэростата на высоте 30–40 км по замкнутой циркумполярной траектории в период полярной ночи. В отличие от измерений с помощью наземных установок в рассматриваемом эксперименте возможна эффективная регистрация частиц, приходящих из всей полусферы ($\sim 6 \text{ ср}$).

Величина осматриваемой прибором площади составит около 1000 км^2 . При отсутствии «реликтового обрезания» за время полета 100 сут может быть зарегистрировано 20–30 событий с энергией свыше 10^{20} эВ. Величина энергетического порога составит $\sim 10^{18}$ эВ.

Расстояние до поверхности Земли и величина коэффициента отражения покрытой снегом поверхности определяется путем периодической регистрации отраженного от этой поверхности света лампы-вспышки. В период полярных сияний предусматривается выключение высокого напряжения на светоприемниках. Облачность вблизи Южного полюса в зимний период практически отсутствует. Проведение подобных полетов с полезным весом $\sim 1 \text{ т}$ планируется NASA в ближайшее время. В нашей стране длительные аэростатные полеты неоднократно проводились с Камчатки. Энергопотребление установки $\sim 50 \text{ Вт}$. Вес без источников питания $\sim 80 \text{ кг}$. Вес аккумуляторов, обеспечивающих 100-суточную работу установки, составит примерно 200 кг.

На первом этапе измерения проводятся с использованием привязного аэростата при высоте подъема 1–4 км. При этом измеряется структура энергетического спектра и чувствительная к глубине максимума развития ШАЛ в атмосфере (а следовательно, и к ядерному составу первичного космического излучения) форма функции пространственного распределения черенковского света ШАЛ в области энергий от нескольких единиц 10^{15} эВ до нескольких единиц 10^{18} эВ. Число зарегистрированных событий составит $\sim 10^4$ при $E > 10^{16}$ эВ при подъеме

установки на 1 км за время измерений 50 ч и ~ 15 при $E > 10^{18}$ эВ (высота 4 км, время 200 ч). Эти данные представляют интерес в связи с выяснением природы спектра вблизи излома ($E \cong 3 \cdot 10^{15}$ эВ) и возможного изменения ядерного состава первичных космических лучей в этой области энергий.

Расчет основных параметров установки

Линейные размеры площадки, осматриваемой каждым элементом мозаики светоприемника, составляют $\sim 3 \times 3$ км (для участка трека ШАЛ вблизи поверхности Земли) и $\sim 1.5 \times 1.5$ км для участка на высоте 15 км. Основная доля флуоресцентного света ШАЛ идет из области, близкой к максимуму развития ШАЛ в атмосфере. Длина этой области составляет от 5 до 10 км (в зависимости от зенитного угла прихода ШАЛ), ширина светящейся области ~ 0.3 км для участка вблизи поверхности Земли и 2 км для участка на высоте 15 км. Черенковский свет ШАЛ образует на снежной поверхности светлое пятно диаметром ~ 1 км. Таким образом, изображение трека ШАЛ занимает от одной до четырех ячеек детектора (в зависимости от зенитного угла прихода ШАЛ) и имеет характерную временную структуру — плавное нарастание и последующий плавный спад общей длительностью 20–30 мкс, за которыми следует кратковременный (< 1 мкс) импульс большой амплитуды, обусловленный отраженным от снежной поверхности черенковским светом ШАЛ.

Оценим величину отношения сигнала к фоновому свету звездного неба, для события с энергией $E = 10^{20}$ эВ в случае применения зеркала с площадью диафрагмы $S = 1$ м².

Максимальная величина временного бина (t), необходимая для возможности анализа формы каскадной кривой развития ШАЛ в атмосфере и определения направления прихода ШАЛ, составляет $t \cong 3$ мкс (такое время соответствует длине наблюдаемого трека $L \cong 1$ км). Величина сигнала от флуоресцентного света ШАЛ в области, близкой к максимуму его развития, за время 3 мкс (в числе фотоэлектронов (ф.э.) с фотокатода соответствующего фотоумножителя) составит

$$n_{\text{флор}} = ((E/(1.3 \cdot 10^9 \text{ эВ})) \cdot 4LSf)/(4\pi R^2) \cong \cong 5000 \text{ ф. э.}$$

Здесь $f = 0.18$ — квантовая эффективность фотоумножителя, R — расстояние от зеркала до отражающей поверхности.

Величина сигнала отраженного от снега черенковского света ШАЛ составит

$$n_{\text{чер}} = (2.5 \cdot 10^7 E \text{ (ГэВ)} \cdot KK_{\text{чер}}Sf)/(2\pi R^2) \cong \cong 21\,000 \text{ ф. э.}$$

Здесь $K \cong 0.8$ — коэффициент, учитывающий потери света при его отражении от снега и от зеркала, а $K_{\text{чер}} \cong 0.3$ — коэффициент, учитывающий потери части света в светофильтре.

Величина сигнала фонового света звездного неба в интервале времени 3 мкс составит

$$n_{\text{bg}} = (ISQtKf)^{0.5} \cong 30 \text{ ф. э.}$$

Здесь $I = 2 \cdot 10^{11}$ м⁻²·с⁻¹·ср⁻¹ — величина светового фона звездного неба в интервале частот $300 \div 400$ нм, $Q = 0.01$ ср — телесный угол, охватываемый одной ячейкой светоприемника.

Из приведенных оценок следует, что величина энергетического порога составит $\sim 10^{18}$ эВ. При этой энергии величина суммарного флуоресцентного сигнала из области максимума развития ШАЛ превысит фон в несколько раз, а черенковский сигнал — примерно на порядок.

Заключение

Проведенные оценки показывают, что в энергетическом интервале от 10^{18} эВ до нескольких единиц 10^{20} эВ в течение одного длительного полета аэростатной установки может быть зарегистрировано достаточное число событий, чтобы решить вопрос о существовании «реликтового обрезания» КЛ ПВЭ. При сопоставлении данного эксперимента с проектируемыми спутниковыми можно отметить следующее.

1. Величина одинакового линейного разрешения трека ШАЛ достигается в аэростатном приборе при числе ячеек на два порядка меньше, чем в спутниковом. Это позволяет, в частности, использовать существенно более простую широкоугольную оптическую систему.

2. Дальнейшее улучшение линейного разрешения флуоресцентного трека ШАЛ возможно за счет измерения формы импульса в каждом из каналов регистрации.

3. Величина энергетического порога ($\sim 10^{18}$ эВ) при этом оказывается по крайней мере на порядок ниже, чем спутникового. Это позволит в одном сеансе измерений получить данные о форме энергетического спектра до «реликтового обрезания» и после него.

4. В аэростатном эксперименте может быть достигнута более высокая точность определения энергии, так как используется и флуоресцентный и черенковский свет ШАЛ.

5. В аэростатном эксперименте можно получить более высокую точность реконструкции трека ШАЛ, так как в каждом событии в конце изображения трека будет яркое пятно отраженного черенковского света. Расстояние до этой точки трека известно, и расстояния до всех точек трека в среднем на порядок меньше, чем в спутниковом эксперименте.

Это позволит достигнуть более высокой точности определения направления прихода первичной частицы и величины ее пробега взаимодействия.

6. Измерение формы черенковского импульса с дискретностью 100 нс дает возможность еще одним, независимым способом определять величину зенитного угла прихода первичной частицы.

7. Аэростатный прибор и весь эксперимент требует намного меньшего финансирования.

8. В спутниковом эксперименте возможно использовать лишь ~ 0.1 времени экспозиции и, по причине наличия облачности, величина эффективного телесного угла будет заметно меньше, чем в аэростатном эксперименте. Вследствие этого объем статистического материала, получаемого в период 100-суточного сеанса аэростатных измерений, сопоставим с тем, который можно получить в период годичных спутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 98-02-16227а и 01-02-16080а) и программы «Университеты России — фундаментальные исследования» (грант 02-02-15).

Литература

1. Nagano M. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl.). 1997. **B52**. P. 71.
2. Вильданова Л.И., Дятлов П.А., Нестерова Н.М. и др. // Изв. РАН, сер. физ. 1994. **58**, №12. С. 79.
3. Чудаков А.Е. // Экспериментальные методы космических лучей сверхвысоких энергий: Материалы Всесоюз. симп. Якутск, 1972. С. 69.
4. Antonov R.A., Ivanenko I.P., Rubtsov V.I. // Proc. 14 ICRC. München, 1975. V. 9. P. 3360.
5. Антонов Р.А., Иваненко И.П., Кузьмин В.А. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1986. **50**, №11. С. 2217.
6. Антонов Р.А., Петрова Е.А., Федоров А.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. №4. С. 102 (Moscow University Phys. Bull. 1995. No. 4. P. 93).
7. Antonov R.A., Chernov D.V., Fedorov A.N. et al. // Proc. of Workshop on Observing Giant Cosmic Ray Air Showers from $> 10^{20}$ eV Particles from Space // AIP Conf. Proc. 1998. P. 367.
8. Antonov R.A., Chernov D.V., Petrova E.A. et al. // Proc. 26 ICRC. Utah, 1999, HE 2.2.34.

Поступила в редакцию
12.02.01

РАДИОФИЗИКА

УДК 537.222

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

И. А. Елкин, В. П. Митрофанов

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

E-mail: ela@hbar.phys.msu.su

Создана экспериментальная установка и разработана методика измерения вариаций плотности электрического заряда на поверхности плавленого кварца в вакууме. Рассчитано и экспериментально определено оптимальное значение расстояния между поверхностями зонда и образца, обеспечивающее максимальную чувствительность. Достигнуты разрешения $2 \cdot 10^{-16}$ и $4 \cdot 10^{-17}$ Кл/см² при площадях зондов 0.1 и 0.8 см² соответственно.

Лазерные интерферометрические детекторы гравитационного излучения (проекты LIGO, VIRGO, GEO [1, 2]), которые, по-видимому, начнут работать в 2002 г., будут, как предполагается, регистрировать амплитуды колебаний пробных масс (зеркал интерферометра) величиной около $2 \cdot 10^{-19}$ м, что соответствует действующей на них силе $2 \cdot 10^{-12}$ Н [3]. Оптическая система детектора требует подстройки и поддержания на постоянном уровне с точностью около 10^{-10} м расстояния между зеркалами, которое может меняться из-за термических, сейсмических и других возмущений. На втором этапе LIGO эта подстройка, по-видимому, будет реализована с помощью действующих на зеркала электростатических сил, управляемых системами обратных

связей. Наличие электрических зарядов на зеркалах и их флуктуации с характерными частотами, попадающими в полосу пропускания детектора, может ограничить его чувствительность. Причинами возникновения зарядов могут быть поверхностные адсорбционные процессы [4], космические лучи и радиационный фон [5].

В связи с этим необходимо изучить релаксацию электрических зарядов, находящихся на поверхности кварцевого стекла (модели зеркала детектора гравитационного излучения). Наиболее широко применяемым методом измерения поверхностных зарядов и потенциалов является метод динамического конденсатора. Его разрешение в стандартных измерителях обычно составляет около 10^{-11} Кл/см² [6].