

УДК 539.1.074.2

ПРЯМЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАРЯДОВ И ЭНЕРГИЙ ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ДИАПАЗОНЕ $10^{13} - 10^{15}$ эВ (ПРОЕКТ CROSS)

А. Д. Ерлыкин, А. С. Борисов, К. А. Котельников,
С. К. Котельников, В. М. Максименко, В. С. Пучков,
Ю. А. Трубкин, А. П. Чубенко, Р. А. Мухамедшин¹

Эксперимент CROSS (Cosmic Rays Over Spectrum Steepening) нацелен на прямые измерения масс и энергий ядер первичного космического излучения (ПКИ) в диапазоне $10^{13} - 10^{15}$ эВ вблизи излома в энергетическом спектре ПКИ. Экспериментальная техника – аэростатный ионизационный спектрометр, состоящий из генераторов рентгеновского переходного излучения, проложенных тонкостенными пропорциональными камерами.

Прямые экспериментальные исследования химического состава и измерение энергий первичных космических лучей в диапазоне $E \sim 10^{15} - 10^{16}$ эВ, где наблюдается излом в энергетическом спектре первичного космического излучения [1], позволят глубже понять механизм ускорения частиц до столь высоких энергий и распределение этих частиц в нашей Галактике. Возросший в последнее время интерес к таким исследованиям объясняется главным образом успехами в развитии аэростатной техники, благодаря чему стало возможным проводить в стратосфере на высотах ~ 40 км облучение научных установок весом до ~ 2 тонн в течение нескольких суток [2].

1. *Физическая задача эксперимента CROSS.* Традиционно исследования химического состава и измерение энергий частиц первичных космических лучей в области перегиба спектра в диапазоне $E \sim 10^{15} - 10^{16}$ эВ проводились при помощи наземных установок, регистрирующих широкие атмосферные ливни космических лучей [3],

¹Институт ядерных исследований РАН.

а также при помощи больших высокогорных рентген-эмульсионных камер [4]. Однако получаемые на таких установках экспериментальные данные в очень большой степени определяются сложными каскадными процессами, которые протекают при прохождении космических лучей через атмосферу. Поэтому при определении атомных масс и энергий первичных частиц приходится решать обратную задачу, в которой в качестве исходных данных используются такие измеряемые на эксперименте величины, как пространственные распределения электронов ШАЛ, потоки гамма-квантов высоких энергий, мюонов и т.д. Насколько неоднозначны получаемые при этом выводы, можно продемонстрировать на следующем примере. Так, из анализа экспериментальных данных по ШАЛ авторы работ [3] приходят к заключению, что при энергиях $\sim 10^{16}$ эВ доля протонов среди первичных частиц не превышает 5–10%, остальные первичные частицы – это тяжелые ядра. Вместе с тем, как это следует из анализа данных рентген-эмульсионных камер для событий с $\Sigma E_\gamma > 100$ ТэВ [4], около 80% семейств гамма-квантов образованы первичными протонами и ядрами атомов гелия, т.е. не происходит существенного изменения массового состава космических лучей при переходе от энергий в несколько ТэВ в область энергий излома первичного спектра. К такому же выводу приходят авторы работы [7] при анализе среднего возраста ШАЛ на высотах гор при энергиях $E \sim 10^{15} - 10^{16}$ эВ. Наблюдаемое противоречие сохраняется и не снимается проведением более детальных расчетов и использованием в этих расчетах современных моделей ядерных взаимодействий. По-видимому, разрешить данную проблему позволят только прямые экспериментальные определения природы первичных частиц, энергии которых лежат в области перегиба энергетического спектра. Кроме этого, существует целый ряд других проблем в физике космических лучей и астрофизике, решение которых делает актуальной физическую задачу данного проекта – экспериментальное определение природы частиц первичного космического излучения, энергии которых заключены в диапазоне величин лоренц-факторов $\gamma \sim 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$.

Первичный экспериментальный материал проекта предполагается получать при помощи стратосферных камер, длительные облучения которых на границе атмосферы будут проводиться на автоматических аэростатах на высотах (3–10) г/см².

Основная экспериментальная методика, которую предполагается применять в стратосферных камерах проекта определения E_0 , состоит в детектировании рентгеновского переходного излучения (РПИ) специально разработанными для этих исследований большими ксеноновыми пропорциональными счетчиками. Определенное число счетчиков вместо ксенона будут заполнены аргоном, что позволит измерять первичную иониза-

цию, производимую частицами, и определять тем самым заряд частиц космического излучения Z .

2. *Экспериментальная установка.* На рис. 1 схематично показана экспериментальная установка проекта, которая состоит из 3 генераторов рентгеновского переходного излучения РПИ. Каждый генератор представляет собою стопку, составленную из 50 лавсановых пленок. Пленки имеют толщину $L1=40$ микрон и разнесены по вертикали друг относительно друга на величину зазора $L2=1.5$ см, где $L1$ и $L2$ – определяются размерами зон формирования электромагнитного поля частиц соответственно в веществе пленок и в воздухе. Указанные размеры зон формирования обеспечивают возможность определения лоренц-факторов первичных частиц в диапазоне величин $\sim 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4$ эВ. Суммарная толщина всех генераторов составляет около 1 г/см², площадь – 4 м².

Все 3 генератора РПИ переложены двойными рядами пропорциональных счетчиков (1-2), как это показано на рис. 1. Пропорциональные цилиндрические счетчики выполнены из металлизированных майларовых трубок, толщина стенок которых равна $100-150$ микронам. Диаметр счетчика d равен 2 см, длина счетчика – 200 см. В качестве анода счетчика используется золоченая вольфрамовая нить, диаметр которой равен 25 микронам. Рабочее напряжение, подаваемое на нить, равно 1300 В.

Газовая смесь, которой заполняются ксеноновые пропорциональные счетчики, имеет состав 0.25 Хе + 0.60 Не + 0.15 СН₄, в которой первичная ионизация от релятивистской однократно заряженной частицы составляет 160 пар ионов. В аргоновых камерах, заполненных смесью 0.75 Аг, + 0.1 Не, + 0.15 СН₄, будет создаваться такое же число пар ионов первичной ионизации. Такие заряды при коэффициенте газового усиления $A = 20$ будут формировать на нити счетчика электрический сигнал $V_c = 300$ мВ. При прохождении через счетчик ядра Fe на нити будет собираться заряд ~ 3 рС (в работе [8] заряд в аналогичных условиях оказывался равным приблизительно одному пикоКулону).

Все цилиндрические пропорциональные камеры 2 см диаметром и 200 см длиной выполняются из алюминизированного майлара толщиной $100-150$ микрон. Общее число камер составляет 1400 , из них 800 камер наполнены Аг-содержащей газовой смесью, а 600 – Хе газовой смесью.

Были проведены оценки экспериментальных характеристик прибора с использованием результатов работ [5, 6].

Оценивался также отклик S секции как энергия переходного излучения, детектируемая соответствующим двойным рядом Хе камер, с учетом ионизации проходящей ультрарелятивистской однократно заряженной частицы, как функция ее лоренц-фактора (γ).

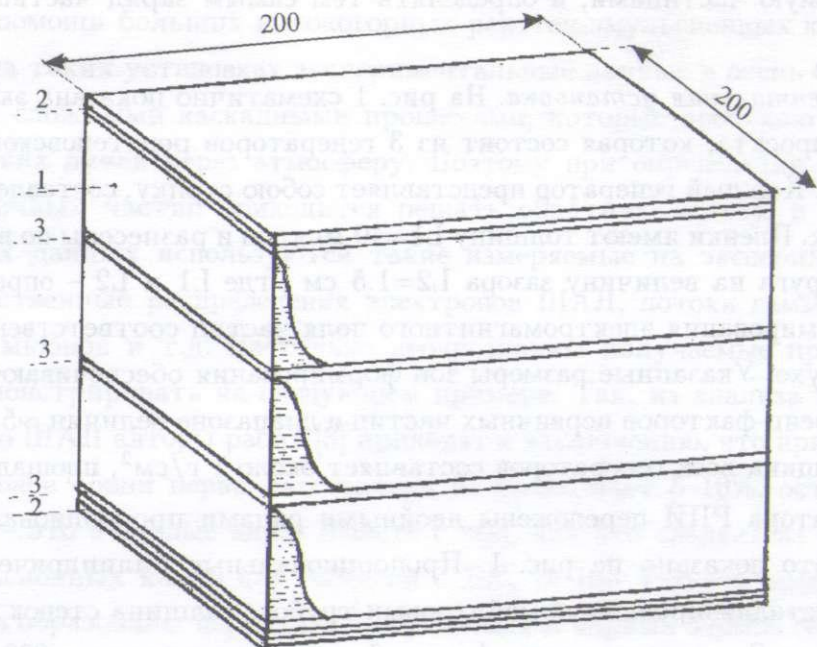


Рис. 1. Схема установки CROSS, представляющей собой куб с размерами граней $2 \times 2 \text{ м}^2$. Стрелкой 1 показаны многослойные генераторы рентгеновского переходного излучения; стрелкой 2 – ряды тонкостенных пропорциональных Ar счетчиков, 3 – ряды Хе счетчиков.

Как следует из этих вычислений, невозможно измерить с достаточно высокой точностью величину лоренц-фактора однократно заряженных частиц. Ситуация для Z -заряженных ядер ПКИ показана в таблице 1 и на рис. 3, где представлены возможные неопределенности $\Delta(\lg\gamma)$ при определении лоренц-фактора и соответствующая погрешность dE/E в определении энергии. Неопределенности оценивались как

$$\Delta(\lg\gamma) = [N_{ph}(E_{ph})^2 + (2060)^2(Z^2)^{-0.4}((n1 + n2)/n2)^{0.5}/((dS/d(\lg\gamma))[Z^2n1]^{0.5})],$$

где N_{ph} – число фотонов РПИ, зарегистрированных от единично-заряженной частицы, E_{ph} – средняя энергия фотона в теоретически рассчитанном спектре РПИ, 2060 (эВ) – среднеквадратичное отклонение ионизационных энергопотерь и слое 0.8 см Хе при атмосферном давлении, Z – заряд частицы, $dS/d(\lg\gamma)$ – производная зависимости на рис. 2, $n1$ и $n2$ – число слоев, регистрирующих РПИ и ионизацию соответственно.

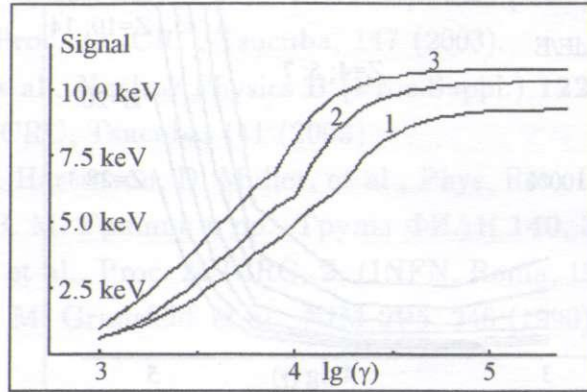


Рис. 2. Сигнал переходного излучения S , генерируемый однократно заряженной частицей при пролете одной из секций. Кривая 1 соответствует радиатору из $N = 50$ майларовых пленок, каждая толщиной $L1 = 40$ микрон, разделенных промежутками $L2 = 1.5$ см (основной вариант). Для сравнения кривые 2 и 3 представляют результаты для вариантов $L1 = 25$ микрон, $L2 = 1.0$ см, $N = 50$ и $L1 = 15$ микрон, $L2 = 1.0$ и $N = 50$ соответственно.

Т а б л и ц а 1

Оценка погрешностей $\Delta(\lg\gamma)$ в определении лоренц-фактора частиц с различными Z^2 для основного варианта

γ	$N_{ph(Z=1)}$	$E_{ph},$ эВ	$Z^2 =$ 12.5	$Z^2 =$ 25	$Z^2 =$ 50	$Z^2 =$ 100	$Z^2 =$ 200	$Z^2 =$ 400	$Z^2 =$ 800
10^3	0.0835	8150	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.04	0.03
$3 \cdot 10^3$	0.2232	9496	0.17	0.12	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02
10^4	0.4414	11104	0.18	0.13	0.09	0.06	0.04	0.03	0.02
$3 \cdot 10^4$	0.6760	12178	0.37	0.26	0.18	0.13	0.09	0.07	0.05
$5 \cdot 10^4$	0.7161	12318	0.93	0.66	0.46	0.33	0.23	0.16	0.12
$7 \cdot 10^4$	0.730	12359	1.86	1.31	0.93	0.65	0.47	0.33	0.23
10^5	0.7368	12379	3.72	2.62	1.85	1.31	0.92	0.65	0.46

Триггерный сигнал для записи сигналов, которые возникают на нитях пропорциональных счетчиков при прохождении высокоэнергичных частиц через установку, формируется при регистрации РПИ и выполнении условия

$$\Sigma V^{Xe} / \Sigma V^{Ar} \geq B, \tag{1}$$

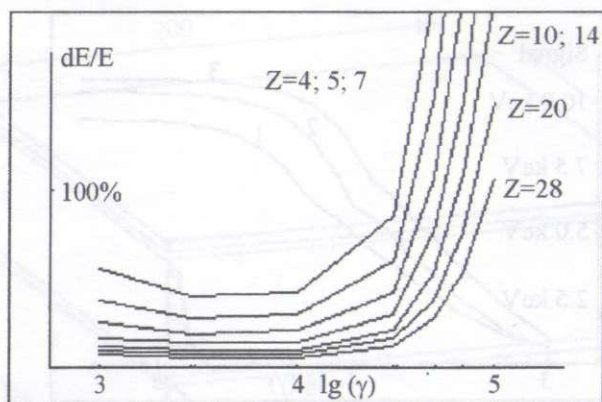


Рис. 3. Точность измерения энергий ядер ПКИ, рассчитанная для основного варианта установки.

где величина B должна быть больше единицы, но ее рабочее значение подбирается экспериментально. Следует отметить, что статистическая точность в определении сумм, входящих в выражение (1), достаточно высокая и составляет 10%, в то время как максимальный сигнал РПИ приблизительно на 30% превышает первичную ионизацию [5, 6]. Вместе с тем, представляется крайне важным провести методические исследования стабильности работы пропорциональных счетчиков, триггерного устройства и других экспериментальных характеристик стратосферной камеры, облучая макет установки пучком электронов известных энергий.

Геометрический фактор установки составляет $\sim 2.52 \text{ м}^2 \text{ стер.}$, что обеспечивает регистрацию за время полета аэростата по трассе п-ов Камчатка – р. Волга около 40 частиц первичных космических лучей, энергии которых превышают 10^{14} эВ.

Контроль режима работы различных узлов установки, калибровка всех пропорциональных счетчиков, запись данных рабочих срабатываний установки и передача данных через спутниковую связь – все эти операции осуществляются при помощи бортового компьютера.

Работа проводится при поддержке РФФИ, грант 07-02-00702.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Г. В. Куликов, Г. Б. Христиансен, ЖЭТФ **35**, 635 (1958).
- [2] W. V. Jones, D. Pierce, D. Gregory, et al., Proc. 29 ICRC, Pune, 101 (2005).

- [3] M. Rot et al., Proc. 28 ICRC, Tsucuba, 139 (2003); G. Navarra- (EAS-Top Collaboration), Proc. 28 ICRC, Tsucuba, 147 (2003).
- [4] V. S. Puchkov et al., Nuclear Physics B (Proc.Suppl.) **122**, 263 (2003); A. S. Borisov et al., Proc. 28 ICRC, Tsucuba, 111 (2003).
- [5] M. L. Cherry, G. Hartmann, D. Muller, et al., Phys. Rev. D **10**, 3494 (1974).
- [6] В. С. Асосков, В. М. Гришин и др., Труды ФИАН **140**, 3 (1982).
- [7] N. M. Nesterova et al., Proc. 24 ICRC, **2**, (INFN, Roma, 1995), p. 748.
- [8] J. L. Heures, J. M. Grunsfeld, et al., NIM **295**, 246 (1990).

Поступила в редакцию 12 декабря 2007 г.