

УДК 537.591

Р. А. Ныжмик

### НАБЛЮДЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ $\geq 10^{12}$ эВ В ПЕРВИЧНОМ КОСМИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

В стопке ядерной фотоэмульсии объемом 44 л, проэкспонированной в космическом пространстве на ИСЗ «Интеркосмос-6», проведен поиск электронов первичного космического излучения. Путем прослеживания электронно-фотонных каскадов, наблюдаемых в эмульсии невооруженным глазом, зарегистрировано три электрона с  $E \geq 10^{12}$  эВ.

Электроны высоких энергий в первичном космическом излучении содержат информацию как об источниках космических лучей, так и проходящим ими космическом пространстве. Как показано в работе [1], особый интерес при изучении энергетических спектров электронов представляет область энергии  $E > 1$  ТэВ, где спектр должен формироваться немногочисленными источниками, инжектировавшими электроны в период времени менее  $3 \cdot 10^5$  лет назад в ближайших от нас областях Галактики.

К настоящему времени эксперименты по определению энергетической зависимости потоков электронов ограничиваются энергиями, меньшими 1 ТэВ. Продвижение эксперимента в область  $> 1$  ТэВ связано со все возрастающими методическими трудностями. Ввиду быстро падающего энергетического спектра  $F(E) dE \sim E^{-\gamma} dE$ , где  $\gamma > 3$ , для измерений в области  $1 \div 10$  ТэВ необходимо ставить эксперименты с фактором экспозиций  $\Gamma T \geq 10^8$  м<sup>2</sup>·ср·с ( $\Gamma$  — геометрический фактор установки,  $T$  — время измерения), что на три порядка больше, чем достигнуто в экспериментах в настоящее время. Кроме того, в указанной энергетической области поток протонов первичного космического излучения, возможно, превосходит поток электронов той же энергии на три порядка величины или больше. Чтобы в таких условиях отделить электроны от протонов, применяемая экспериментальная методика должна обеспечивать дискриминацию протонов по сравнению с электронами  $\sim 10^4$  раз.

В настоящей работе мы предприняли попытку определить поток электронов энергий  $\geq 1$  ТэВ в составе первичного излучения, используя данные большой эмульсионной стопки, проэкспонированной за пределами атмосферы на ИСЗ «Интеркосмос-6».

**Детектор частиц.** Научная аппаратура, установленная на спутнике «Интеркосмос-6», была нацелена на изучение частиц первичного излучения методом контролируемой ядерной фотоэмульсии [2, 3] и состояла из эмульсионной стопки, искровых камер, сцинтилляционных счетчиков и ионизационного калориметра. В то же время эмульсионная стопка, набранная из слоев ядерной фотоэмульсии типа БР-2 размерами  $59,8 \times 19,8 \times 0,045$  см<sup>3</sup>, с общей толщиной 37,4 см могла быть использована и в качестве самостоятельного детектора частиц высокой энергии с геометрическим фактором этой стопки для глобального потока частиц из верхней полусферы  $\Gamma = 1,33$  м<sup>2</sup>·ср, фактор экспозиции за 100 ч полета спутника  $\Gamma T = 4,8 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>·ср·с.

Преимуществом нашего детектора, по сравнению с эмульсионными

детекторами, использованными ранее для регистрации частиц высокой энергии первичного космического излучения, является наличие большого блока чистой эмульсии, позволяющей провести подробный анализ каждого события.

Другое преимущество состоит в том, что стопка была экспонирована в космическом пространстве, а не в стратосфере, где часть электронов, регистрируемых прибором, является продуктом взаимодействия ядер первичного космического излучения с частицами остаточной атмосферы.

Основной методической трудностью использования данной эмульсионной стопки в нашем эксперименте является наличие вокруг эмульсионной стопки разнообразных элементов научной аппаратуры сложной конфигурации. Так, полная толщина вещества над стопкой по вертикали составляла  $19 \text{ г/см}^2$  легкого вещества типа алюминия, в остальных направлениях она колебалась от 7 до  $50 \text{ г/см}^2$ . Существенно, что максимальное удаление вещества от поверхности эмульсионной стопки составляло 60 см.

**Методика определения природы первичных частиц.** Нами были проанализированы 278 электронно-фотонных каскадов из общего числа  $\sim 500$ , обнаруженных в эмульсионной стопке невооруженным глазом. Это все каскады, которые имели в слоях ядерной эмульсии толщины  $450 \text{ мкм}$  длину проекции в плоскости эмульсии  $\geq 1 \text{ мм}$ . Эти каскады были прослежены при помощи микроскопа до их начала, т. е. до точки взаимодействия частицы первичного космического излучения в стопке или до края эмульсии, если первичное взаимодействие произошло вне стопки.

Первичным электроном мы считали однократно заряженную частицу, которая в экранирующем веществе и в эмульсионной стопке теряла энергию на создание электронно-фотонного каскада путем тормозного излучения. При этом мы принимали, что угол, под которым электрон с энергией  $E_0 \sim 1 \text{ ТэВ}$  испускает тормозные  $\gamma$ -кванты, согласно [4], имеет порядок величины

$$\theta = \frac{mc^2}{E_0} \ln \frac{E_0}{mc^2} \approx 4 \cdot 10^{-6}. \quad (1)$$

Если же наблюдаемый каскад был создан протоном, то основным процессом, приводящим к образованию каскада, является распад  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ . При этом минимальный угол  $\theta_m$  разлета  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma 1}$  и  $E_{\gamma 2}$  при  $E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} = 1 \text{ ТэВ}$  составляет

$$\theta_m = m_\pi c^2 / \sqrt{E_{\gamma 1} E_{\gamma 2}} = 2,7 \cdot 10^{-4}, \quad (2)$$

где  $m_\pi$  — масса  $\pi^0$ -мезона.

Если принять во внимание поперечный импульс, получаемый  $\pi^0$ -мезоном при взаимодействии, и учесть, что каскад создается большей частью несколькими  $\pi^0$ -мезонами, можно заключить, что углы, под которыми испускаются  $\gamma$ -кванты, в этом случае заведомо больше  $2,7 \cdot 10^{-4}$ .

Поскольку углы испускания  $\gamma$ -квантов (1) и (2) отличаются более чем в 60 раз, анализ углов, под которыми испускаются  $\gamma$ -кванты относительно однозарядной релятивистской частицы, позволяет отличать электрон от протона даже тогда, когда взаимодействие протона в эмульсии не приводит к образованию «звезды» (например, процесс однолучевой когерентной генерации) или испускание  $\gamma$ -квантов произошло вне эмульсионной стопки. В последнем случае для анализа событий можно воспользоваться двумя методами. Если  $\gamma$ -кванты родились недалеко от эмульсии ( $\leq 10 \text{ см}$ ), углы испускания могут быть определены непосредственно по измерению в эмульсии координат треков частиц электронно-позитронных пар. Если же  $\gamma$ -кванты родились на больших расстояниях (максимальное расстояние вещества от эмульсии составляет  $\sim 60 \text{ см}$ ), измеренные в эмульсии углы могут быть искажены многократным рассеянием частиц. В этом случае следует ожидать, что  $\gamma$ -кванты от ядерных взаимодействий должны наблю-

даться на расстояниях  $\sim 100$  мкм друг от друга,  $\gamma$ -кванты от тормозного излучения электрона — на расстоянии менее 10 мкм.

**Результаты.** Просмотр всех 278 каскадов привел к следующим результатам.

Десять каскадов были вызваны взаимодействием в стопке первичного ядра; 39 —  $\alpha$ -частицы; 70 — протона.

В 159 случаях первичное взаимодействие (звезда) в стопке обнаружено не было. Из этих 159 каскадов в 14 событиях среди входящих в стопку частиц были обнаружены фрагменты распада первичных ядер; в 68 каскадах попутно были найдены ядерные взаимодействия частиц высоких энергий, — все это мы считали признаком того, что первичной частицей было ядро или протон.

Оставшиеся 77 событий были подвергнуты анализу по структуре каскада на глубине двух каскадных единиц эмульсии. В 50 событиях была обнаружена яркая структура каскада — скопления электронно-позитронных треков от  $\gamma$ -квантов высокой энергии ( $E \geq 5 \cdot 10^{10}$  эВ) на расстояниях  $\geq 100$  мкм друг от друга, для 20 событий расстояния между отдельными скоплениями составляли  $30 \div 100$  мкм. Только для семи событий не наблюдалось заметной структуры каскада. Все эти семь событий были подвергнуты тщательному анализу. Для этого на микроскопе KSM-1 с увеличением  $15 \times 1, 5 \times 50$  измерялись координаты всех треков заряженных частиц, связанных с данным событием; вычислялись углы между треками, измерялась плотность зерен отдельных треков и пар. Это позволяло восстановить полную пространственную картину развития каскада на первых  $1,5 \div 2$  каскадных единицах пути, а также определить энергию отдельных  $\gamma$ -квантов по угловому раскрытию электронно-позитронных пар или по наблюдаемой величине эффекта Чудакова (для  $E \geq 3 \cdot 10^{11}$  эВ).

Кроме того, определялось распределение ливневых частиц в каскаде на глубине 2, 3, 4, 5 и 6 каскадных единиц в круге радиуса 100 мкм, что позволяло оценить энергию первичной частицы по каскадным кривым, вычисленным И. П. Иваненко с сотрудниками [5].

В итоге из семи событий, отвечающих первоначальным критериям отбора, три идентифицированы как электроны первичного космического излучения с энергией  $E \geq 1$  ТэВ (№ 216, 343, 370, рис. 1).

**№ 216.** В эмульсию входит частица высокой энергии в сопровождении нескольких  $\gamma$ -квантов. Координатное измерение треков электронно-позитронных пар, создаваемых  $\gamma$ -квантами (пары *A, B, C, D* на рис. 1), позволяет утверждать, что точки генерации  $\gamma$ -квантов находятся за пределами стопки. Однако в этом случае углы испускания  $\gamma$ -квантов значительно меньше, чем те, которые могут быть вычислены для возможного распада  $\pi^0$ -мезонов по формуле (2). Углы могут быть согласованы с гипотезой тормозного излучения электрона (1) при учете многократного рассеяния первичного электрона в экранирующем веществе ( $E = 1,1$  ТэВ).

**№ 343.** В стопку входит частица высокой энергии (рис. 1);  $\gamma$ -квантов высокой энергии извне на расстояниях больше 10 мкм не обнаружено. Первичная частица является электроном энергии 3 ТэВ.

**№ 370.** В стопку входят три частицы в круге радиуса 1 мкм (рис. 1). Все частицы испускают  $\gamma$ -кванты в соответствии с условием (1), сопровождаются не менее чем тремя  $\gamma$ -квантами извне на расстоянии менее 5 мкм. Первичная частица — электрон  $E = 1,2$  ТэВ.

Остальные четыре события отклонены, так как первичные частицы, взаимодействия в экранирующем веществе и в стопке, испускали  $\gamma$ -кванты под углами, не отвечающими закономерностям тормозного излучения электрона. Как показывают наши данные, некоторые из событий имеют нетривиальный характер и в установке типа «сендвича» [6], где эмульсионные слои чередуются со слоями поглотителя, вряд ли могут быть правильно идентифицированы. В качестве примера на рис. 2 приводятся схемы развития двух проанализированных событий.

№ 121. В эмульсию входит одна частица (рис. 2). Углы между электронно-позитронными парами и энергия пар соответствуют гипотезе распада трех  $\pi^0$ -мезонов в трех точках около трека первичной частицы на расстояниях  $\leq 0,5$ ; 3,5 и 5,3 мм от края эмульсии. Никаких признаков взаимодействия первичной частицы (звезды) в стопке нет. Первичная частица не является электроном.

№ 434. Входит одна частица в сопровождении  $\gamma$ -кванта  $E \sim 10^{11}$  эВ на расстоянии 5 мкм (рис. 2). После прохождения 6 мм эмульсии частица

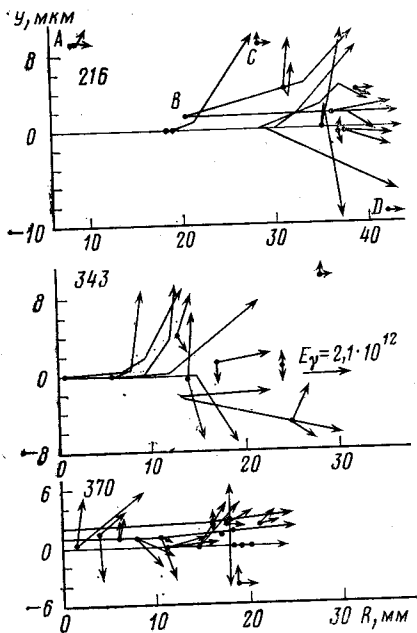


Рис. 1

Рис. 1. Схемы развития электронно-фотонных каскадов для событий № 216, 343 и 370, идентифицированных как электроны

Направление оси абсцисс ( $R$ ) совпадает с направлением движения входящей в стопку частицы. Отсчет расстояния ведется в миллиметрах от края стопки. Сплошные линии — треки заряженных частиц (или пар), штриховые —  $\gamma$ -квантов, точки — точки рождения электронно-позитронных пар

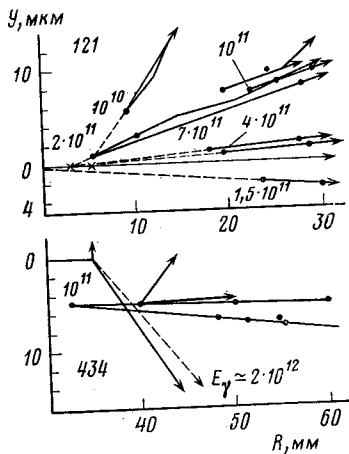


Рис. 2

Рис. 2. Схемы развития электронно-фотонных каскадов для событий № 121 и 434. Обозначения те же

рассеивается на угол  $1,7 \cdot 10^{-3}$ , из точки рассеяния выходит черный след 450 мкм длины, а также испускается  $\gamma$ -квант  $E = 2 \cdot 10^{12}$  эВ. Далее первичная частица проходит в стопке более 11 см эмульсии без потерь на тормозное излучение. Частица — не электрон.

**Поток электронов первичного космического излучения при  $E \geq 1$  ТэВ.** Опираясь на полученные результаты, можно дать оценку величины потока электронов высокой энергии в составе первичного космического излучения.

Для этого мы воспользуемся выражением

$$F(\geq E) = N(\geq E) / \Gamma_{эф} T,$$

где

$$\Gamma_{эф} = \sum_{ij} \Delta \Gamma_{ij} \epsilon_{ij}(l) \psi_{ij}(L),$$

$N(\geq E)$  — число зарегистрированных событий;  $T$  — время экспозиции стопки;  $\Delta \Gamma_{ij}$  — геометрический фактор, образуемый двумя малыми площадками на двух поверхностях стопки;  $\epsilon_{ij}(l)$  — эффективность регистра-

ции электрона внутри  $\Delta\Gamma_{ij}$ , зависящая от пути  $l$ , проходимого каскадом в эмульсии;  $\psi_{ij}(L)$  — эффективность регистрации, обусловленная зависимостью энергетического порога регистрации каскада от длины проекции  $L$  каскада в эмульсионном слое (угла погружения).

Как показали методические исследования, проведенные с нашей эмульсионной стопкой, порог регистрации каскадов невооруженным глазом при длине проекции каскада в эмульсии  $L=1$  мм составляет  $E_{\text{пор}} \approx 1$  ТэВ. При  $L > 1$  мм  $E_{\text{пор}} \leq 1$  ТэВ. Для расчета мы принимали для  $E > 1$  ТэВ  $\psi_{ij}(l \geq 1 \text{ мм}) = 1$ .

Был определен и вид функции  $\epsilon_{ij}(l)$ , которая в расчетах может быть заменена выражением  $\epsilon(l) = 0$  при  $l \leq 11$  см;  $\epsilon(l) = 1$  для  $l \geq 11$  см, что отражает то обстоятельство, что каскадные ливни от электронов энергии  $\sim 1$  ТэВ достигают максимума почернения и, следовательно, могут быть обнаружены после прохождения пути порядка четырех каскадных единиц.

Вычислив эффективный геометрический фактор при этих предположениях для частиц, падающих на стопку из верхней полусферы, получим

$$\Gamma_{\text{эф}} = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{ср},$$

откуда

$$F(\geq 1 \text{ ТэВ}) = (2,0 \pm 1,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Полученная нами величина потока удовлетворительно стыкуется с результатами эксперимента Нишимуры и его сотрудников [6].

Отметим еще, что если принять для напряженности магнитного поля в диске Галактики значение  $6 \cdot 10^{-6}$  Э и для суммарной плотности электромагнитных излучений  $0,5$  эВ/см<sup>3</sup> и, опираясь на эти величины, учитывать потери энергии на магнитно-тормозное излучение и обратный комптоновский эффект, то получим для времени жизни зарегистрированного нами электрона  $E=3$  ТэВ значение  $\sim 10^5$  лет. Если придерживаться диффузионной модели распространения частиц космических лучей в Галактике, то с большой вероятностью источник, испустивший электроны энергии  $\sim 3$  ТэВ, находится ближе 1 кпс от Солнечной системы.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность за плодотворное сотрудничество международному коллективу авторов эксперимента, проведенного на ИСЗ «Интеркосмос-6», особо отметив сотрудников НИИЯФ МГУ, проделавших большую работу по предварительному просмотру каскадов в эмульсии. Автор благодарен также проф. Н. Л. Григорову за полезные дискуссии и постоянный интерес к работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Nishimura J., Fujii M., Taira T.* Electron spectrum at the High Energy Side.— Proc. 16th Int. Conf. Cosmic Rays, 1979, p. 488.
2. *Бриккер С. И., Вайсберг Ю. В., Григоров Н. Л. и др.* Регистрация ядерных взаимодействий частиц первичных космических лучей высокой энергии методом контролируемой эмульсионной стопки.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1974, т. 38, № 5, с. 930.
3. *Ведешин Л. А., Ныжмик Р. А., Рапопорт И. Д., Тугенков А. Ф.* Исследования частиц космического излучения на ИСЗ «Интеркосмос-6».— Вестн. АН СССР, 1973, № 11, с. 59.
4. *Streans M.* Mean Square Angles of Bremsstrahlung and Pair Production.— Phys. Rev., 1949, v. 76, № 6, p. 836.
5. *Аминева Т. П., Астафьев В. А., Верховицкая А. Я. и др.* Исследование мюонов сверхвысоких энергий. Метод рентгено-эмульсионных камер. М.: Наука, 1975, с. 38.
6. *Nishimura J., Fujii M., Taira T. et al.* Emulsion Chamber Observations of Primary Cosmic Ray Electron in the Energy Range 30–1000 GeV.— ISAS Research Note 38. Tokyo, 1979, p. 1.

Поступила в редакцию  
24.XI.1980