

УДК 537.591.15

ОБРАБОТКА ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО МЕТОДА ПОИСКА ПЕРВИЧНЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕНТГЕНОЭМУЛЬСИОННЫХ КАМЕРАХ (ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА RUNJOB)

И. С. Заярная

В российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB треки первичных однозарядных частиц обнаружены примерно в половине событий, отнесенных к протонным. При повторной обработке экспериментальных данных, полученных при экспонировании рентгеноэмульсионных камер RUNJOB-3B, 6A, 11A, 11B, с использованием нового метода поиска первичных космических частиц, в группе событий, отнесенных к протонным, с энергией первичной частицы $E_0 > 20$ ТэВ и зенитным углом $tg \theta \leq 5$ так же, как и ранее не обнаружено примерно 50% треков первичных однозарядных частиц. В работе представлен новый метод поиска и прослеживания частиц в РЭК; приведены характеристики обработанных событий (энергия, зенитный угол, глубина проникновения частиц в РЭК до взаимодействия).

Ключевые слова: космические лучи, рентгеноэмульсионные камеры, состав и спектр галактических космических частиц.

Введение. Российско-японский баллонный эксперимент RUNJOB проводился с 1995 года по 1999 год. Задача эксперимента состояла в определении состава и спектра космического излучения в области энергии $10^{12} - 10^{15}$ эВ с использованием рентгеноэмульсионных камер (РЭК), экспонируемых в стратосфере в течение длительного времени. Нуклоны и ядра первичного космического излучения, попадая в рентгеноэмульсионную камеру (см. рис. 1), взаимодействовали с веществом камеры, образуя

струю вторичных частиц, состоящую в основном из π^\pm , π^0 -мезонов. Нейтральные пионы давали начало электрон-фотонным каскадам (ЭФК), которые регистрировались в рентгеновских пленках калориметра в виде пятен почернения.

Используя различные критерии отбора событий (по зенитному углу, суммарной энергии, выделившейся в нейтральную компоненту, и т.д.), ядерно-электромагнитные каскады прослеживались в ядерно-эмульсионных пленках снизу вверх до вершины взаимодействия частицы первичного космического излучения с веществом РЭК. При поиске первичных частиц в эксперименте RUNJOB считалось, что если в области предсказания местоположения первичной частицы не было частицы-кандидата с $Z \geq 2$, то в этой области должен быть протон (или вторичная однозарядная, или нейтральная частица, образованная в результате взаимодействия первичной в остаточной атмосфере). По данным обработки экспериментального материала [1] треки первичных однозарядных частиц были найдены примерно в половине событий, отнесенных к протонным. Для объяснения не обнаружения треков протонов в большом количестве событий в работе [2] исследовались методические (фон треков частиц, набираемых эмульсией при длительном экспонировании, случайная ошибка) и возможные физические причины (нейтральные частицы, образованные в результате взаимодействия первичных космических частиц в остаточной атмосфере). Установлено, что однозарядные вторичные частицы из нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий, зарегистрированных в РЭК, с эффективностью близкой к 100% прослеживаются в нескольких эмульсионных пленках. Следовательно, не нахождение трека первичной однозарядной частицы в большом количестве событий (50%) нельзя объяснить фоновой загруженностью частицами, которая затрудняет поиск релятивистских однозарядных частиц. Случайная ошибка метода поиска первичных космических частиц, связанная с пропуском частицы при одноразовом просмотре области предсказания местоположения трека частицы, определялась сканированием данной области эмульсии разными экспериментаторами и составила $\approx 12\%$, что не позволяет объяснить всего количества необнаруженных треков. В работе [3] проводились расчеты по моделям взаимодействия MC0 и QGSJET (CORSIKA, версия 5.2) для исследования вторичной компоненты первичных космических частиц на уровне экспонирования РЭК, где показано, что в атмосфере на глубине ~ 10 г/см² вклад нейтронов в общий поток вторичных космических частиц с энергией > 20 ТэВ в интервале углов $0 - 70^\circ$ составляет $\sim 4\%$. Такое количество нейтронов не объясняет большого количества событий с отсутствующими треками однозарядных первичных частиц. Поскольку в эксперименте RUNJOB в результирующий спектр протонов [4] вошли события (360 из

598 событий, зарегистрированных и отнесенных к протонным) с высоким энергетическим порогом отбора ($E_0 \geq 10$ ТэВ/нуклон), то с целью повторного поиска первичных частиц в протонных событиях с меньшей энергией предложен новый метод поиска и прослеживания частиц в РЭК.

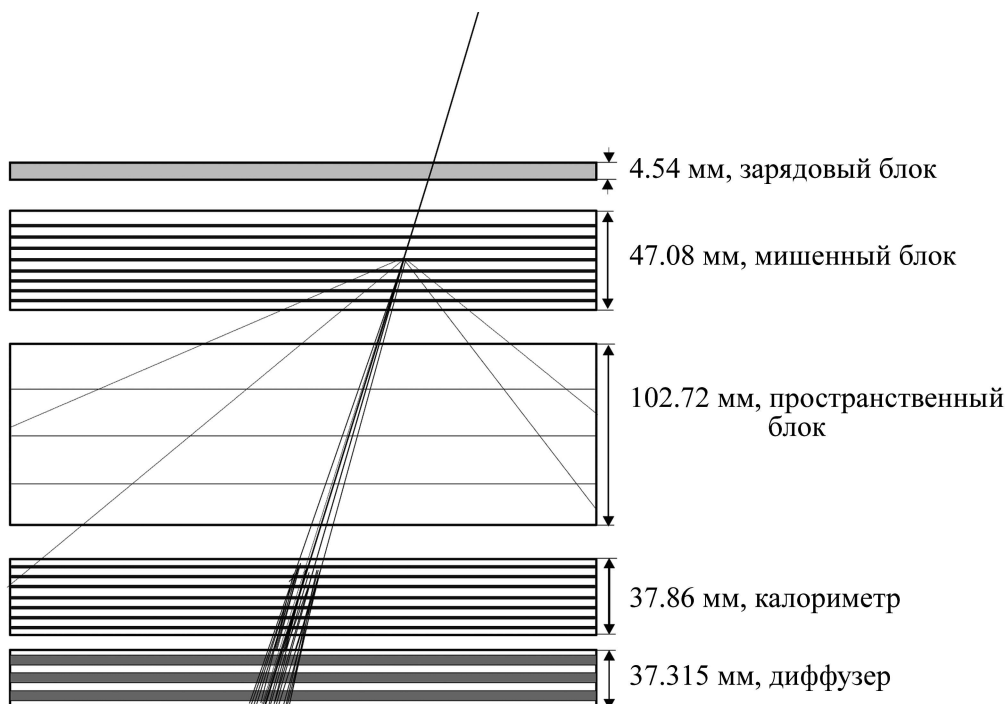


Рис. 1: Схема РЭК RUNJOB 97.

Новый метод поиска первичных частиц из взаимодействий, зарегистрированных в РЭК. Методика поиска и прослеживания треков первичных частиц, провазимодействовавших в РЭК, ранее применявшаяся в эксперименте RUNJOB, включает в себя метод триангуляции [5]. Суть метода состоит в определении поправок на смещения и повороты ядерно-эмульсионных пленок, на расстояние между ними по расчетным траекториям фоновых многозарядных ядер, близко расположенных к вершине взаимодействия, используя измерения координат и углов треков этих фоновых ядер в нескольких (3–4) пленках, в системе координат, связанной с одним из углов ядерных пленок. По уточненной геометрии камеры рассчитывалась траектория первичной частицы, и определялось ее местоположение по зенитному и азимутальному углам оси струи вторичных частиц, генетически связанных с первичной частицей. Точность локализации первичной частицы данного метода составляет в среднем около 35 мкм [1]. При такой ошибке предсказания местоположения первичного трека однозначно идентифицируются ядра

с зарядом $Z \geq 2$. Для поиска первичных космических частиц в эксперименте RUNJOB использовался измерительный комплекс CALS, включающий в себя микроскоп с автоматически движущимся большим предметным столом [6].

В основе нового метода поиска и прослеживания первичной частицы лежат два предположения:

1. Траектории анализируемых в эксперименте нуклонов и ядер космического излучения в РЭК – прямые линии.

2. Толщина эмульсионного слоя, основы ядерной пленки и расстояние между эмульсионными пленками в пределах малой локальной области ($\sim 1 \text{ см}^2$) принимаются постоянной.

Одна из осей координатной системы располагается вдоль проекции трека фонового ядра на плоскости эмульсии. На рис. 2 представлена примерная схема взаимного расположения треков частиц в плоскости ядерных пленок.

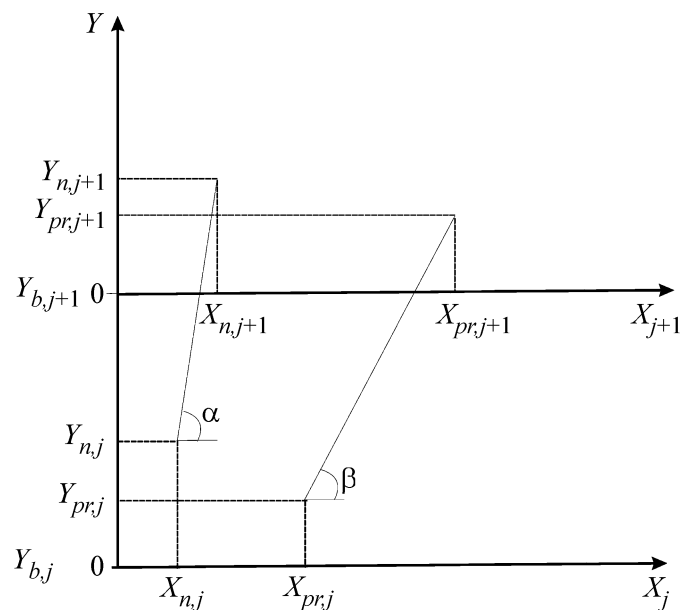


Рис. 2: Схема взаимного расположения фоновых ядер и первичной частицы в плоскости эмульсий. (X_{pr}, Y_{pr}) – координаты первичной частицы, (X_n, Y_n) , (X_b, Y_b) – координаты фоновых ядер.

Для определения координат и длин проекций трека первичной частицы в эмульсионном слое и основе ядерной эмульсионной пленки, расположенной выше вершины взаимодействия частицы с веществом РЭК, используются полученные в работе [7] сле-

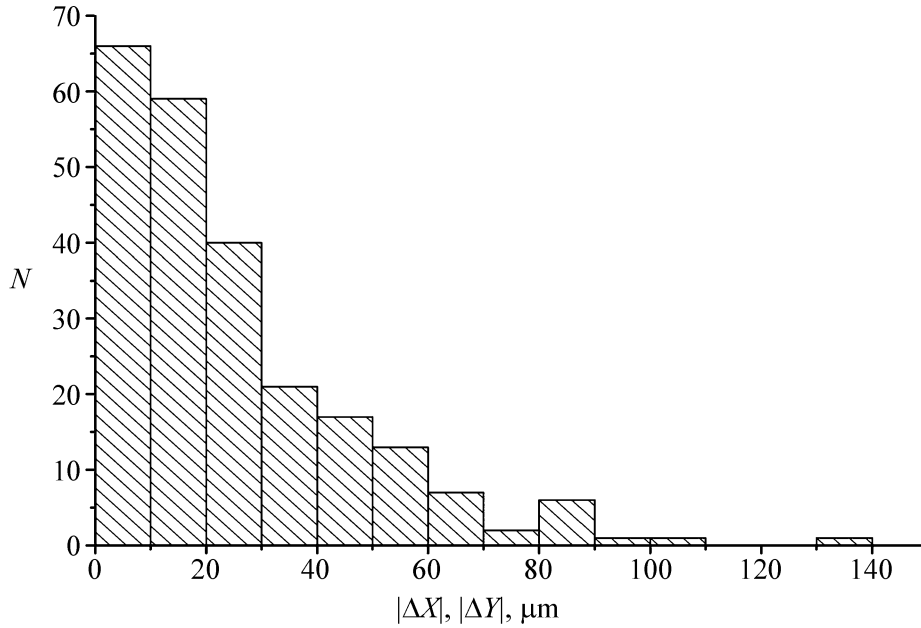


Рис. 3: Распределение отклонений координат ($|\Delta X|, |\Delta Y|$) найденных треков ядер космического излучения от предсказанных по новому методу.

дующие соотношения:

$$I \begin{cases} X_{pr,j+1} = X_{jet,j} + \frac{\Delta X_n * P_{jet,j} * \sin(\beta_j)}{P_{n,j} * \sin(\alpha_j)} \\ Y_{pr,j+1} = Y_{jet,j} + \frac{\Delta Y_n * (P_{b,j} - P_{jet,j} * \cos(\beta_j))}{(P_{b,j} - P_{n,j} * \cos(\alpha_j))} \end{cases}$$

$$II \begin{cases} L_{pr,j+1} = \frac{L_{n,j+1} * L_{jet,j}}{L_{n,j}} \\ P_{pr,j+1} = \frac{P_{n,j+1} * P_{jet,j}}{P_{n,j}}, \end{cases}$$

где $(X_{i,j}; Y_{i,j}), L_{i,j}, P_{i,j}$ – координаты треков измеряемых частиц и длины их проекций в эмульсии и основе ядерных эмульсионных пленок соответственно; α_j – азимутальный угол одного из фоновых ядер; β_j – азимутальный угол струи вторичных частиц, индекс i указывает на тип частицы (первичная частица (pr), струя вторичных частиц (jet), фоновые ядра (b, n)); j – номер эмульсионной пленки; $\Delta X_n, \Delta Y_n$ – разница между измеренными значениями координат трека фонового ядра в эмульсионных пленках.

Т а б л и ц а 1

Характеристики повторно обработанных событий

№ события	Первичная частица	$\text{tg}(\theta)$	ΣE_γ	L – длина пути до взаимодействия в РЭК в единицах среднего свободного пробега протона	L – длина пути до взаимодействия в РЭК в каскадных единицах
3В 025	p	0.64	15.97	0.044	
3В 082	p	3.24	6.58	0.168	
3В 095	–	4.83	85.48	0.482	11.64
3В 116	–	2.29	7.39	0.247	5.91
3В 189	–	4.64	8.71	0.351	8.87
3В 211	–	4.74	10.8	0.662	15.99
3В 226	p	1.41	15.09	0.168	
3В 240	p	0.85	5.54	0.127	
3В 311	p	0.28	7.43	0.032	
3В 318	?	0.4	9.76	0.017	
6А 046	–	2.66	7.88	0.43	9.9
6А 051	–	1.07	48.42	0.101	0.8
6А 150(base)	p	1.23	6.03	0.092	
6А 204	p	2.29	42.45	0.039	
6А 267	–	3.36	63.56	0.241	6.48
6А 465	p	3.98	15.46	0.056	
6А 519	?	4.78	9.22	0.135	3.6
11А 17	p	1.94	5.83	0.069	
11А 25	p	1.14	14.44	0.035	
11А 67	–	1.79	28.48	0.125	3.1
11А-91	p	0.65	5.37	0.187	
11А 299	–	1.11	6.63	0.33	1.9
11А 427	–	4.74	5.71	0.545	14.4
11А 525	p	3.51	5.97	0.299	
11А 593	p	3.97	6.48	0.585	
11А 619	–	2.14	10.48	0.449	7.5

Продолжение т а б л и ц ы 1

№ события	Первичная частица	$\text{tg}(\theta)$	ΣE_γ	L – длина пути до взаимодействия в РЭК в единицах среднего свободного пробега протона	L – длина пути до взаимодействия в РЭК в каскадных единицах
11A 1133	–	0.14	6.1	0.239	1.6
11B 090	p	1.24	27.05	0.128	
11B 560	–	3.88	16.06	0.165	4.4
11B 596	–	4.54	18.84	0.509	13.9
11B 600	–	4.85	5.91	0.482	12.6
11B 614	p	2.99	5.26	0.494	
11B 892	p	2.96	16.33	0.397	

Новый метод был апробирован на ядро-ядерных взаимодействиях, зарегистрированных в РЭК RUNJOB-3B,6A,11A,11B. Идентификация ядер с $Z > 2$ полностью совпала.

На рис. 3 показано распределение отклонений координат найденных треков ядер космического излучения от предсказанных. Точность предсказания (σ) местоположения ядер ($Z \geq 2$) первичного космического излучения в ядерной эмульсии с использованием нового метода составляет ~ 22 мкм. Ошибка предсказания координат трека частицы зависит от угла падения частицы в РЭК. Для нуклон-ядерных взаимодействий в группах событий с $\text{tg}(\theta) \leq 1$ и $\text{tg}(\theta) \geq 1.73$ среднеквадратичная ошибка предсказания трека первичной частицы $\sigma \sim 21\mu$ и $\sigma \sim 52\mu$ соответственно.

Результаты повторного поиска первичных частиц в событиях, отнесенных к протонным. Повторный поиск первичных однозарядных частиц с применением нового метода проведен в событиях, зарегистрированных в РЭК RUNJOB-3B,6A,11A,11B, с порогом отбора по энергии, выделившейся в гамма-кванты $\Sigma E_\gamma \geq 5$ ТэВ, и по зенитному углу $\text{tg} \theta \leq 5$. В результате обработки всех “протонных” событий из четырех камер (33 взаимодействия) получено:

- а) все первоначально найденные протоны в эксперименте RUNJOB также были обнаружены с использованием нового метода;
- б) в каждой РЭК оказалось примерно 50% событий с отсутствием трека первичного протона;
- в) струи вторичных частиц в двух взаимодействиях близко расположены к границам

эмульсионных пленок, где наблюдается дисторсия эмульсии. Для этих событий уверенно можно сказать, что в слоях, где должна наблюдаться первичная частица, отсутствует трек частицы-кандидата с зарядом $Z \geq 2$.

Таким образом, результат отсутствия однозарядных первичных частиц примерно в 50% событий, отнесенных к протонным, повторился.

В таблице 1 приведены характеристики повторно обработанных событий.

Во второй колонке таблицы 1 с первичной частицей знаком минус отмечены события с необнаруженным треком протона, а знаком вопроса – события, находящиеся на краю эмульсионной пленки, где наблюдается дисторсия эмульсии.

При сравнении характеристик событий получено, что в среднем по всем РЭК средние значения энергии, выделившейся в нейтральную компоненту вторичных частиц – $\langle \sum E_{\gamma}^{(0)} \rangle$, и глубины проникновения частиц в РЭК до взаимодействия для событий с отсутствующим и найденным треком протона различаются примерно в 1.5 и 2 раза соответственно. Подавляющее число событий с необнаруженным первичным однозарядным треком имеют зенитный угол больше 60° , но и относительное число найденных треков протонов с углами больше 60° не мало и составляет половину от всех событий с наблюдаемым однозарядным треком.

Заключение. Двумя разными методами поиска первичных космических частиц во взаимодействиях, зарегистрированных в рентгеноэмульсионных камерах RUNJOB-3B,6A,11A,11B, экспонировавшихся в 1996, 1997, 1999 годах, с порогами отбора по энергии $\sum E_{\gamma} > 5$ ТэВ и зенитному углу $\text{tg } \theta \leq 5$ (примерно 1/4 общей статистики в эксперименте RUNJOB с данными порогами) получен одинаковый результат: примерно для половины событий, отнесенных к протонным, трек первичной однозарядной релятивистской частицы не обнаружен. Поскольку рассмотренные методические причины не объясняют такого большого количества ненайденных однозарядных первичных частиц, то следовательно можно предположить, что в потоке космических частиц присутствует неизвестная компонента.

Кроме того имеются различия в характеристиках событий с наблюдаемым и отсутствующим первичным однозарядным треком. Однако, по мнению автора, статистика событий с данными порогами отбора в группах (в среднем по 8 частиц на одну рентгеноэмульсионную камеру) не позволяет сделать окончательный вывод о присутствии неизвестной компоненты. Поэтому требуется обработка дополнительных событий с целью получения статистически значимых данных.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. V. Aranasenko et al., *Astroparticle Phys.* **16**, 13 (2001).
- [2] И. С. Заярная, *ЯФ* **71**(2), 1 (2008).
- [3] В. А. Березовская и др., Препринт №97-43/494 (НИИЯФ МГУ, Москва, 1997).
- [4] M. Nagayama et al., “*Proton and Helium spectra obtained by RUNJOB experiment*”, *Proc. 29th ICRC,V3:OG1.1*, p. 101 (2005).
- [5] A. V. Aranasenko et al., *Proc. 25th ICRC,V5:Ses.OG10-11*, p. 301 (1997).
- [6] M. Ichimura et al., *Nucl. Instr. Meth.* **A300**, 374 (1991).
- [7] И. С. Заярная, Препринт № 1 (ФИАН, Москва, 2010).

Поступила в редакцию 29 мая 2012 г.