

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 537.591.15

**СПЕКТР ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ОБЛАСТИ
ЭНЕРГИЙ 10–500 ТЭВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОВТОРНОЙ
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ
СТРАТОСФЕРНЫХ РЕНТГЕНО-ЭМУЛЬСИОННЫХ КАМЕР**

И. С. Заярная

В настоящей работе представлен спектр первичных галактических частиц с энергией $10 < E_0 < 500$ ТэВ, полученный по данным повторной обработки событий, отнесенных к нуклон-ядерным взаимодействиям, зарегистрированным в четырех рентгено-эмульсионных камерах (РЭК), экспонировавшихся в стратосфере на уровне ≈ 10 г/см², в течение 6–7 суток в российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB. Данный спектр согласуется в пределах статистических ошибок со спектром протонов, опубликованным по результатам финальной обработки экспериментального материала RUNJOB [1]. Представляемый спектр галактических частиц включает события, отнесенные к нуклон-ядерным взаимодействиям с найденной и отсутствующей однозарядной первичной частицей, и сравнивается со спектром, построенным только по событиям с наблюдаемым первичным протоном, а также с финальным спектром протонной компоненты космических частиц эксперимента RUNJOB.

Ключевые слова: космические лучи, протонная компонента галактических частиц, нейтральные частицы, стратосферная рентгено-эмульсионная камера, спектр.

Введение. Исследование состава и спектров различных компонент космического излучения в энергетической области, близкой к 10^{15} эВ, так называемой области “изло-

ма” в спектре первичных космических частиц, до сих пор остается актуальной задачей как для “прямых” экспериментов – на спутниках и аэростатах [2–4], так и для наземных экспериментов, исследующих свойства широких атмосферных ливней (ШАЛ) [5]. В российско-японском баллонном эксперименте RUNJOB, проводившемся с 1995 г. по 1999 г. [1, 6] методом стратосферных рентгено-эмульсионных камер (РЭК), экспонировавшихся в атмосфере на глубине ~ 10 г/см² в течение $\sim 6\div 7$ суток, получены спектры различных компонент космического излучения в энергетической области $10^{12} - 10^{15}$ эВ. В спектр протонов вошли зарегистрированные в РЭК взаимодействия галактических частиц, отнесенные к нуклон-ядерным. Примерно в половине этих взаимодействий трек первичной однозарядной частицы не был обнаружен [7], что явилось поводом для повторной обработки экспериментального материала. В результате этой обработки, используя экспозиции РЭК RUNJOB III-B, VIA, XI-A, B, проведенные в 1996–1999 годах, а также новый метод поиска и прослеживания частиц в РЭК, получено согласие с первоначальным результатом, а именно, примерно в 50% событий трек первичной частицы в исследуемых нуклон-ядерных взаимодействиях отсутствует [8]. Нейтроны, образованные при взаимодействии первичных космических частиц с веществом остаточной атмосферы, также инициируют ядерно-электромагнитные каскады, регистрируемые в РЭК. Однако по расчетам, проведенным по модели MC0 [9], поток этих частиц с зенитными углами $\text{tg}\theta < 5$ должен быть на порядок меньше, чем полученный в эксперименте. Кроме того, регистрация крайне редких событий-взаимодействий космических частиц с веществом ядерно-эмульсионных пленок РЭК RUNJOB III-B, XI-A, B [10, 11], в которых трек первичной однозарядной частицы также отсутствовал, может указывать на большой поток нейтральных частиц (нейтронов, как наиболее вероятных). По ранее опубликованным материалам вторичной обработки обнаружено различие в угловых распределениях двух групп взаимодействий – с наблюдаемым и отсутствующим треком первичной частицы в области поиска (круг с $R \approx 3\sigma$) [12], а именно, угловое распределение с наблюдаемыми треками протонов близко к изотропному, а для событий с отсутствующим треком первичной частицы угловое распределение аппроксимируется функцией близкой к $\sim 1/\cos^{1.8}(\theta)$.

Экспериментальные данные. В российско-японской коллаборации RUNJOB экспериментальные данные для анализа спектров и состава космического излучения получены методом стратосферных рентген-эмульсионных камер, подробно описанном в работах [6, 7]. Преимуществом данного метода является использование в качестве детекторов двухсторонних ядерно-эмульсионных пленок с высоким зарядовым и простран-

ственным разрешением, что позволяет надежно исследовать состав первичного космического излучения. В эксперименте RUNJOB заряд первичной частицы определялся по ионизации, производимой ею в ядерной эмульсии [7] (методом счета зерен и пробелов на треке легкой компоненты космического излучения с точностью $0.2e$). Для определения энергии первичной частицы в нуклон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте использовался, в основном, фотометрический метод (по измерениям почернений пятен на рентгеновских пленках, образованных частицами электромагнитного каскада, определялась суммарная энергия этого каскада ΣE_γ и затем осуществлялся пересчет к первичной энергии E_0 по формуле $E_0 = C_\gamma \cdot \Sigma E_\gamma$, где C_γ – фактор конверсии, рассчитанный с использованием программы моделирования FRITIOF [7]. Спектр компонент первичного космического излучения определялся по суммарным экспозициям РЭК по формуле:

$$\Delta I_0 = \frac{\Sigma_j \Delta N_j}{\Sigma_j \xi_j S_j \Omega_j(\tau_j) T_j e^{-\tau_j}}, \quad (1)$$

где ΔI_0 – абсолютная дифференциальная интенсивность компоненты космических частиц на границе атмосферы, ΔN – число частиц в интервале энергии, ξ – эффективность регистрации РЭК, S – площадь установки, $\Omega_0(\tau)$ – эффективный телесный угол, T – время полета установки, τ – эффективная высота полета установки, j – индекс РЭК [7].

С использованием этой формулы строились спектры по повторно обработанным нуклон-ядерным взаимодействиям из четырех РЭК III-B, VI-A, XI-A, В экспозиций 1996–1999 годов с порогами отбора событий по энергии, выделившейся в электромагнитную компоненту $\Sigma E_\gamma > 3$ ТэВ и по зенитному углу $\text{tg}(\theta) \leq 5$, для которых выполнялись следующие требования:

1. Траектория первичной частицы проходит через самую нижнюю эмульсионную пленку в калориметре.
2. Глубина камеры в каскадных единицах (t) от вершины взаимодействия до самой нижней пленки калориметра не меньше $4t$.
3. Вершина взаимодействия находится внутри РЭК.

Общее количество таких взаимодействий – 65, из них 31 событие (взаимодействие) с отсутствующим треком первичной частицы в области поиска. На рис. 1 представлены дифференциальные энергетические спектры по нуклон-ядерным взаимодействиям из РЭК RUNJOB-III-B, VI-A, XI-A, В по полной группе событий (65) и по группе событий (34), в которых наблюдается трек первичного протона. Для сравнения на этом рисунке

приведен финальный спектр протонной компоненты космических частиц эксперимента RUNJOB [1].

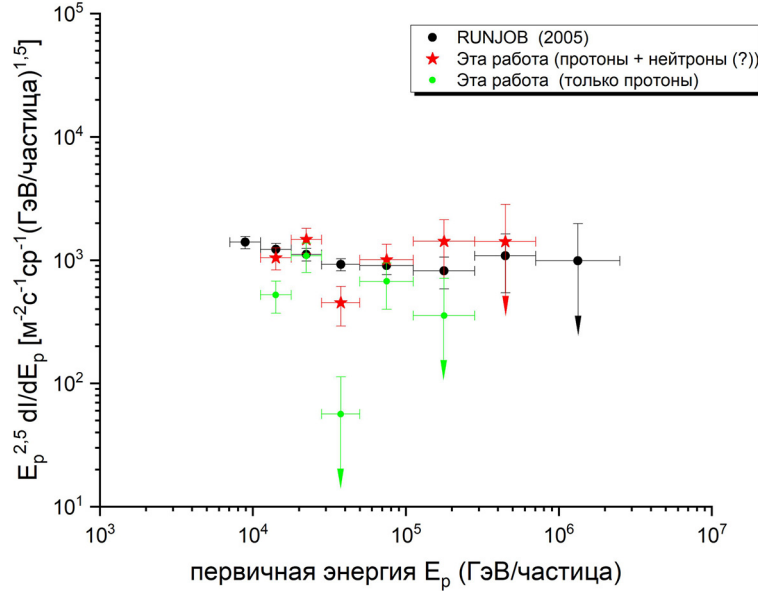


Рис. 1: Спектры протонов эксперимента RUNJOB и первичных частиц из взаимодействий, отнесенных к нуклон-ядерным, по экспозициям RUNJOB III-B, VIA, XI-A, B.

Обсуждение. Общую статистику финального спектра протонной компоненты эксперимента RUNJOB (на рис. 1 спектр отмечен – ●) составляют 360 событий, отнесенных к нуклон-ядерным взаимодействиям, зарегистрированным в РЭК RUNJOB, экспозиций 1995–1999 годов. Следует отметить, что в спектр вошли данные обработки РЭК, экспонировавшихся в 1995 и 1999 годах с высоким энергетическим порогом отбора событий ($\Sigma_\gamma \geq 5$ ТэВ); экспозиция камер 1999 года составляет примерно половину от общей экспозиции РЭК. Статистика событий, вошедших в спектр нуклонов в данной работе (на рис. 1 отмечен ★) – примерно четверть общей статистики нуклон-ядерных взаимодействий эксперимента RUNJOB в энергетическом интервале первичной частицы от ~ 10 ТэВ до 500 ТэВ. При построении спектров по всем 65 событиям (★), и по 34 из них, в которых наблюдается трек протона (зеленый ○), использовалось то же разбиение энергетической шкалы на бины, что и при получении финального протонного спектра RUNJOB.

Как видно на рис. 1, в пределах статистических ошибок спектр по 65 повторно обработанным событиям, отнесенных к нуклон-ядерным взаимодействиям, согласуется с финальным спектром протонной компоненты космических частиц эксперимента

RUNJOB. В то же время, если сравнивать спектр наблюдаемых в ядерной эмульсии протонов (зелёный о) по экспозициям четырех РЭК (RUNJOB-IIIB, VI-A, XI-A, B) с другими спектрами на рис. 1, то заметны сильные флуктуации этого спектра, что скорее всего говорит о недостаточности статистического материала. На последней международной конференции по космическим лучам (ICRC-23) в прямых спутниковых экспериментах CALET [13], DAMPE [3], ISS-CREAM [14] указывается на особенность в спектре протонов в области энергии около 10 ТэВ, а именно, спектр резко укручается. Утверждать о согласии с этой особенностью полученного в данной работе протонного спектра затруднительно из-за малой статистики экспериментальных данных.

Заключение. В этой работе представлены спектры нуклонной компоненты первичных галактических частиц в интервале энергий 10–500 ТэВ, полученные по данным вторичной обработки нуклон-ядерных взаимодействий, зарегистрированных в четырех рентгено-эмульсионных камерах, экспонировавшихся в 1996–1999 годах в стратосфере, баллонного эксперимента RUNJOB. Спектр, построенный по сумме событий с наблюдаемым однозарядным треком первичной частицы и отсутствующим во взаимодействиях, отнесенных к нуклон-ядерным, согласуется в пределах статистических ошибок с финальным протонным спектром эксперимента RUNJOB. Однако спектр, полученный только по событиям с наблюдаемым треком протона, обнаруживает сильные флуктуации, которые возможно связаны с малой статистикой. События с нейтральной первичной частицей нуклон-ядерных взаимодействий расположены, в основном, в области энергий выше 30 ТэВ. Для устранения флуктуаций в спектре первичных протонов с энергией больше 10 ТэВ желателен набор дополнительной статистики. Большая доля нуклон-ядерных взаимодействий с необнаруженной первичной частицей ($\approx 50\%$) по данным всех стратосферных РЭК продолжает оставаться загадкой.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. A. Derbina, V. I. Galkin, M. Hareyama, et al. (RUNJOB Collaboration), *Astrophysical Journal*, No. 1, 41 (2005). DOI: 10.1086/432715.
- [2] O. Adriani et al. (CALET Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **128**, 131103 (2022). DOI: 10.1103/128, 131103.
- [3] F. Alemanno et al. (DAMPE Collaboration), *Phys. Rev. D* **109**, L121101 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevD.109.L121101.

- [4] Y. S. Yoon, T. Anderson, A. Barrau, et al., *ApJ* **839**(5), 1 (2017). DOI: 10.3847/1538-4357aa68e4.
- [5] A. Albert et al., *Phys. Rev. D* **105**, 063021 (2022). DOI: 10.1103/PhysRevD.105.063021.
- [6] M. Hareyama et al. (RUNJOB Collab.), In *Proceedings of the 29 ICRC* (Pune, 2005), V3:OG1.1, p. 17.
- [7] A. V. Apanasenko, V. A. Sukhadolskaya, V. A. Derbina, et al. (RUNJOB Collaboration), *Astropart. Phys.* **16**, 13 (2001). DOI: 10.1016/S0927-6505(00)00163-8.
- [8] И. С. Заярная, *Ядерная Физика* **71**(2), 280 (2008). DOI: 10.1134/S1063778808020075.
- [9] В. А. Березовская, В. И. Галкин, Р. А. Мухамедшин и др., Препринт НИИЯФ МГУ-97-43/494 (Москва, 1997).
- [10] И. С. Заярная, Т. А. Ирхина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(5), 3 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619050014.
- [11] И. С. Заярная, Т. А. Ирхина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **48**(5), 30 (2021). DOI: 10.3103/S1068335621110087.
- [12] I. S. Zayarnaya, T. A. Irkhina, *Physics of Atomic Nuclei* **82**(6), 637 (2019). DOI: 10.1134/S1063778819050144.
- [13] Shoji Torii, In *Proceedings of the 38 ICRC* (Nagoya, 2023), 002.
- [14] Kenichi Sakai et al., In *Proceedings of the 38 ICRC* (Nagoya, 2023), 136.

Поступила в редакцию 8 апреля 2025 г.

После доработки 1 июля 2025 г.

Принята к публикации 3 июля 2025 г.