

ПРИМЕНЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОСТИ В РАЗВИТИИ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

А. Федосимова^{1,2}, *С. Ибраимова*^{1,*}, *И. Лебедев*¹,
*Е. Бондарь*¹, *Н. Ережен*^{1,2}

¹ Физико-технический институт, Satbayev University, Алматы, 050032, Казахстан

² Институт ядерной физики, Алматы, 050032, Казахстан

Подробно рассматриваются проблемы определения первичной энергии космических лучей, обусловленные большими флуктуациями развития ливня. Предлагается решение этих проблем на основе метода уменьшения флуктуаций (МУФ). Этот метод основан на предположении об универсальности развития каскадов, образованных частицами одинаковой энергии и заряда. Показано, что корреляционные кривые, используемые в МУФ, флуктуируют значительно меньше каскадных кривых. В связи с этим использование корреляционных кривых позволяет существенно увеличить точность определения энергии в индивидуальных событиях. Предложенная методика универсальна для разных энергий и разных ядер.

The problems of determining the primary energy of cosmic rays caused by large fluctuations in the development of a shower are considered in detail. A solution to these problems is proposed using the method of fluctuation reduction (MFR). This method is based on the assumption of the universality of the development of cascades formed by particles of the same energy and charge. It is shown that the correlation curves used in MFR fluctuate significantly less than the cascade curves. In this regard, the use of correlation curves allows one to significantly increase the accuracy of determining the energy in individual events. The proposed technique is universal for different energies and different nuclei.

PACS: 13.85.Tr

ВВЕДЕНИЕ

Для понимания особенностей формирования и процессов распространения космических лучей в Галактике необходимо точное знание элементного состава и энергетических спектров первичных космических лучей [1–3].

Доминирующая сейчас точка зрения, что галактические космические лучи образуются при взрывах сверхновых звезд. Теоретические исследования предсказывают, что энергетический спектр первичных космиче-

* E-mail: sayara_ibraimova@mail.ru

ских лучей в широком диапазоне энергий следует простому степенному закону $dJ/dE \sim E^\gamma$ (пока энергии не станут выше максимального предела ускорения источников, основанных на традиционных моделях ускорения Ферми) [4–6]. В области 3 ПэВ наблюдается изменение спектрального индекса с $\gamma \approx -2,65$ до $\gamma \approx -3,1$. Эту область в спектре космических лучей принято называть «колено». Эти представления подтверждались и экспериментальными измерениями [7, 8].

Однако такая простая картина была поставлена под сомнение недавними измерениями на основе прямых измерений космических лучей, в которых было обнаружено нарушение постоянства спектрального индекса в энергетических спектрах протонов [9]. Полученный спектр протонов характеризуется увеличением спектрального индекса при энергиях в несколько сотен ГэВ и уменьшением от $\sim -2,60$ до $\sim -2,85$ при $\sim 13,6$ ТэВ со значимостью $4,7\sigma$. Этот результат предполагает существование новой спектральной особенности космических лучей и может изменить (улучшить) существующие представления о происхождении или распространении (в космическом пространстве) галактических космических лучей.

Основные теоретические объяснения аномалии следующие: вклад от близких источников в «выпуклость» спектров КЛ [10, 11]; взаимодействие между КЛ и ускоряющимися ударными волнами [12]; эффекты в процессе распространения КЛ [13]; множественные источники ускорения как наложенные факторы [14].

Также нельзя полностью исключать экспериментальные или реконструктивные эффекты. При этом наиболее существенно на точность определения первичной энергии (при ТэВ и выше) влияют флуктуации в развитии каскадных процессов. Эта проблема существует и при прямом измерении космических лучей за пределами земной атмосферы на космических кораблях или высотных аэростатах [15, 16], и при анализе широких атмосферных ливней (ШАЛ) [17], регистрируемых на наземных станциях космических лучей.

Необходимо также отметить, что если существуют нерегулярности в спектре протонов при энергии $\sim 13,6$ ТэВ, то, вероятно, также должны наблюдаться нерегулярности в спектре более тяжелых элементов при более высоких энергиях.

В данной работе подробно рассматриваются проблемы определения энергии и массы первичных космических ядер, обусловленные большими флуктуациями развития ливня. Предлагается решение этих проблем на основе метода уменьшения флуктуаций (МУФ). Все представленные результаты получены с помощью моделирования на основе пакета программ CORSIKA [18].

1. МУФ ДЛЯ РЕКОНСТРУИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Информация, получаемая при исследовании ШАЛ, имеет весьма косвенный характер, так как первое взаимодействие космической частицы происходит в верхних слоях атмосферы. Вследствие этого обычно экспериментаторы оперируют не с одиночными событиями, а с целым ансамблем ливней, разбитых на группы по числу электронов на уровне наблюдения, которое в среднем пропорционально энергии первичной частицы. В процессе анализа проводится сопоставление средних характеристик группы ливней с модельными расчетами, в основу которых обычно закладываются параметры элементарного акта из ускорительных данных. Для определения первичной энергии E по числу вторичных частиц на уровне наблюдения обычно используют следующую зависимость: $N_e = \alpha E^{\beta}$, где α , β — параметры, зависящие от глубины проникновения и массы первичной частицы. Уравнение статистически корректно. Однако N_e сильно флуктуирует в рамках отдельного события.

На рис. 1 показаны каскадные кривые, т. е. зависимость логарифма числа электронов в ШАЛ, $\log_{10}(N_e)$, от глубины проникновения ШАЛ в атмосферу Земли, $Depth$, для протонных ливней с напряжением 1 и 10 ПэВ. Из рис. 1 видно, что первое взаимодействие космической частицы может происходить на различных уровнях в глубине атмосферы Земли. Если космическая частица провзаимодействовала в верхних слоях атмосферы, то каскадная кривая раньше достигнет максимума. Назовем такой ливень быстроразвивающимся. А если максимум каскадной кривой

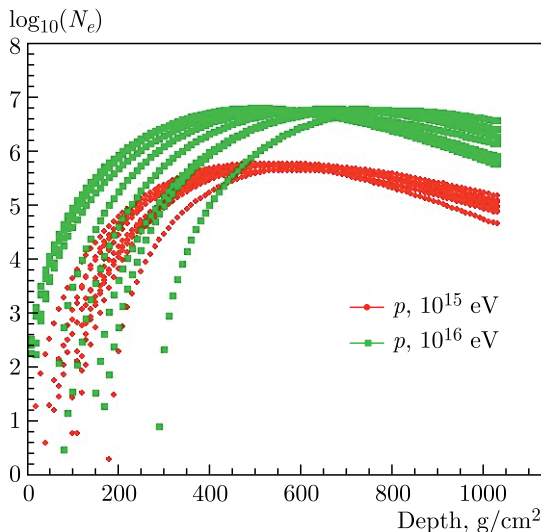


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Каскадные кривые для протонных ливней с энергией 1 (красные кружки) и 10 ПэВ (зеленые квадраты)

ШАЛ расположен более глубоко в атмосфере, то назовем такие ШАЛ медленно развивающимися. В этом случае энергия для медленно развивающихся ливней будет определяться заведомо выше, а для быстроразвивающихся ливней — существенно ниже для первичных частиц той же энергии.

Чтобы понять, как решить проблему больших флуктуаций в развитии каскада, необходимо прежде всего выяснить их природу.

Форма каскадной кривой определяется особенностями взаимодействия первичного ядра с ядрами атмосферы Земли. Для исследования процессов множественного рождения частиц применяются различные подходы и методы [19–26].

Наиболее существенными являются два источника флуктуаций: глубина и множественность первого взаимодействия. Чем раньше первичная частица вступает во взаимодействие, тем быстрее начинается развитие каскада. В случае центрального взаимодействия образуется большое число вторичных частиц и каскад развивается интенсивно. Если же взаимодействие периферическое, то число рожденных частиц меньше, и развитие каскада более медленное.

После первого акта каждая из вторичных частиц может вступать во взаимодействие, рождая новые частицы. Параметры каждого последующего взаимодействия (глубина, число вторичных частиц и др.) также подвержены флуктуациям. Однако за счет большого числа частиц флуктуации отдельных взаимодействий частично компенсируют друг друга. В результате при большом числе участников проявляется универсальность развития каскада: все ливни, инициированные частицами одинаковой энергии и массы, в среднем развиваются одинаково [27, 28].

Таким образом, каскады существенно различаются как по глубине первого взаимодействия, так и по его параметрам (множественности, центральности и др.). Это обуславливает значительные флуктуации на начальном участке каскадной кривой. Вместе с тем при большом числе вторичных частиц влияние отдельных флуктуаций заметно ослабевает, и развитие каскада становится более устойчивым. Следовательно, глубина проникновения первичной частицы не является оптимальным параметром для описания развития ливня, так как она сильно подвержена флуктуациям. Необходима другая характеристика, менее зависимая от начальных случайных факторов каскадного процесса.

Одним из таких параметров является возраст ливня S . На рис. 2 представлены кривые зависимости размера ливня от возраста для ШАЛ (SA-кривые), образованных первичными протонами с энергией 1 и 10 ПэВ для тех же ливней, которые представлены на рис. 1.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что флуктуации N_e существенно меньше на рис. 2. Это связано с тем, что в данном представлении все ливни, и быстроразвивающиеся, и медленно развивающиеся, сдвинуты в точку максимума развития каскада $S = 1$. Уменьшение флуктуаций N_e относительно средней кривой приводит к увеличению точности измере-

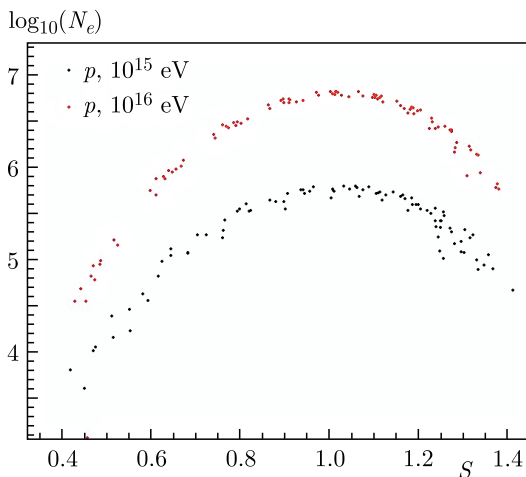


Рис. 2 (цветной в электронной версии). SA-кривые для протонных ливней с энергией 1 (черные кружки) и 10 ПэВ (красные кружки)

ния энергии. Более точное определение первичной энергии позволяет более точно оценить массу первичной частицы.

2. ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ МАССЫ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ

Для определения массы первичной космической частицы традиционно используют число мюонов в ШАЛ [2]. Метод основан на том, что легкие и тяжелые ядра формируют различные мюонные компоненты при взаимодействии с атмосферой Земли. При прочих равных условиях чем больше массовое число A первичного ядра, тем больше мюонов образуется в ливне. Это связано с тем, что тяжелые ядра начинают взаимодействовать с атмосферой на большей высоте и распадаются на большее количество нуклонов. Каждое из последующих взаимодействий рождает каскады частиц, включая пионы, которые затем распадаются на мюоны. Существенным недостатком данного метода является высокая чувствительность к флуктуациям развития каскада: ливни, инициированные протонами одинаковой энергии, могут содержать существенно различное число мюонов на уровне наблюдения.

Точность определения массы можно существенно повысить, если использовать зависимости числа мюонов на уровне наблюдения от разности логарифмов числа электронов и числа мюонов $dN_{e\mu} = \log(N_e) - \log(N_\mu)$. Данные зависимости представлены на рис. 3 для ШАЛ, образованных протонами и ядрами железа с энергиями 1 и 10 ПэВ и «измеренных» на уровне наблюдения 1023 г/см^2 .

Из рис. 3 видно, что в данном представлении точки, соответствующие протонам, отделяются от точек, соответствующих ядрам железа,

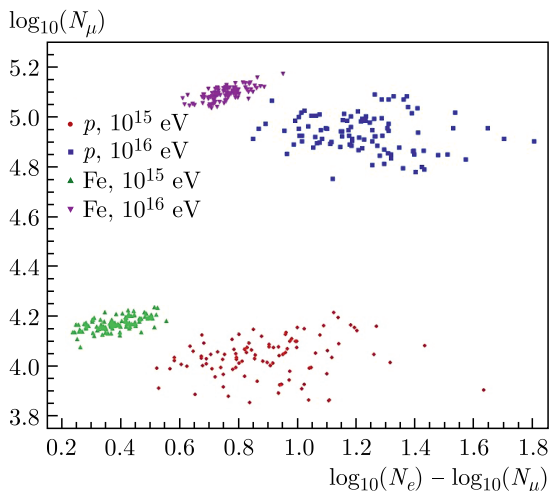


Рис. 3. Зависимость числа мюонов на уровне наблюдения от разности логарифмов числа электронов и числа мюонов для протонных (кружки и квадраты) и железных (треугольники) ливней с энергиями 1 и 10 ПэВ

не только по N_μ , но и по $dN_{e\mu}$. Это существенно увеличивает точность отделения различных ядер. Например, протонный ливень, имеющий на уровне наблюдения $\log N_\mu = 4,2$ и $dN_{e\mu} = 1,15$, хорошо отделяется от ливня, образованного ядром железа, с $\log N_\mu = 4,2$ и $dN_{e\mu} = 0,419$. Однако эти ливни не могут быть разделены при использовании только N_μ , так как оно одинаково для обоих ливней.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматриваются проблемы определения первичной энергии и массы космических ядер, обусловленные флуктуациями в развитии ливня. При реконструировании энергии с помощью каскадных кривых энергия для медленно развивающихся ливней будет определена заведомо завышенно, а для быстроразвивающихся ливней — заниженно для первичных частиц той же энергии. Для решения данной проблемы используются кривые зависимости размера ливня и его возраста. В данном представлении все ливни, и быстроразвивающиеся, и медленно развивающиеся, сдвинуты в точку максимума развития каскада $S = 1$. Уменьшение флуктуаций N_e относительно средней кривой приводит к увеличению точности измерения энергии. Более точное определение первичной энергии позволяет более точно оценить массу первичной частицы. В нашем подходе предлагается использовать зависимость числа мюонов на уровне наблюдения от разности логарифмов числа электронов и числа мюонов. В данном представлении точки, соответствующие про-

тонам, отделяются от точек, соответствующих ядрам железа, не только по N_μ , но и по $dN_{e\mu}$. Это существенно увеличивает точность отделения различных ядер.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP22785312).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tatischeff V., Raymond J. C., Duprat J., Gabici S., Recchia S.* The Origin of Galactic Cosmic Rays as Revealed by Their Composition // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 508, Iss. 1. P. 1321–1345.
2. *Di Sciascio G.* Measurement of Energy Spectrum and Elemental Composition of PeV Cosmic Rays: Open Problems and Prospects // *Appl. Sci.* 2022. V. 12, No. 2. P. 705.
3. *Demidem C., Lemoine M., Casse F.* Particle Acceleration in Relativistic Turbulence: A Theoretical Appraisal // *Phys. Rev. D.* 2020. V. 102. P. 023003.
4. *Ptushkin V., Zirakashvili V., Seo E. S.* Spectra of Cosmic-Ray Protons and Helium Produced in Supernova Remnants // *Astrophys. J.* 2013. V. 763. P. 47(5).
5. *Kobayakawa K. et al.* Acceleration by Oblique Shocks at Supernova Remnants and Cosmic Ray Spectra around the Knee Region // *Phys. Rev. D.* 2002. V. 66. P. 083004.
6. *Giuffrida R. et al.* The Supernova Remnant SN1006 as Galactic Particle Accelerator // *Nature Commun.* 2022. V. 13. ID. 5098.
7. *Swordy S. P. et al.* The Composition of Cosmic Rays at the Knee // *Astropart. Phys.* 2002. V. 18, Iss. 2. P. 129–150.
8. *Horandel J. R.* Cosmic Rays from the Knee to the Second Knee: 10^{14} to 10^{18} eV // *Mod. Phys. Lett. A.* 2007. V. 22, No. 21. P. 1533–1551.
9. *An Q. et al.* Measurement of the Cosmic Ray Proton Spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE Satellite // *Sci. Adv.* 2019. V. 5. P. 3793.
10. *Boos E., Lebedev I., Philippova L.* Modelling of an Energy Spectrum of Cosmic Rays in the Knee Region // *J. Phys. G.* 2006. V. 32. P. 2273.
11. *Thoudam S., Hörandel J. R.* Nearby Supernova Remnants and the Cosmic Ray Spectral Hardening at High Energies // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2012. V. 421. P. 1209–1214.
12. *Biermann P. L., Becker J. K., Dreyer J., Meli A., Seo E. S., Stanev T.* The Origin of Cosmic Rays: Explosions of Massive Stars with Magnetic Winds and Their Supernova Mechanism // *Astrophys. J.* 2010. V. 725. P. 184–187.
13. *Tomassetti N.* Origin of the Cosmic-Ray Spectral Hardening // *Astrophys. J. Lett.* 2012. V. 752. P. L13.
14. *Yuan Q., Zhang B., Bi X. J.* Cosmic Ray Spectral Hardening due to Dispersion in the Source Injection Spectra // *Phys. Rev. D.* 2011. V. 84. P. 043002.
15. *Dmitrieva E. et al.* Determination of the Primary Energy Using an Ultrathin Calorimeter // *J. Phys. G.* 2020. V. 47, No. 3. P. 035202.
16. *Lebedev I. et al.* Direct Measurements of Cosmic Rays (TeV and beyond) Using an Ultrathin Calorimeter: Lessening Fluctuation Method // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 11189.

17. *Apel W.D. et al.* Applying Shower Development Universality to KASCADE Data // *Astropart. Phys.* 2008. V. 29, No. 6. P. 412–419.
18. *Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T.* CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. FZKA Report 6019. Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, 1998.
19. *Burtebayev N. et al.* Fluctuations of Initial State and Event-by-Event Pseudo-Rapidity Correlations in High Energy Nuclear Collisions // *Universe.* 2022. V. 8, No. 2. P. 67.
20. *Olimov Kh.K. et al.* Correlations among Parameters of the Tsallis Distribution and Hagedorn Function with Embedded Transverse Flow in Proton–Proton Collisions at $s^{1/2} = 7$ and 13 TeV // *Eur. Phys. J. Plus.* 2023. V. 138, No. 5. P. 414.
21. *Fedosimova A.I. et al.* Hurst Exponent and Event-by-Event Fluctuations in Relativistic Nucleus–Nucleus Collisions // *Particles.* 2024. V. 7. P. 918–926.
22. *Fedosimova A., Gaitinov A., Grushevskaya E., Lebedev I.* Study of the Peculiarities of Multiparticle Production via Event-by-Event Analysis in Asymmetric Nucleus–Nucleus Interactions // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2017. V. 145. P. 19009.
23. *Fedosimova A., Gaitinov A.S., Lebedev I.A., Temiraliev A.* Study on Initial Geometry Fluctuations via Correlation of Finite Distributions of Secondary Particles in Nucleus–Nucleus Interactions // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 668. P. 012067.
24. *Kvochkina T.N., Lebedev I.A., Lebedeva A.A.* An Analysis of High-Energy Interactions with Large Transverse Momentum of Secondary Particles // *J. Phys. G.* 2000. V. 26. P. 35–41.
25. *Adamovich M.I. et al.* Flow Effects in High-Energy Nucleus Collisions with Ag(Br) in Emulsion // *Phys. At. Nucl.* 2004. V. 67. P. 273–280.
26. *Adamovich M.I. et al.* Factorial Moments of ^{28}Si Induced Interactions with Ag(Br) Nuclei // *APH N. S. Heavy Ion Phys.* 2001. V. 13. P. 213–221.
27. *Lipari P.* Universality in the Longitudinal Development of Cosmic Ray Showers // *Nucl. Part. Phys. Proc.* 2016. V. 279–281. P. 111–117.
28. *Fedosimova A., Kharchevnikov P., Lebedev I., Temiraliev A.* Applying Universality in the Development of Cascade Processes for the Research of High Energy Cosmic Particles in Space Experiments // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2017. V. 145. P. 10004.