

А.А. Лагутин, Р.И. Райкин,

Н.В. Становкина, А.Г. Тюменцев

Массовый состав первичного космического излучения в диапазоне энергий эВ в модели аномальной диффузии

Введение. Изучение массового состава первичного космического излучения (ПКИ), в особенности в области ультравысоких энергий ($E \geq 10^{19}$ эВ), принадлежит к числу наиболее актуальных задач современной астрофизики (см., например: [1]). Достоверные данные о составе ПКИ необходимы для решения проблемы происхождения частиц ультравысоких энергий, механизмов их ускорения и распространения в межзвездной среде.

Обсуждается несколько возможностей появления частиц с $E \geq 10^{19}$ эВ. Частицы могли бы ускоряться в активных ядрах галактик, в радиогалактиках, при аннигиляции топологических дефектов, образовавшихся в результате нарушения симметрии на ранних стадиях эволюции Вселенной [2–6] и др. Нельзя исключить и галактическое происхождение ПКИ ультравысоких энергий. Например, в работе [7] показано, что пульсары могут обеспечить энергию ПКИ вплоть до $E \geq 4 \times 10^{19}$ эВ. Однако до сих пор не существует общепринятой модели, которая объясняла бы экспериментальные данные о ШАЛ в широком диапазоне энергий $10^{14} \div 10^{20}$ эВ и воспроизводила бы основ-

ные особенности энергетического спектра ПКИ. Проблема осложняется тем, что в направлении прихода наиболее высокоэнергетичных частиц, зарегистрированных до настоящего времени в экспериментах, не обнаружено видимых источников (см., например: [8–10]).

В недавних работах [11–14] в рамках галактического подхода была предложена новая интерпретация экспериментальных данных в предположении, что распространение космических лучей происходит в межзвездной среде фрактального типа (модель аномальной диффузии). В рамках этой модели естественным образом разрешимы проблемы происхождения первого ($E_0 \approx 5 \times 10^{15}$ эВ) и второго ($E_0 \approx 5 \times 10^{18}$ эВ) изломов в энергетическом спектре ПКИ (см. рис. 1), а также феномен отсутствия обрезания Зацепина-Кузьмина-Грейзена [15].

Надежные данные о массовом составе космических лучей являются важным тестом для моделей происхождения, ускорения и распространения ПКИ ультравысоких энергий. При энергии свыше 10^{19} эВ модель аномальной диффузии предсказывает ядерный состав ПКИ с долей протонов до 60% [14]. В то же время

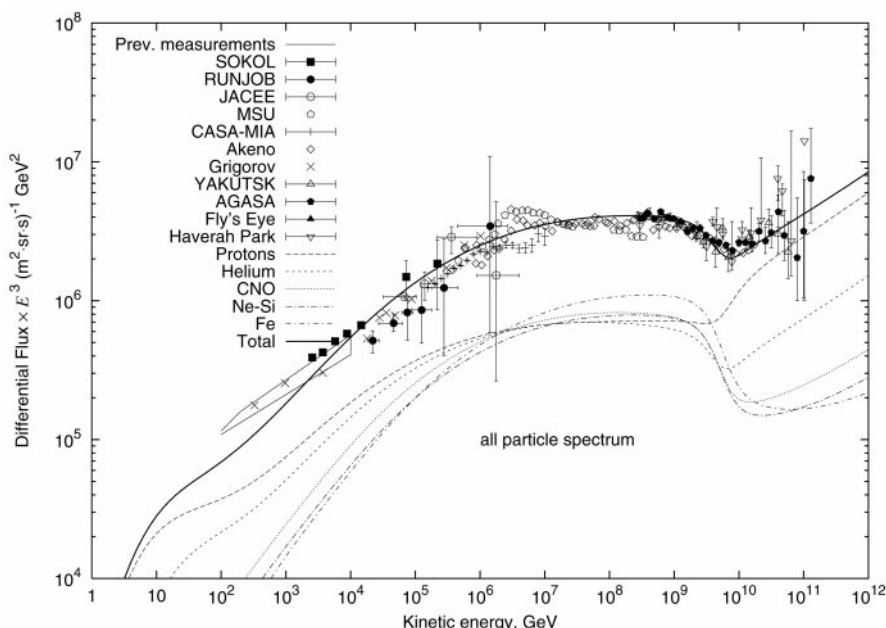


Рис. 1. Спектр всех частиц, полученный в модели аномальной диффузии в сравнении с экспериментальными данными [14]

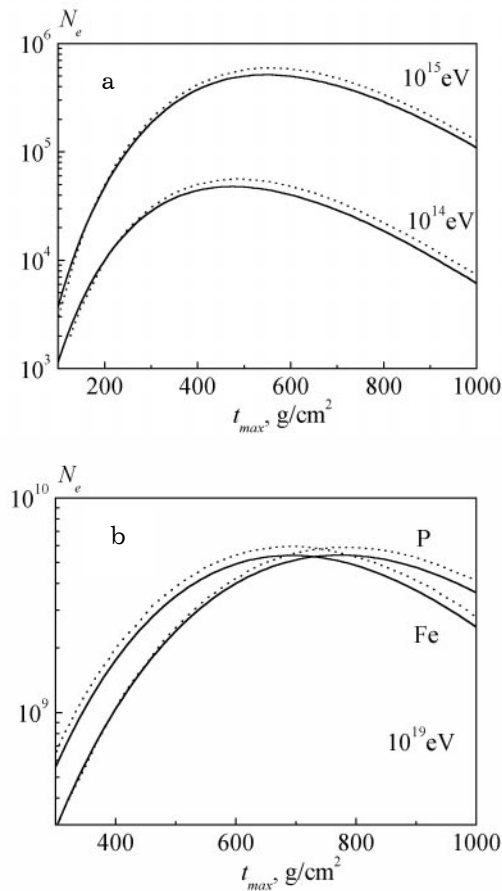


Рис. 2. Каскадные кривые ШАЛ, полученные в настоящей работе (сплошная линия), в сравнении с данными [19] (пунктирная линия)

модели топологических дефектов [5] предсказывают преобладание потоков нейтрино и γ -лучей над потоками нуклонов и ядер в диапазоне энергий $10^{17} \div 10^{24}$ эВ.

В настоящее время физические выводы о массовом составе возможны только на основе анализа экспериментальных данных об инициируемых первичными космическими частицами в атмосфере Земли ядерно-электромагнитных каскадах (широких атмосферных ливней, ШАЛ) и их сопоставлений с результатами адекватных теоретических расчетов, выполненных с использованием различных моделей адрон-ядерных (ядро-ядерных) взаимодействий [9, 16–18]. Одной из важнейших характеристик ШАЛ, чувствительных к типу первичной частицы является глубина максимума каскадной кривой t_{\max} .

В данной работе представлены результаты большого цикла расчетов глубины максимума, выполненных в широком диапазоне энергий для различных первичных частиц с использованием вычислительного комплекса CORSIKA (v.6.0)/QGSjet [19]. Результаты расчетов для массового состава, предсказанного моделью аномальной диффузии, сопоставляются с экспериментальными данными установок Casa-Blanca [20], Space-Vulcan [21], Hegra-Airobicc [22], Fly's Eye [23], HiRes-MIA [24] и Якутской установки [25].

Расчеты и результаты. Моделирование ШАЛ выполнено с использованием широко распространенного вычислительного комплекса CORSIKA (v. 6.0) [19]. Использовалась модель кварк-глюонных струн с учетом полужестких процессов (QGSjet) [26]. Согласно [16–18], эта

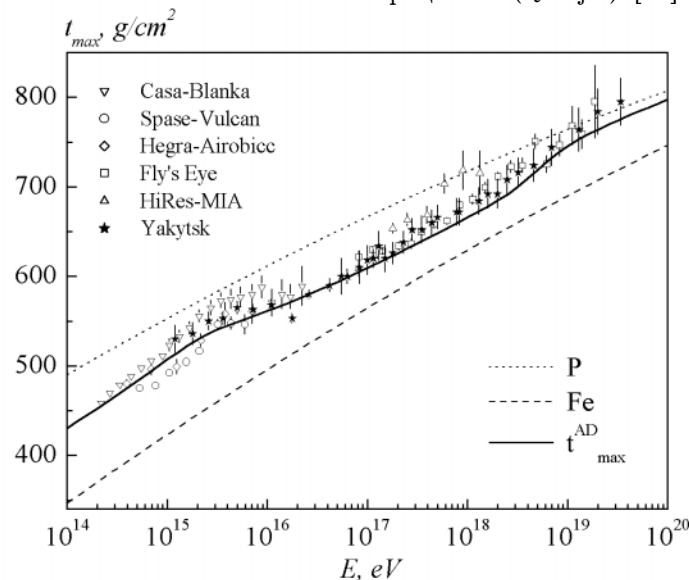


Рис. 3. Результаты расчетов глубины максимума каскадной кривой в сравнении с экспериментальными данными установок Casa-Blanca [20], Space-Vulcan [21], Hegra-Airobicc [22], Fly's Eye [23], HiRes-MIA [24] и Якутской установки [25]

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимации (1)
для каждого типа ядра

| тип ядра | a | b | c |
|----------|----------|--------|-------|
| P | -758.78 | 113.71 | -1.75 |
| He | -1060.84 | 143.21 | -2.55 |
| CNO | -1077.32 | 136.15 | -2.18 |
| Ne-Si | -1167.04 | 142.08 | -2.31 |
| Fe | -1259.66 | 148.67 | -2.43 |

модель на сегодняшний день обеспечивает наилучшее совокупное описание экспериментальных данных о ШАЛ. Расчеты были проведены для пяти групп ядер (p, He, CNO, Ne-Si, Fe), уровень наблюдения ~ 1036 г/см², атмосфера стандартная. Для каждого типа первичной частицы было разыграно от 500 (при $E_0 = 10^{14}$ эВ) до 30 (при $E_0 = 10^{20}$ эВ) событий с параметром обрезания равным 10^{-6} [17].

На рисунке 2 представлено сравнение каскадных кривых электронов ШАЛ, согласно нашим расчетам, с аналогичными результатами, полученными в работе [18]. Незначительные разногласия с данными [18] можно объяснить использованием разных версий программы и разным размером статистики. Результаты наших расчетов были аппроксимированы выражением $t_{\max} = a + b \cdot \lg E + c \cdot (\lg E)^2$, (1) значения коэффициентов a, b, c представлены в таблице 1.

Для массового состава, предсказанного в рамках модели аномальной диффузии (см. табл. 2) [14], была получена зависимость $t_{\max}^{AD}(E)$. На рисунке 3 представлены результаты расчетов глубины максимума ШАЛ для первичных протонов, ядер группы железа и $t_{\max}^{AD}(E)$ в сравнении с экспериментальными данными установок Casa-Blanca [20], Space-Vulcan [21], Negra-Airobicc [22], Fly's Eye [23], HiRes-MIA [24] и Якутской установки [25].

Отметим удовлетворительное согласие экспериментальных данных с результатами расчетов в модели аномальной диффузии во всем исследуемом диапазоне энергий. В области излома ($E_0 \approx 5 \times 10^{15}$ эВ) эксперименты согласованно указывают на заметное утяжеление

Таблица 2

Массовый состав первичного
космического излучения
в модели аномальной диффузии [14]

| E, eV | p | He | CNO | Ne-Si | Fe | $\langle \ln A \rangle$ | $\langle A \rangle$ |
|-------------------|------|------|------|-------|------|-------------------------|---------------------|
| 10^{14} | 0.35 | 0.22 | 0.17 | 0.15 | 0.11 | 1.69 | 13.82 |
| $3 \cdot 10^{14}$ | 0.38 | 0.19 | 0.16 | 0.14 | 0.12 | 1.64 | 13.79 |
| 10^{15} | 0.47 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 1.45 | 12.67 |
| $3 \cdot 10^{15}$ | 0.49 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 1.42 | 12.71 |
| 10^{16} | 0.36 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 1.79 | 16.11 |
| $3 \cdot 10^{16}$ | 0.26 | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.20 | 2.12 | 19.17 |
| 10^{17} | 0.19 | 0.16 | 0.20 | 0.21 | 0.23 | 2.35 | 21.42 |
| $3 \cdot 10^{17}$ | 0.16 | 0.16 | 0.21 | 0.23 | 0.25 | 2.48 | 22.92 |
| 10^{18} | 0.16 | 0.15 | 0.19 | 0.22 | 0.27 | 2.52 | 24.02 |
| $3 \cdot 10^{18}$ | 0.24 | 0.14 | 0.15 | 0.18 | 0.28 | 2.29 | 22.79 |
| 10^{19} | 0.57 | 0.17 | 0.08 | 0.07 | 0.10 | 1.11 | 9.84 |
| $3 \cdot 10^{19}$ | 0.65 | 0.18 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.78 | 6.41 |
| 10^{20} | 0.68 | 0.18 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.69 | 5.44 |

состава. При этом в модели аномальной диффузии среднее массовое число увеличивается с 12.71 при $E_0 \approx 3 \times 10^{15}$ эВ до 16.11 при $E_0 \approx 10^{16}$ эВ (см. табл. 1). В области второго излома ($E_0 \approx 5 \times 10^{15}$ эВ), напротив, происходит резкое увеличение доли легких ядер, что вновь не противоречит предсказаниям модели ($\langle A \rangle = 22.79$ при $E_0 \approx 3 \times 10^{18}$ эВ, $\langle A \rangle = 9.84$ при $E_0 \approx 10^{19}$ эВ).

Заключение. Работа посвящена исследованию массового состава ПКИ в диапазоне энергий $E_0 10^{14} \div 10^{20}$ эВ. Моделирование ШАЛ выполнено с использованием вычислительного комплекса CORSIKA в модели QGSjet для пяти групп ядер p, He, CNO, Ne-Si, Fe. Показано, что существующие экспериментальные данные удовлетворительно описываются в рамках модели аномальной диффузии во всем диапазоне первичных энергий.

Таким образом, отмечаемые в экспериментах вариации массового состава ПКИ, вероятно, являются следствием аномальной диффузии частиц в межзвездной среде фрактального типа. Окончательно прояснить ситуацию могут новые данные экспериментов, в особенности Pierre Auger Observatory [27] и будущих орбитальных установок EUSO и OWL [28].

Данная работа поддержана грантом 02.01.014 Программы «Университеты России».

Литература

1. Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)? // УФН. 1999. Т. 169. №4.

2. Астрофизика космических лучей / В.С. Березинский, С.В. Буланов, В.Л. Гинзбург; Под ред. В.Л. Гинзбурга. 2-е изд., испр. и доп. М., 1990.

3. Vilenkin A. Cosmic Strings and Komain Walls // *Physics Reports*. 1985. V. 121, №5.
4. Sigl G., Schramm K.N., Bhattacharjee P. on the origin of Highest Energy Cosmic Rays // *Astropart. Phys.* 1994. V. 2.
5. Bhattacharjee P. Cosmic Topological Defects as Possible Sources of Extremely High Energy Cosmic Rays: the Current Status // *Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observatories. Proc. of Inter. Symposium, Tokyo, sept. 25–28, 1996. Ed. Nagano M. Tokyo, 1997.*
6. Klinko A.V. The origin of ultrahigh energy cosmic ray: new physics and astrophysics // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2001. V. 97.
7. Erlykin A.K., Mikhailov A.A., Wolfendale A.W. Ultra high energy cosmic rays and pulsars // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2002, 28.
8. Hayashida N., Honda K., Inoue N. Characteristics of Giant Air Showers with Energy larger than 10^{16} eV observed by AGASA // *Proc. 26 ICRC., Salt Lake City, USA. 1999. V. 1.*
9. Nagano M. Observations and Implications of the Ultrahigh-Energy Cosmic Rays // *Reviews of Modern Physics*. 2000. V. 72. №3.
10. Cronin J.W. Ultra high energy cosmic rays // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2001. V. 97.
11. Lagutin A.A., Nikulin Yu.A., Uchaikin V.V. The «knee» in the primary cosmic rays spectrum as consequence of fractal structure of the galactic magnetic field // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 2001.V. 97.
12. A.A. Lagutin, V.V. Uchaikin. Fractional diffusion of the cosmic rays // *Proc. of the 27th ICRC. 2001. V. 5.*
13. Lagutin A.A. Anomalous diffusion of the cosmic rays in the fractal Galaxy // *Problems of atomic science and technology*. 2001. №6.
14. Lagutin A.A., Strelnikov K.V., Tyumentsev A.G. Mass composition of cosmic rays in anomalous diffusion model: comparison with experiment // *Proc. of the 27th ICRC. 2001. V. 5.*
15. Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. О верхней границе спектра космических лучей // *Письма в ЖЭТФ*. 1966. Т. 4.
16. Knapp J. Hadronic Interaction Models and Air Shower Simulations // *Nucl. Physics B (Proc. Suppl.)* 75 A. 1999.
17. Pryke C.L. A Comparative Study of the Rept of Maximum of Simulated Air Shower Longitudinal Profiles // *Preprint astro-ph/0003442. 2000. V. 2.*
18. Heck K. Extensive Air Shower Simulation with CkRSIKA and the Influence of High-Energy Hadronic Interaction Models // *Preprint submitted to World Scientific/heck'icmd 2000. 2001.*
19. Heck K., Knapp J. Extensive Air Shower Simulation with CkRSIKA: A User's Guide (Version 6.00 from December 13, 2000). Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2000.
20. Fowler J.W., Fortson L.F., Jui C.C.H. et al. A Measurement of the Cosmic Ray Spectrum and Composition at the Knee // *Preprint astro-ph/0003190. V. 2. 2000.*
21. Kiskinnon J.E., Gill J.R., Hart S.P. et al. Studies of the Mass Composition of Cosmic Rays with the SPASE-2/VULCAN Instrument at the South Pole // *Proc. 26Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City (USA). 1999, 3.*
22. Arqueros F., Barrio J.A., Bernlohr et al. Energy Spectrum and Chemical Composition of Cosmic Rays between 0.3 and 10 PeV determined from the Cherenkov – Light and Charged – Particle distributions in Air Showers // *arXiv: astro – ph/9908202.*
23. Bird K. et al. The Energy Spectrum of Cosmic-Ray from Fly's Eye // *Phys. Rev. Lett.* 1993. V. 71.
24. Abu-Zayyad T., Belov K., Bird K.J. et al. Evidence for Changing of Cosmic Ray Composition between 10^{15} and 10^{16} eV from Multicomponent Measurements // *Physical Review Letters*. 2000. V. 84. №19.
25. Knurenko S., Kolosov V., Petrov Z. et al. Cerenkov Radiation of Cosmic Ray Extensive Air Showers // *Proc. of the 27th ICRC. 2001.*
26. Калмыков Н.Н., Остапченко С.С. Ядро-ядерное взаимодействие, фрагментация ядер и флуктуации широких атмосферных ливней // *Ядерная физика*. 1993. Т. 56, вып. 3.
27. Watson A.A. The Highest Energy Cosmic Rays and the Auger Project // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*. 60B. 1998.
28. Ebisuzaki T., Takahashi Y., Handa T. Space Factory on International Space Station – Universal Academy Press, Inc., 2000.