

АСТРОНОМИЯ И ФИЗИКА КОСМОСА

УДК 523.11

ЯДРА ЖЕЛЕЗА ВО ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ У ЗЕМЛИ

А. В. Урысон

Обсуждается доля ядер железа во внегалактических космических лучах, дошедших от удаленных источников до Земли без фрагментации в межгалактическом пространстве. Показано, что для частиц с энергией $E = 10^{19}$ эВ эта доля заметна (около 10%), даже если красные смещения источников достигают 0.2, а не только в случае близких источников. Поэтому, анализируя возможные источники ядер железа, необходимо учитывать удаленные источники.

Ключевые слова: космические лучи, предельно высокие энергии, сверхмассивные черные дыры, элементный состав, межгалактическое пространство.

Введение. Внегалактические космические лучи (КЛ) имеют энергии $E > 10^{17}$ эВ. Они интенсивно исследуются в связи с нерешенной проблемой их происхождения. Частицы КЛ регистрируют с помощью наземных установок, энергию и массовое число частицы определяют по характеристикам вызванного ею широкого атмосферного ливня. По результатам, полученным на установках Telescope Array [1] и Pierre Auger [2], а также на установке в Якутске [3], в составе КЛ с ультравысокой энергией (УВЭ) $E > 10^{18}$ эВ присутствуют ядра железа.

Одна из моделей, объясняющая наличие железа в КЛ УВЭ, – это модель ускорения частиц в окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД). По современным представлениям они существуют в ядре практически каждой галактики [4]. В литературе обсуждался ряд механизмов ускорения частиц вблизи СМЧД [5–8], и они обеспечивают состав КЛ, в котором присутствуют элементы с различными массовыми числами A вплоть до ядер железа.

Распространяясь в межгалактическом пространстве, КЛ УВЭ взаимодействуют с фоновыми излучениями – космическим микроволновым, радио, внегалактическим светом, в реакциях:

$$A + \gamma \rightarrow A + e^+ + e^- \quad (\text{прямое рождение пар, пороговая энергия в СЦМ } 1 \text{ МэВ}), \quad (1)$$

$$A + \gamma \rightarrow A' + mN + n\pi \quad (\text{фотопионное рождение, пороговая энергия в СЦМ } 145 \text{ МэВ}), \quad (2)$$

$$A + \gamma \rightarrow A' + mN \quad (\text{фоторасщепление ядер, пороговая энергия около } 8 \text{ МэВ}). \quad (3)$$

В результате этих взаимодействий до установки доходит часть первичных ядер и их фрагменты – в межгалактическом пространстве происходит изменение элементного состава КЛ УВЭ. Это следствие проявления ГЗК-эффекта в применении к ядрам.

Ясно, что если источники КЛ УВЭ находятся достаточно близко, то ядра железа УВЭ достигают Земли практически без фрагментации (т. к. не успевают взаимодействовать с фоновыми излучениями). Тогда, исходя из энергии ядер железа, можно получить ограничения на расстояния до их возможных источников. Такое рассмотрение было проведено в работе [9], и эта статья является продолжением начатого в ней анализа.

В [9] обсуждение касалось в основном ядер железа УВЭ, поэтому детально рассматривались достаточно близкие источники – с красными смещениями $z \leq 0.009$. В этой статье мы рассматриваем ядра железа меньших энергий $E \approx 10^{19}$ эВ, и обсуждаем, какая доля таких ядер может достигнуть Земли от удаленных источников. Поэтому здесь мы рассматриваем другой диапазон красных смещений источников $z = 0.1 - 0.6$. В этой работе мы не рассматриваем вторичные ядра с очень близкими массовыми числами $A = 54, 55$ (стабильный изотоп железа и Mn), образованные в межгалактическом пространстве в процессах (2, 3). Как уже говорилось, массовое число частицы определяют по характеристикам вызванного ею широкого атмосферного ливня, и такой метод дает возможность определить массовое число лишь в некотором интервале значений A . Например, массовые числа ядра железа ($A = 56$) и ядра вторичного кремния ($A = 28$) отличаются всего в два раза. Результаты анализа вторичных тяжелых ядер с различными массовыми числами будут представлены в отдельной работе.

Моделирование и анализ результатов расчета. Мы вычисляли долю R дошедших от возможного источника до установки частиц с массовым числом $A = 56$ относительно

всех дошедших частиц с массовыми числами от $A = 1$ до $A = 56$:

$$R = (\text{частицы с } A=56) / (\text{все дошедшие частицы, } A=1-56). \quad (4)$$

Величина R определялась для разных значений величины пути частицы.

Для нахождения величины R моделировалось прохождение ядер железа в межгалактическом пространстве от источников до Земли. Моделирование проводилось в следующих предположениях.

Мы предполагаем, что КЛ УВЭ ускоряются в точечных внегалактических источниках, расстояния до которых $L \approx 2 - 3500$ Мпк.

Далее, мы считаем, что КЛ УВЭ – это ядра железа ($A = 56$). В составе КЛ УВЭ присутствуют и протоны, и ядра других элементов, но мы анализируем возможные источники частиц железа УВЭ, и поэтому обсуждаем распространение в межгалактическом пространстве только ядер железа.

Для удаленных источников необходимо учитывать их эволюцию. Эволюция СМЧД неясна. Форма эволюции источников была взята из статьи [10], т. к. в ней полностью описывается совокупность данных о внегалактических КЛ. Это эволюция одного из типов активных ядер галактик – VL Lас.

Следуя результатам [10], спектр инжекции в источниках был взят степенным $E^{-\gamma}$, с показателем $\gamma = 2.2$.

Максимальная энергия ядер железа в источнике 10^{21} эВ. Их минимальная энергия $5.6 \cdot 10^{18}$ эВ, т. к. частицы с такой энергией заведомо покидают родительские галактики, не удерживаясь их магнитными полями (см., напр., статью [11]).

Характеристики фонового радиоизлучения были взяты из работы [12], внегалактического света – из работы [13]. Космический микроволновой фон (СМВ) имеет планковское распределение по энергии, средняя энергия фотонов $\varepsilon_r = 2.3 \times 10^{-4}$ эВ, их плотность $n_r = 400 \text{ см}^{-3}$.

В моделировании использовался код TransportCR [14], размещенный в интернете в открытом доступе. Вычисления фотоядерных взаимодействий в нем проводятся с сечениями из работы [15].

Результаты и обсуждение. Энергетическая зависимость $R(E)$ для нескольких значений красных смещений z источников показана на рис. 1. Ясно, что доля ядер железа, достигших установки без фрагментации, уменьшается с увеличением энергии ядер и с увеличением красного смещения источников. Из рис. 1 видно, что при энергии $E < 10^{19}$ эВ доля таких ядер железа заметна, если их источники удалены на расстояния

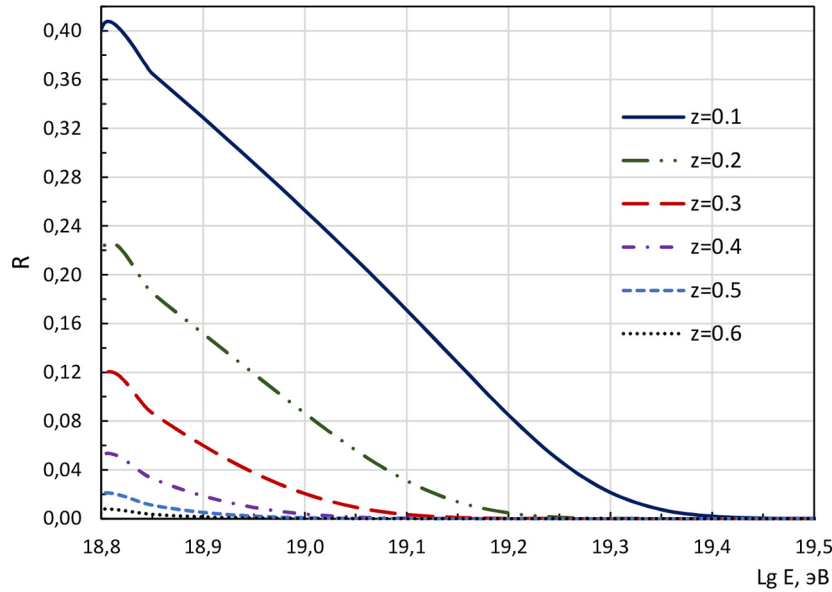


Рис. 1: Зависимость величины R от энергии ядер железа E , излученных источниками с фиксированными красными смещениями $z = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$.

$L \approx 435 - 1200$ Мпк ($z = 0.1 - 0.3$), она составляет почти от 0.40 до 0.12, соответственно. Ядра железа могут прийти на установку без фрагментации с расстояний до 2300 Мпк ($z = 0.6$), однако доля таких ядер меньше 0.01.

При энергии $E = 10^{19}$ эВ доля дошедших до установки ядер железа заметна, если красное смещение источника не превышает 0.3: $R = 0.25 - 0.02$ при $z = 0.1 - 0.3$.

Модельные предположения об источниках КЛ не влияют на полученные результаты. Причина в том, что доля ядер железа у Земли вычислялась для источников с данным красным смещением z , а эта доля определяется только распространением частиц в межгалактическом пространстве и не зависит от пространственной плотности и светимости источников.

По этой же причине на результаты не влияет принятая в модели форма спектра инжекции частиц в источнике.

Прохождение ядер КЛ от их возможных источников до Земли неоднократно анализировалось в разных моделях источников (см., напр., [16]). В нашей статье мы получили оценки расстояний до возможных источников КЛ УВЭ, применив стандартный расчет прохождения частиц в межгалактическом пространстве, предполагая, что их источниками могут быть практически любые галактические ядра.

Заключение. В нашей модели КЛ УВЭ ускоряются в окрестности СМЧД. В настоящее время общепринято, что СМЧД существует в ядре практически каждой галактики [4]. Элементный состав КЛ УВЭ отражает состав вещества звезд и в нем присутствуют в том числе ядра железа.

Ядра железа УВЭ могут прийти на установку, не фрагментировав в межгалактическом пространстве, с расстояний, превышающих 2300 Мпк ($z = 0.6$). Однако их доля относительно первоначально излученных ядер железа меньше 1%. При энергии $E = 10^{19}$ эВ доля дошедших до установки ядер железа заметна, если красное смещение источника не превышает 0.3: она составляет $R = 0.25 - 0.02$ для $z = 0.1 - 0.3$, соответственно, (что соответствует расстоянию до источника 435–1200 пк). Поэтому при обсуждении возможных источников ядер железа УВЭ, достигших Земли, следует принимать во внимание и удаленные источники КЛ.

Автор благодарит О. Калашева за обсуждение кода TransportCR, Н. Калмыкова и Т. Роганову за обсуждение статьи и замечания.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. U. Abbasi, Y. Abe, T. Abu-Zayyad, et al. (Telescope Array Collaboration), *Phys. Rev. D* **110**, 022006 (2024). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.022006>.
- [2] A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta, et al. (The Pierre Auger Collaboration), *Phys. Rev. D* **111**, 022003 (2025). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.022003>.
- [3] А. В. Глушков, Л. Т. Ксенофонтов, К. Г. Лебедев, А. В. Сабуров, *Письма в ЖЭТФ* **120**(6), 409(2024). DOI: 10.31857/S0370274X24090152.
- [4] А. М. Черепащук, *Астрон. Журн.* **100**, 684 (2023). DOI: 10.31857/S0004629923080030.
- [5] C. A. Haswell, T. Tajima, J.-I. Sakai, *Astrophys. Journal* **401**, 495 (1992). DOI: 10.1086/172081
- [6] N. S. Kardashev, *Cosmic supercollider*. *MNRAS* **276**, 515 (1995). <https://doi.org/10.1093/mnras/276.2.515>.
- [7] A. Yu. Neronov, D. V. Semikoz, I. Tkachev, *New Journal of Physics* **11**, 065015 (2009). DOI: 10.1088/1367-2630/11/6/065015.
- [8] Ya. N. Istomin, A. A. Gunya, *Phys. Rev. D* **102**, 043010 (2020). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.043010>.

- [9] А. В. Урысон, Изв. РАН сер. физ. **89**(6), 948 (2025). DOI: 10.1134/S1062873825711353.
- [10] M. Kachelrieß, O. Kalashev, S. Ostapchenko, D. V. Semikoz, Phys. Rev. D **96**, 083006 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.083006>.
- [11] C. J. Cesarsky, Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. **28B**, 51 (1992). DOI: 10.1016/0920-5632(92)90108-5.
- [12] R. J. Protheroe, P. L. Biermann, Astropart. Phys. **6**, 45 (1996). Erratum. Astropart. Phys. **7**, 181 (1997). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-6505\(96\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0927-6505(96)00041-2).
- [13] Y. Inoue, S. Inoue, M. Kobayashi, et al., Astrophys. Journal. **768**, 197 (2013). DOI: 10.1088/0004-637X/768/2/197.
- [14] O. E. Kalashev, E. Kido, JETP **120**, 790 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1063776115040056>.
- [15] J. L. Puget, F. W. Stecker, J. H. Bredekamp, The Astrophys. Journal **205**, 638 (1976). DOI: 10.1086/154321.
- [16] A. Abdul Halim, P. Abreu, M. Aglietta, et al. (The Pierre Auger Collaboration), Journal of Cosmology and Astroparticle Physics **01**, 022 (2024). DOI: 10.1088/1475-7516/2024/01/022.

Поступила в редакцию 8 ноября 2025 г.

После доработки 5 марта 2026 г.

Принята к публикации 6 марта 2026 г.