

Космические лучи сверхвысоких энергий: источники, процессы ускорения и явления ГЗК

В.А. Поминова^{1,*} И.Ю. Трошин^{2†}

¹ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», отделение ядерной физики и технологий,
кафедра общей и специальной физики. Россия, 249039,

Калужская область, г. Обнинск, тер. Студенческий городок, д. 1

²НИЯУ «МИФИ», отделение ядерной физики и технологий. Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31

(Поступила в редакцию 10.06.2024; подписана в печать 22.07.2024)

Космические лучи сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) достигают энергией 10^{20} эВ, что в миллион раз превосходит энергию, достигаемую на искусственных ускорителях частиц. Прилёт частиц высокой энергии из космоса происходит нечасто, поэтому требуются детекторы с большой площадью для регистрации таких событий. Необходимо понимать, какие известные эффекты могут ускорять и замедлять частицы до таких энергий. Верхним ограничением по энергии является эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) [4]. Этот процесс существенно ограничивает величину возможного расстояния до источников, и он должен приводить к подавлению высокоэнергетической части спектра [8]. В данной работе проводится анализ эффекта ГЗК для ядер от водорода до железа.

PACS: 95.85.Ry.

УДК: 524.834

Ключевые слова: космические лучи сверхвысоких энергий, спектр космических лучей, протоны высоких энергий, реликтовое излучение, эффект ГЗК.

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) являются одной из самых энергичных форм излучения, их энергия, по-видимому, превышает 10^{20} эВ. Космические лучи сверхвысоких энергий были впервые обнаружены около 40 лет назад в эксперименте Volcano Ranch [1], с типичной частотой событий равной одной частице на 1 км^2 в столетие. Следующие эксперименты, включая эксперимент Fly's Eye [2] и AGASA [3], наблюдали только пару событий. Однако, несмотря на скудность данных, в спектре КЛСВЭ наблюдается интересное явление, а именно его кажущееся плавное продолжение при энергиях превышающих предел 10^{20} эВ. Видимо КЛСВЭ распределены изотропно, что указывает на их внегалактическое происхождение.

1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Протоны, которые перемещаются на космологических расстояниях, испытывают потери энергии из-за взаимодействия с универсальным фоновым излучением Вселенной 2.7 К в пороговых реакциях фоторождения пионов. При равномерном распределении протонов во Вселенной, даже пренебрегая эффектами красного смещения и эволюцией потенциального космологического источника, можно ожидать, что данные взаимодействия приведут к обрезанию наблюдаемого спектра

КЛСВЭ при энергиях $\sim 6 \times 10^{19}$ эВ, называемого эффектом Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) [4]. Это происходит из-за сильной зависимости скорости потери энергии от энергии взаимодействий при образовании фотопионов. В итоге только при энергиях выше $\sim 10^{20}$ эВ протоны с относительно близкого расстояния ($< 100 \text{ Мпк}$) смогут достичь Земли. Однако, имеющиеся данные указывают на уплотнение спектра выше 10^{19} эВ [5], а также отсутствие явного обрезания до энергий 10^{20} эВ.

Для объяснения этого явления создали два класса теорий: «top-down» и «bottom-up» [6, 10]. В первом классе теорий «top-down», небольшой коэффициент разветвления в нуклоны высоких энергий будет результатом распада нестабильных или метастабильных сверхмассивных частиц, возникающих в масштабах Великого объединения, или топологических дефектов, возникающих в аналогичных масштабах. Большая часть энергии этих распадов идет на образование л-мезонов, которые в свою очередь распадаются на большее количество нейтрино, электронов и фотонов. Во втором классе теорий «bottom-up», протоны достигают сверхвысоких энергий путем обычных процессов электромагнитного ускорения. В настоящее время установлено лишь несколько астрофизических источников, которые способны ускорять частицы до энергий порядка 10^{20} эВ. Предполагаемые потенциальные места ускорения включают в себя релятивистские джеты и потоки, связанные с черными дырами, гамма-всплесками, вспышкам активных ядер галактик (АЯГ) и т.д. [6].

Среди многих гипотез происхождения, также было высказано предположение, что диффузные гамма-всплески (ДГВ) могут вызывать наблюдаемый поток КЛСВЭ. Предполагалось, что ДГВ возникают в результате адронядерных взаимодействий космических лучей (КЛ) с межзвездной средой (МЗС) с возмож-

* vikt.pominova@mail.ru

† IUTroshin@mephi.ru

ным вкладом источников лептонного и адронного излучения, что позволяет испускаться КЛСВЭ с общим количеством испускаемой энергии в диапазоне от ТэВ до ПэВ [7].

За последние десятилетия были обнаружены оптические, рентгеновские и еще около десятка гамма-всплесков (ГВ), что позволяло далее идентифицировать родительские галактики этих источников и их красные смещения. Большинство ГВ находятся в диапазоне от умеренного до высокого красного смещения, вследствие чего эффект ГЗК в спектре КЛСВЭ, создаваемого гамма-всплесками, проявляется и более выражен при умеренном красном смещении и низких энергиях, что резко противоречит экспериментальным данным.

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТА ГРЕЙЗЕНА–ЗАЦЕПИНА–КУЗЬМИНА ДЛЯ ЯДЕР ОТ ПРОТОНА ДО ЖЕЛЕЗА

Потеря энергии протонов сверхвысоких энергий является следствием прирождения фотопионов ($p + \gamma \rightarrow \pi + n$) посредством взаимодействия с фотонами реликтового микроволнового излучения Вселенной и образования пар ($p + \gamma \rightarrow p + e^+ + e^-$). Производство фотопионов является доминирующим взаимодействием между КЛСВЭ и микроволновым излучением для энергий $> 10^{20}$ эВ. Энергетический спектр частиц космического излучения экспоненциально уменьшается при энергии $\sim 6 \times 10^{19}$ эВ. При такой энергии протоны начинают взаимодействовать с фотонами реликтового излучения рождая фотопионы.

Реакция $p + \gamma \rightarrow \pi + n$ протекает через рождение адронного резонанса Δ^+ [8]:



Адронный резонанс ($m_{\Delta} = 1232$) — возбужденное состояние кварков с крайне малым временем жизни $\tau \sim 10^{-23}$ с [11]. Сечение реакции, протекающих через резонанс, резко увеличивается, если энергия в системе центра инерции сталкивающихся частиц совпадает с точностью до ширины резонанса с его массой. Без вывода приведем формулу, связывающую энергию протона и фотона с условием резонанса

$$E_p E_{\gamma} = (m_{\Delta}^2 - m_p^2) = 0.2 \text{ ГэВ}.$$

Пороговая энергия ГЗК при этом [6]:

$$E_{th} = (m_i - m_p)^2 + \frac{m_i^2}{2\varepsilon_{\gamma}(1 - \cos\theta)},$$

где m_i — масса i -той частицы в МэВ, а ε_{γ} — максимальная энергия реликтового излучения.

Рассчитаем пороговую энергию ГЗК для протона

$$E_{th}(p + \gamma \rightarrow pi + n) = (m_p - m_{\pi})^2 + \frac{m_p^2}{2\varepsilon_{\gamma}(1 - \cos\theta)}.$$

Зная плотность реликтовых фотонов ($n_{\gamma} \approx 440$ фотонов/см³) и сечение ($\sigma \sim 0.1$ мб), можно вычислить пробег взаимодействия протонов или среднее время между столкновениями реликтовых фотонов с протонами:

$$\tau = \frac{\lambda}{c} \approx 10^7 \text{ лет} \sim 2 \text{ Мпк}.$$

Если время жизни протонов больше этой величины, то столкновение с фотонами микроволнового излучения неизбежно и оно приведет к образованию первичного спектра как раз на энергии $\sim 10^{19}$ эВ.

В расчете энергии ГЗК для протонов при чернотельном распределении фотонов микроволнового излучения 2.7 К по спектру реакция станет эффективной при

$$E_{GZK} \approx 7 \times 10^{20}.$$

Реакция рождения фотопионов имеет большое сечение, свой максимум достигает на адронном резонансе Δ^+ . На полуширине резонанса [9]:

$$\sigma \sim 300 \text{ мкб} \approx 3 \times 10^{-28} \text{ см}^2.$$

Плотность числа реликтовых фотонов $n_{\gamma} \sim T^3 \sim 440 \text{ см}^{-3}$. Это соответствует длине свободного пробега

$$L_{\sigma} = (\sigma n_{\gamma})^{-1} \approx 2 \text{ Мпк}.$$

Предположим, что вместо протона взаимодействует более тяжелая частица с массой m_i , тогда пороговая энергия может сдвинуться в область более высокой энергии. Аналогично рассчитывая пороговую энергию ГЗК для ядер от протона до железа можно наблюдать изменение в поведении энергии — с увеличением массы взаимодействующей частицы прямо пропорционально ей будет увеличиться пороговая ГЗК-энергия.

На рис. 1 показано, как пороговая энергия, при которой частицы начинают терять свою энергию вследствие взаимодействий с реликтовым фотонным фоном, варьируется в зависимости от массы и заряда частиц. Чем выше масса ядра, тем большее расстояние частица может преодолеть до достижения пороговой энергии ГЗК. Можно заметить, что прилет более массивных частиц с начальной энергией порядка 10^{23} эВ будет наблюдаться меньше, чем частиц с энергией порядка 10^{20} эВ, это объясняется тем, что при каждом столкновении первичный протон теряет приблизительно $\sim 20\%$ энергии, что соответствует отношению массы протона и фотопиона. В серии последовательных столкновений энергия протона будет уменьшаться по экспоненте в e раз, при прохождении расстояния L_A — длины затухания. Энергии, превышающие резонансную ($E \approx 10^{19}$ эВ), имеют длину затухания $L_A \sim 10$ Мпк. Таким образом, энергия уменьшается до значений, близких к порогу 10^{19} эВ, после прохождения расстояний порядка 110–150 Мпк.

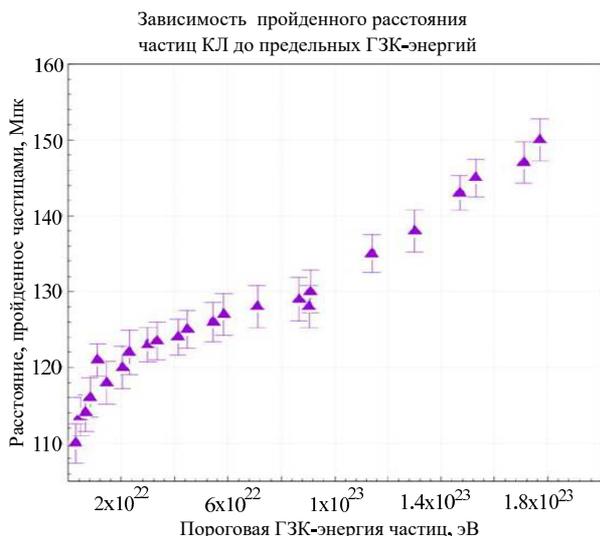


Рис. 1. Зависимость портовой энергии Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) от пройденного частицей расстояния для различных типов ядер от протона до железа; ▲ — характеризуют распределение ядер химических элементов в составе КЛ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из данных рассуждений и расчетов можно сделать вывод — частицы с зарегистрированной энергией порядка 10^{19} эВ, должны быть ускорены в источниках, которые находятся на расстоянии $R_{GZK} \equiv 110 - 150$ Мпк. Соответствующий пространственный объем называется ГЗК-расстоянием. Направление прихода первичных протонов с энергией, превышающей значения ГЗК, должны указывать на их источники или область ускорений.

Благодарности

Выражаю благодарность своему научному руководителю и Научно-образовательному центру «НЕВОД» в рамках которого было проведено исследование. <http://www.nevod.mephi.ru>.

- [1] Linsley J. // Phys. Rev. Lett. **10**. 146. (1963).
 [2] Bird D. et al. // ApJ **424**. 491. (1994).
 [3] Yoshida S. et al. // Astropart. Phys. **3**. 151. (1995).
 [4] Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма в ЖЭТФ. **4**. 114. (1966).
 [5] Stecker F. // Phys. Rev. Lett. **21**. 1016. (1968).
 [6] Meszaros P. // Cambridge University Press. 2010.
 [7] Kai Y., Ruo-Yu L. // Nature Astronomy. **8**. 628 (2024).
 [8] Hillas A.M. // Ann. Rev. of Astron. and Astrophys. **22**. 425 (1984).
 [9] Мурзин В.С. Астрофизика космических лучей: учебное пособие для вузов. М.: Университетская книга; Логос, 2007.
 [10] Sabatier P. // Journal of Pub. Policy. **6**. 21 (1986).
 [11] Гончарова Н.Г. Частицы и атомные ядра. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013.

Ultra-high energy cosmic rays: sources, acceleration processes and GZK phenomena

V.A. Pominova^{1,a}, I.Y. Troshin^{2,b}

¹IATE NRNU "MEPhI Department of nuclear physics and technology, Department of General and Special Physics Russia, 249039, Kaluga region, Obninsk

²National Research Nuclear University "MEPhI Department of Nuclear Physics and Technology. Russia, Moscow
E-mail: ^avikt.pominova@mail.ru, ^bIYTroshin@mephi.ru

Ultra-high energy cosmic rays (UHECR) reach an energy of 10^{20} eV, which is a million times higher than the energy achieved in artificial particle accelerators. The arrival of high-energy particles from space occurs infrequently, so detectors with a large area are required to register such events. It is necessary to understand what known effects can accelerate and decelerate particles to such energies. The upper energy limit is the Greisen–Zatsepin–Kuzmin (GZK) effect [4]. This process significantly limits the possible distance to sources, and it should lead to suppression of the high-energy part of the spectrum [8]. This work analyzes the GZK effect for nuclei from hydrogen to iron.

PACS: 95.85. Ry.

Keywords: GZK effect, ultra-high energy cosmic rays, cosmic ray spectrum, high energy protons, cosmic microwave background radiation.

Received 10 June 2024.

Сведения об авторах

- Поминова Виктория Александровна — студентка 2 курса Отделения ядерной физики и технологий ОИАТЭ НИЯУ «МИФИ»; e-mail: vikt.pominova@mail.ru.
- Трошин Иван Юрьевич — аспирант 3 курса Отделение ядерной физики и технологий НИЯУ «МИФИ»; e-mail: IYTroshin@mephi.ru.