

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

УДК 539.1

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ОБЪЯСНЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНОГО СПЕКТРА
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ АННИГИЛЯЦИЕЙ
ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СОСЕДНЕЙ БРАНЕ

Научный руководитель
Профессор, д.ф.-м.н.

_____ С. Г. Рубин

Студент

_____ Л. И. Басов

Москва 2024

Содержание

Введение	3
1 Аннигиляция тяжелых электронов	4
2 Заключение	5
Список использованных источников	5

ВВЕДЕНИЕ

Объяснение энергетического спектра космических лучей сверхвысоких энергий ($E_0 > 10^{19}$) является важной нерешенной проблемой современной физики. Гигантские атмосферные ливни, вызванные частицами с энергией, превышающего 10^{19} эВ, вызывают большой интерес с первых событий, зарегистрированных на крупнейших мировых установках Volcano Ranch (Hires) (США), Naverah Park (Англия), SUGAR (Австралия), AGASA и др [1]. Одним из наиболее ярких примеров подобных частиц, является атмосферный ливень Oh-Mu-God, зафиксированный в в 1991 году. Энергия частицы, вызвавшей ливень, оценивалась в $3 * 10^{20}$ эВ. Только по состоянию на 2014 год было зарегистрировано более 72 частиц с подобной энергией[2]. Существование подобных частиц привлекает интерес научного сообщества, поскольку их энергия превышает предел Грейзена - Зацепина - Кузьмина - это теоретический верхний предел энергии космических лучей от отдалённых источников, связанный с взаимодействием частиц с фотонами реликтового микроволнового излучения до тех пор, пока их энергия не упадет ниже указанного порога [3]. За прошедшие годы было выдвинуто множество различных гипотез, объясняющих высокую энергию космических лучей. Кратко опишем некоторые из них:

1) Ускорение частиц в остатках сверхновых. В этой гипотезе частицы ускоряются ударными волнами, возникающими при взрывах сверхновых. Это один из наиболее распространенных механизмов, известных как ускорение Ферми первого порядка, при котором частицы получают энергию при многократном отражении от движущихся магнитных облаков.

2) Релятивистские джеты гамма-всплесков. Ускорение частиц происходит из-за гамма-всплесков, вызванных слиянием нейтронных звезд или коллапсом звезды с образованием черной дыры.

3) Квазары. Выделяют также ускорение магнитными полями излучений в квазарах и в высокоэнергетических джетах от черных дырах в центрах галактик. Эти поля также могут потенциально ускорять протоны и другие частицы до ультравысоких энергий.

4) Космические струны и монополи: В рамках этой гипотезы, включающей топологические дефекты (например, космические струны и монополи), возникшие при разделении взаимодействий в ранней вселенной, высокоэнергетические космические лучи могут быть результатом аннигиляции или распада этих объектов.

5) Распад тяжелых частиц (сценарии распада WIMP). Слабовзаимодействующие массивные частицы (WIMP) — гипотетические частицы, которые

являются одними из предполагаемых кандидатов на роль темной материи. Эта гипотеза рассматривает возможность того, что высокоэнергетические частицы могут являться продуктами распада этих частиц.

б) Теория бран и экстра-измерений[4]. Браны - это трехмерные объекты, которые могут находиться в пространстве с большим количеством измерений. Четырехмерное пространство ограничено браной внутри многомерного пространства, также известного как «гиперпространство». Взаимодействие между электронами и позитронами на других бранах может привести к их аннигиляции, в результате чего образуются высокоэнергетические частицы, которые проходят через барьер между бранами и попадают в нашу Вселенную. Частицы могут иметь высокую энергию из-за большой массы аннигилирующих частиц, ускорения частиц на других бранах или увеличения энергии в результате просачивания частиц между бранами. В рамках этой теории и проводилась данная научно-исследовательская работа.

1. АННИГИЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В рамках теории бран и дополнительных измерений рассматривают аннигиляцию электрона и позитрона, обладающих большой массой, поскольку только при большой массе возможна настолько большая энергия фотонов, получающихся в результате. Аннигиляция происходит, когда эти частицы сталкиваются, исчезают и преобразуются в другие частицы.

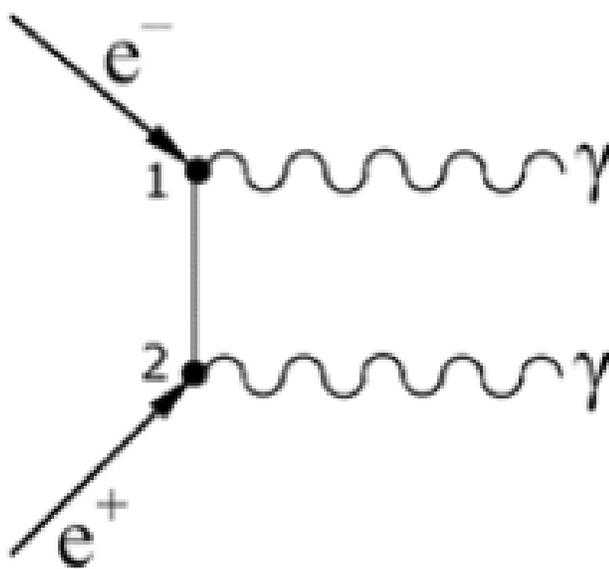


Рисунок 1 — Диаграмма Фейнмана. Двухфотонная аннигиляция электрона и позитрона.

В данной работе рассматривается случай, когда этот процесс приводит к образованию двух гамма-фотонов с энергией, соответствующей массе покоя электрона и позитрона. Эти фотоны излучаются в противоположные стороны для сохранения импульса.

$$m_e c^2 + m_e c^2 = 2E_\gamma \quad (1)$$

$$(2)$$

Тогда можно сказать, что энергия фотона равна энергии тяжелого электрона:

$$E_\gamma \approx m_e c^2 \quad (3)$$

В данном случае, мы ищем массу тяжелых электронов при условии, что энергия фотонов у нас равна или превышает предел Грейзена - Зацепина - Кузьмина, то есть $5 * 10^{19}$ эВ.

$$m_e \approx 5 * 10^{10} \text{ ГэВ} - \text{масса тяжелого электрона} \quad (4)$$

Для оценки взаимодействия электронов подобной массы, рассмотрим сечение аннигиляции[5] электронов и зависимость сечения от массы.

$$\sigma_{\text{ann}}(E) \sim \frac{1}{m^2} - \text{зависимость полного сечения от массы} \quad (5)$$

Можно сделать вывод, что при увеличении массы тяжелого электрона, его полное сечение рассеяния сильно уменьшается, тяжелый электрон гораздо меньше взаимодействует с другими частицами. Это позволяет рассматривать тяжелые электроны как одного из возможных кандидатов на роль темной материи.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был проведен обзор различных теорий, объясняющих высокоэнергетический спектр космических лучей различными способами, изучен ряд современных статей по теме космических лучей сверхвысоких энергий, и бранной космологии. Также была рассчитана масса тяжелых электронов, необходимая для получения фотонов с достаточной энергией при аннигиляции. В конце была рассмотрена формула полного сечения аннигиляции и зависимость полного сечения от массы.

Дальнейшая работа состоит в поиске статей, схожих по тематике, моделировании различных параметров среды на бранах, а также изучения темной материи на бранах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. V. Berezhinsky. Extragalactic cosmic rays and their signatures. *Astroparticle Physics*, 53:120–129, 2014.
2. R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad, M. Allen, R. Anderson, R. Azuma, E. Barcikowski, J. W. Belz, D. R. Bergman, and S. A. Blake. Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 eev in the northern sky measured with the surface detector of the telescope array experiment. *The Astrophysical Journal Letters*, 790(2):21, 2014.
3. Г. Т. Зацепин and В. А. Кузьмин. О верхней границе спектра космических лучей. *Письма в ЖЭТФ*, 4(3):114–117, 1966.
4. Arkadiy A. Popov and Sergey G. Rubin. Spontaneous branes formation. *arXiv preprint*, 2024. 19 с.
5. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, В. Б. Берестецкий, and Л. П. Питаевский. *Квантовая электродинамика*. Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.