**Космические лучи сверхвысоких энергий: источники, процессы**

**ускорений и явления ГЗК**

**Поминова В. А.1**

1*студент*

*ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», Отделение ЯФиТ, ядерные физика и технологии,*

*E-mail:*[*vpominova2005@mail.ru*](mailto:vpominova2005@mail.ru)

Астрофизика заряженных частиц становится все более популярной в последние несколько лет. Большое внимание уделяется космическим лучам сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) прилетающие на Землю. КЛСВЭ обладают энергией до 1020 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. В КЛСВЭ есть несколько нерешённых проблем: излом спектра частиц [1], «Мюонная загадка» [2] и другие [3].

Необходимо понимать, какие известные эффекты могут ускорять частицы до таких энергий. Считается, что происхождение КЛСВЭ связано с явлениями во Вселенной, при котором выделяется большое количество энергии: релятивистскими джетами и потоками, связанными с черными дырами, гамма-всплесками, релятивистскими вспышками активных галактических ядер или крупномасштабных аккреционных ударных волн вокруг скоплений галактик [4].

Загадка происхождения КЛСВЭ стоит в ряду самых интересных и важных нерешенных проблем астрофизики частиц. Ограничение по энергиям является эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК). Вскоре после открытия реликтового микроволнового излучения Вселенной Грейзен, Зацепин и Кузьмин [5] заметили, что протоны самых высоких энергий, распространяясь на космологические расстояния от источника к наблюдателю, должны сильно терять энергию в пороговых реакциях фоторождения пионов во взаимодействиях с универсальным фоновым излучением. Этот процесс существенно ограничивает величину возможного расстояния до источников, зарегистрированных КЛСВЭ, которое с учетом ГЗК-эффекта не может превышать 100 Мпк, и он должен приводить к подавлению высокоэнергетической части спектра.

В данной работе рассмотрены возможные источники космических лучей большой энергии, механизмы ускорения и расчеты ГЗК.

**Литература**

1. **Зацепин Г. Т.** О верхней границе спектра космических лучей / Кузьмин В. А. // Письма в ЖЭТФ. – 1966. Т. 4. С. 114.
2. **Мурзин В. С.** Астрофизика космических лучей: учебное пособие для вузов. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 488 с.
3. **Петрухин А. А.** Мюоны космических лучей высоких и сверхвысоких энергий / А. Г. Богданов, Р. П. Кокоулин // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2018. – Т. 49. № 4. С. 1124-1147.
4. **Хиллас A. M.** Происхождение космических лучей сверхвысоких энергий / Ежегодный обзор астрономии и астрофизики. – 1984. – Т. 22. С. 425-444.
5. [Link.springer.com](https://link.springer.com/journal/10509) : международный журнал астрономии, астрофизики и космических наук : сайт. – 2022. Т. 367. № 27. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10509-022-04054-5> (дата публикации: 09.03.2022)