

УДК 530.1

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ КОСМИЧЕСКИМ МИКРОВОЛНОВЫМ ФОНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Е. А. Манакова

В работе рассмотрен механизм поглощения гамма-квантов сверхвысокой энергии, типа $\gamma^0 + \gamma_{\text{rel}}^0 \rightarrow e^- + e^+$, распространяющихся в межзвездной и межгалактической средах. Исследования выполнены в рамках подхода, предложенного Е. А. Буяновой, Л. С. Молчатским [1, 2]. Показано, что гамма-кванты способны быть переносчиками ультравысокой энергии ($E > 10^{20}$ эВ) на межгалактических расстояниях.

Вопрос о происхождении космических лучей ультравысокой энергии ($E > 10^{20}$ эВ) и механизме их распространения в межзвездной и межгалактической средах является одним из актуальных вопросов современной физики высоких энергий и астрофизики [1–8]. После открытия реликтового излучения стало ясно, что протоны высокой энергии должны терять ее в результате неупругих столкновений с квантами реликтового излучения [8–10]. Теоретический анализ этих процессов приводит к выводу, что потоки протонов с энергией $E > 10^{19}$ эВ должны иметь исключительно низкую интенсивность. Однако эксперименты с космическими лучами не подтверждают этот вывод. Аналогичный анализ распространения космических гамма-квантов привел некоторых исследователей к заключению, что интенсивность гамма-излучения должна аномально резко падать при энергии $E > 10^{14}$ эВ [8, 11, 12]. Частицы сверхвысокой энергии, попадающие из космоса в атмосферу Земли, вызывают в ней каскады процессов, ведущих к образованию широких атмосферных ливней (ШАЛов) [1, 2, 13–16], состоящих из вторич-

ных частиц. Исследование этих вторичных частиц с помощью специальных установок, расположенных на поверхности Земли, позволяет получить информацию о первичной частице [3]. В настоящее время такие установки расположены в различных частях земного шара. В России такая установка находится в Якутске.

Исследование ШАЛов с помощью этих установок показывает, что в атмосферу Земли из космоса влетают протоны с энергией, превышающей 10^{20} эВ. Следовательно, эффект Грейзена–Зацепина–Кузьмина [9, 17] в экспериментах не наблюдается. Это один из парадоксов современной астрофизики [1–3].

Существует несколько подходов к решению этой проблемы.

Во-первых, существуют подходы, основанные на предположении, что принцип лоренц-инвариантности не выполняется при сверхвысоких энергиях [8, 13, 14]. Во-вторых, некоторые исследователи этой проблемы считают, что частицы сверхвысокой энергии есть результат распада частиц «темной материи» [13]. И в-третьих, выдвигается гипотеза об образовании высокоэнергетических частиц в активных ядрах скопления галактик, то есть за пределами нашей галактики, а переносчиками энергии в нашу галактику являются нейтрино [1, 2, 8]. Этот подход доминирует в на-

Манакова Елена Алексеевна, (elena.manaikova88@mail.ru), магистрант 2 года обучения кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета, 443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.

стоящее время в научном сообществе. Однако в публикациях Е. А. Буяновой и Л. С. Молчатского [1, 2] представлено теоретическое обоснование возможности переноса энергии на межгалактические расстояния гамма-квантами сверхвысокой энергии. В настоящей работе именно в рамках этого подхода рассматривается процесс распространения гамма-квантов сверхвысокой энергии в галактической и межгалактической средах.

Космический микроволновой фон как среда поглощения гамма-квантов

Источниками излучения в нашей Галактике являются в основном пульсары. Фотоны, идущие от этих источников, достигают энергии $10^{14} \div 10^{16}$ эВ [1–3, 7, 8] и длина свободного пробега фотонов составляет $O(1 \text{ клк})$. В частности, наиболее детально изучено гамма-излучение пульсара Лебедь X-3. Однако в последние годы были обнаружены излучения с энергиями, достигающими величины $10^{19} \div 10^{20}$ эВ [1, 2, 13]. Предполагается, что их источниками являются активные ядра галактик, находящихся от Земли на расстояниях $20 \div 75 \text{ Мпк}$ [2, 7, 8, 10], то есть процессы, порождающие фотоны столь высокой энергии, протекают вне нашей галактики.

В связи со сказанным возникают следующие вопросы. 1) Как меняется интенсивность гамма-излучения, распространяющегося внутри и вне нашей Галактики? 2) Гамма-кванты сверхвысокой энергии каких источников способны достигнуть окрестности Земли?

Для ответа на эти вопросы необходимо провести всесторонний количественный анализ возможных механизмов поглощения гамма-излучения средой, в которой оно распространяется. Как показывают исследования [3], доминирующим процессом поглощения гамма-квантов сверхвысокой энергии является процесс взаимодействия гамма-кванта ультравысокой энергии (γ^0) с фотоном микроволнового фонового излучения (γ_{rel}), с последующим образованием электрон-позитронной пары [3, 18],

то есть

$$\gamma^0 + \gamma_{\text{rel}}^0 \rightarrow e^- + e^+. \quad (1)$$

Далее вычислим энергетический порог этой реакции.

Вычисление энергетического порога реакции поглощения

Запишем закон сохранения 4-импульса для реакции (1):

$$k_1 + k_2 = p_1 + p_2, \quad (2)$$

где k_1 – 4-импульс фотона ультравысокой энергии; k_2 – 4-импульс фотона микроволнового фонового излучения; p_1 – 4-импульс электрона; p_2 – 4-импульс позитрона.

От уравнения (2) полезно перейти к релятивистско-инвариантным выражениям:

$$(k_1 + k_2)^2 = (p_1 + p_2)^2. \quad (3)$$

Нас интересует пороговая энергия фотонов в лабораторной системе (Л.С.). Принимая это во внимание, вычислим левую часть уравнения (3) в Л.С.

$$\begin{aligned} (k_1 + k_2)_{\text{ЛС}}^2 &= k_1^2 + k_2^2 + 2(k_1 k_2) = \\ &= m_\gamma^2 c^2 + m_\gamma^2 c^2 + \frac{2\omega_1 \omega_2}{c^2} - 2(\vec{k}_1 \vec{k}_2) = \\ &= \frac{2\omega_1 \omega_2}{c^2} (1 - \cos \theta), \end{aligned} \quad (4)$$

где θ – угол столкновения фотонов в Л.С.; ω_1 и \vec{k}_1 – энергия и импульс налетающего фотона; ω_2 и \vec{k}_2 – энергия и импульс реликтового фотона.

При выводе формулы учтено, что масса фотона равна нулю, а энергия и импульс фотона связаны соотношением $|\vec{k}| = \frac{\omega}{c}$. Используем систему единиц, в которой $\hbar = c = 1$.

Для определения порога реакции (1) правую часть уравнения (2) полезно вычислить в системе центра масс (СЦМ):

$$\begin{aligned} (p_1 + p_2)_{\text{СЦМ}}^2 &= \frac{(E_1 + E_2)^2}{c^2} - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = \\ &= \frac{(E_1 + E_2)^2}{c^2} = 4 \frac{E^2}{c^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

так как в СЦМ $(\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = 0$ и $E_1 = E_2 = E$, где E_1 и E_2 – энергии электрона и позитрона.

Теперь соотношения (4) и (5) подставим в уравнение (3) и учтем, что порогу

реакции соответствует случай, когда фотоны летят навстречу друг к другу, то есть $\theta = \pi$.

$$\frac{4\omega_1\omega_2}{c^2} = 4\frac{E^2}{c^2}, \quad (6)$$

так как порогу реакции (1) соответствует $E = mc^2$, из уравнения (6) находим, что

$$\omega_1^{порог} = \frac{m^2c^4}{\omega_2}. \quad (7)$$

Спектр микроволнового излучения описывается распределением Планка с температурой $T = 2.73 \text{ K}$ [8].

Функция распределения имеет максимум при энергии фотонов [3, 18]

$$\omega_2 \approx 10^{-3} \text{ эВ}. \quad (8)$$

Подставив это значение в формулу (7) и учитывая, что $mc^2 = 0.51 \text{ МэВ}$, находим

$$\omega_1^{порог} = 2.2 \cdot 10^{14} \text{ эВ}. \quad (9)$$

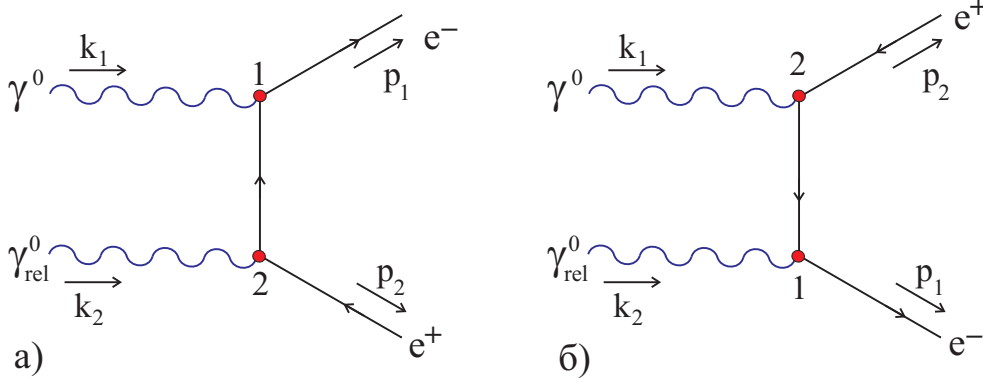


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для процесса образования электрон-позитронной пары при столкновении фотонов [19]

Этот процесс хорошо изучен в квантовой электродинамике [19–21]. Его эффективное поперечное сечение определяется формулой [19]:

$$\sigma = \frac{\pi r_e^2}{2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left[\left(3 - \frac{v^4}{c^4}\right) \ln \frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} - 2\frac{v}{c} \left(2 - \frac{v^2}{c^2}\right) \right], \quad (10)$$

где $r_e = \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ см}$ – классический радиус электрона; v – скорость разлетающихся частиц в СЦМ.

Следовательно, величина v связана с энергиями сталкивающихся фотонов в ЛС

Энергия, излучаемая источниками гамма-квантов, находящимися внутри нашей Галактики, достигает величины $10^{14} \div 10^{16} \text{ эВ}$, то есть превосходит пороговую энергию для реакции (1). Это означает, что гамма-кванты сверхвысокой энергии, поглощение которых имеет место в нашей Галактике, могут иметь как галактическое, так и внегалактическое происхождение.

Вычислим основные параметры процесса поглощения гамма-излучения от источников, принадлежащих нашей Галактики.

Исследование процесса поглощения.

Оценка основных параметров

Процесс рождения электрон-позитронной пары (1) в низшем порядке по параметру тонкой структуры $\alpha = \frac{e^2}{\hbar} = \frac{1}{137}$ описывается диаграммами Фейнмана [19], изображенными на рис. 1.

уравнением (6), из которого следует, что

$$\omega_1\omega_2 = \frac{m^2c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Отсюда следует следующее выражение для скорости в СЦМ:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{m^2c^4}{\omega_1\omega_2}}. \quad (11)$$

Если учесть, что среди реликтовых фотонов преобладают фотоны с энергией (8) и $mc^2 = 0.51 \text{ МэВ}$, то из формулы (11) вытекает:

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{2.2 \cdot 10^{14} \text{ эВ}}{\omega_1}}. \quad (12)$$

При прохождении излучения в какой-либо среде его интенсивность падает по экспоненциальному закону [22, 23]:

$$I = I_0 e^{-x/\lambda}, \quad (13)$$

где x – пройденный излучением путь; λ – длина взаимодействия.

Значение λ определяется по формуле [22]:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}, \quad (14)$$

где n – концентрация частиц поглощения в среде.

В данной задаче частицы – это кванты реликтового излучения. Согласно астрофизическим данным [8]:

$$n = 410 \frac{1}{\text{см}^3}. \quad (15)$$

Выполним оценку длины взаимодействия при $v/c = 0.45$, согласно (10)

$$\sigma \approx \frac{\pi r_e^2}{2} = 1.2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2 = 120 \text{ мбарн}. \quad (16)$$

При этом энергия гамма-квантов составляет:

$$1.25 \cdot \omega_1^{\text{порог}} = 2.76 \cdot 10^{14} \text{ эВ},$$

что незначительно отличается от порогового значения. Согласно выражениям (14)–(16) в итоге имеем:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sigma n} = 2.0 \cdot 10^{22} \text{ см} = 6.5 \text{ кпк}. \quad (17)$$

В таблице 1 приведены результаты настоящей работы для интенсивности гамма-излучения сверхвысоких энергий от галактических источников [3]. Значения получены вблизи порога образования электрон-позитронной пары.

Таблица 1

Галактические источники гамма-излучений сверхвысокой энергии

Источник	Расстояние, кпк	Относительная интенсивность излучения в окрестности Земли, I/I_0
Лебедь X-3	13	0.14
Геркулес X-1	5	0.46
Вела X-1	1.9	0.74
Лебедь X-1	2.5	0.68

Результаты, приведенные в таблице 1, свидетельствуют о том, что гамма-излучение от источников нашей Галактики способно достигнуть Земли. Однако гамма-кванты с энергиями $E > 10^{17} \text{ эВ}$, как полагают многие авторы [1–3, 7, 8], рождаются за пределами нашей Галактики. Их источниками являются активные ядра галактик. Расстояния до этих объектов достигают 100 Мпк и более.

Из формулы (13) видно, что фотоны с энергией близкой к пороговой E_0 , не достигнут нашей Галактики, так как в этом случае $\lambda_0 \ll x$. Но этот вывод касается фотонов с энергией вблизи порога, то есть при $E \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ эВ}$. График зависимости длины взаимодействия от энергии

фотонов, распространяющихся во Вселенной, изображен на рисунке 2. Результаты настоящей работы показывают, что при $E = 10^{20} \text{ эВ}$ длина взаимодействия $\lambda = 110 \text{ Мпк}$. Эта величина соизмерима с расстоянием до активных ядер скопления галактик в созвездии Змееносца. Это означает, что не только нейтрино, но и фотоны ультравысокой энергии $E > 10^{20} \text{ эВ}$, распространяющиеся от этих источников, могут достичь окрестности Земли. Этот результат не противоречит недавним экспериментальным исследованиям на астрофизической станции в Якутске, в которых были обнаружены фотоны ультравысокой энергии, идущие из космоса [1, 2, 13].

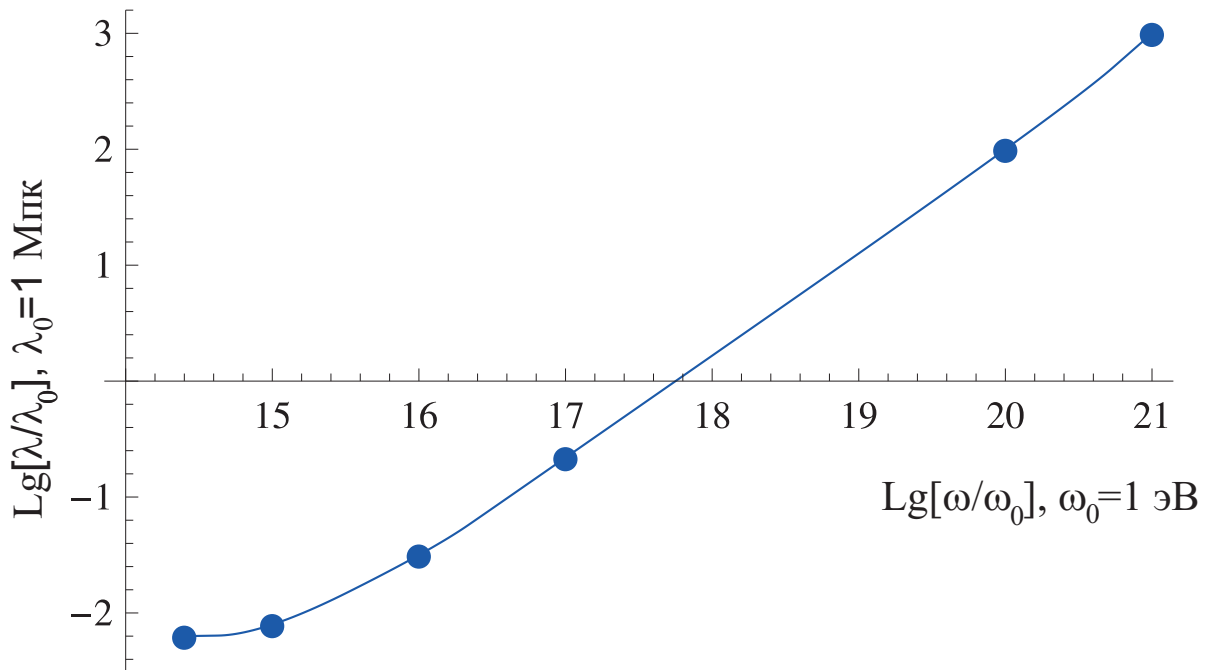


Рис. 2. График энергетической зависимости длины взаимодействия космических фотонов с квантами реликтового излучения: ω -энергия космического фотона, λ -длина взаимодействия

Заключение

В работе исследован основной механизм поглощения гамма-квантов сверхвысокой энергии типа $\gamma^0 + \gamma_{\text{rel}}^0 \rightarrow e^- + e^+$, распространяющихся в межзвездной и межгалактической средах. С использованием результатов квантовой электродинамики найдена зависимость длины взаимодействия от энергии налетающего фотона. Выполненный численный анализ результатов показывает, что длина взаимодействия быстро растет с увеличением энергии фотонов, что позволяет фотонам сверхвысокой энергии проходить большие расстояния в межгалактической среде. Этот теоретический вывод не противоречит недавним экспериментальным исследованиям ШАЛов на астрофизической станции в Якутске, где были обнаружены космические гамма-кванты с энергией, достигающей величины порядка 10^{20} эВ.

Благодарности

Автор выражает благодарность Л. С. Молчатскому и Ю. П. Филиппову за помощь в подготовке статьи и ценные замечания.

Литература

1. Буянова Е. А., Молчатский Л. С. Гамма-кванты сверхвысокой энергии от астрофизических источников и механизм поглощения // Вестник ФМФИ ПГСГА. № 6. 2011. С. 148–150.
2. Буянова Е. А., Молчатский Л. С. Гамма-кванты от астрофизических источников как переносчики сверхвысокой энергии в космическом пространстве // Математическая физика и ее приложения: матер. III междунар. конф. Самара: СамГТУ, 2012. С. 80.
3. Астрофизика космических лучей / под ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Наука, 1990. 528 с.
4. Григоров Н. Л., Толстая Е. Д. Спектр космических лучей и проблема их происхождения // Письма в ЖЭТФ. 2004. 125 (4). С. 734–743.
5. Деденко Л. Г., Зацепин Г. Т. Космические лучи ультравысоких энергий // Ядерная физика. 2005. 168 (3). С. 449–467.
6. Иванов А. А. Поиск внегалактических источников космических лучей сверхвысокой энергии // Письма в ЖЭТФ. 2008. 87 (4). С. 215–219.

7. Птускин А. С. О происхождении галактических космических лучей // УФН. 2007. 177 (5). С. 558–565.
8. Рябов В. А. Нейтрино сверхвысокой энергии от астрофизических источников и распадов сверхмассивных частиц // УФН. 2006. 176 (9). С. 931–963.
9. Greisen K. End to the Cosmic-Ray Spectrum? // Phys. Rev. Lett. 1966. Vol. 16. P. 748–750.
10. Филоненко А. Д. Радиоастрономический метод измерения потоков космических частиц сверхвысокой энергии // УФН. 2012. 182 (8). С. 793–827.
11. Ряжская О. Г. Нейтрино от гравитационных коллапсов звезд: современный статус эксперимента // УФН. 2006. 176 (10). С. 1039–1050.
12. Гинзбург В. Л. Астрофизика космических лучей (история и общий обзор) // УФН. 1996. 166 (2). С. 169–183.
13. Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18} \text{eV}$ from Yakutsk muon data / Glushkov A. V., Makarov I. T., Pravdin M. I. et. al. // Phys. Rev. 2010. Vol. 82. P. 041101 (5).
14. Coleman S. R., Glashow S. L. High-energy tests of Lorentz invariance // Phys. Rev. 1999. Vol. 59. P. 116008 (5).
15. Upper limit the photon fraction in highest-energy cosmic rays from AGASA data / Risse M. et. al. // Phys. Rev. 2005. Vol. 95. P. 171102 (4).
16. Upper limit on the ultra-high-energy photon flux AGASA and Yakutsk data / Rubtson G. I., Dedenko L. G., Fedorova G. F., et al. et. al. // Phys. Rev. 2006. Vol. 73. P. 063009 (6).
17. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. О верхней границе спектра космических лучей // Письма ЖЭТФ. 1966. №4. С. 114–117.
18. Савельев И. В. Курс общей физики. М.: Наука, 1987. Т.3. 320 с.
19. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1984. 443 с.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика (нерелятивистская теория). М.: Физматлит, 2004. Т.3. 800с.
21. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 2002. 720 с.
22. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1988. 316 с.
23. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика (дополнительные главы). М.: Наука, 1980. 505 с.

Статья поступила в редакцию 20.04.2013.