

УДК 539.12.01

ФОТОНЫ КАК ПЕРЕНОСЧИКИ СВЕРХВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ
В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕЕ. А. Буюнова¹, Л. С. Молчатский²¹ Самарский государственный университет,
Россия, 443011, Самара, ул. Академика Павлова, 1.² Поволжская государственная социально-гуманитарная академия,
Россия, 443099, Самара, ул. М. Горького, 65/67.

E-mails: lenagukina@mail.ru, levmolchatsky@mail.ru

Исследован процесс поглощения гамма-квантов сверхвысокой энергии в космическом пространстве. Показано, что основным механизмом поглощения являются реакции, возникающие при столкновениях фотонов космического излучения с фотонами микроволнового и радиодиапазона. Оценка средней длины свободного пробега фотона при различных энергиях свидетельствует, что гамма-кванты с энергиями $E > 10^{19}$ eV, идущие от активных ядер галактик, по-видимому, достигают окрестности Земли. Этот результат находится в согласии с недавними экспериментальными наблюдениями широких атмосферных ливней на установке AGASA в Японии и на Якутской установке.

Ключевые слова: космические лучи, фотоны сверхвысокой энергии.

Введение. Вопрос о происхождении и распространении космических лучей (КЛ) с энергией $E \geq 7 \cdot 10^{19}$ eV остается одним из загадочных вопросов астрофизики и физики высоких энергий уже долгое время. Лауреат Нобелевской премии В. Л. Гинзбург отнёс эту проблему к одной из важных и интересных проблем физики и астрофизики [1].

Еще в 1966 году в работах Грейзена и Зацепина—Кузьмина [2, 3] показано, что реакции фоторождения пионов протонами на квантах реликтового излучения должны приводить к обрезанию спектра первичных КЛ. Точка эффективного обрезания определяется энергетическим порогом реакции $p + \gamma^0 \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$. Исследования КЛ сверхвысокой энергии (СВЭ) свидетельствуют, что такое обрезание отсутствует [1, 4, 5].

Недавние исследования космических лучей СВЭ с помощью установок по измерению широких атмосферных ливней (ШАЛ) [6–8], расположенных в различных частях земного шара, привели к новому неожиданному результату: в области СВЭ (вплоть до $E > 10^{20}$ eV) в КЛ присутствуют гамма-кванты. Более того, эксперименты на японской установке Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) и на Якутской установке по измерению ШАЛов указывают на доминирующее присутствие фотонов в КЛ с энергией порядка 10^{20} eV [6–8].

Существует несколько подходов к решению этой проблемы [1, 5, 9]. Некоторые из них основаны на предположении, что принцип лоренц-инвариантности не выполняется при СВЭ. Кроме того, имеются работы, в которых частицы СВЭ рассматриваются как результаты распада сверхмассивных частиц — вимпов (WIMP — Weakly Interacting Massive Particle) или как следствие аннигиляции нейтралино и антинейтралино — частиц, предсказываемых моделями суперсимметрии (MSSM — Minimal Supersymmetric Standard Model) и т. д.

В нашей работе данная проблема рассматривается в рамках стандартных

Елена Алексеевна Буюнова, магистрант, каф. общей и теоретической физики. Лев Соломонович Молчатский (к.ф.-м.н., доц.), доцент, каф. теоретической физики.

физических представлений. Согласно современным астрофизическим данным, космические лучи СВЭ возникают за пределами нашей Галактики, и их источниками являются активные ядра галактик, находящихся на расстояниях порядка 20–75 Мрс от Земли [1, 4, 10]. Мы рассматриваем в качестве переносчиков СВЭ во Вселенной фотоны, идущие от галактик с активными ядрами. Но способны ли эти фотоны достигнуть окрестности Земли? Это главный вопрос.

1. Исследование процесса взаимодействия космических фотонов с квантами фонового излучения. Исследования показывают, что основным процессом поглощения фотонов СВЭ является реакция образования электрон-позитронной пары при столкновении фотона космических лучей с фотоном фонового излучения:

$$\gamma_{c-r}^0 + \gamma_B^0 \rightarrow e^- + e^+. \quad (1)$$

Анализ этой реакции методами квантовой электродинамики показывает, что эффективные поглощения фотонов космического излучения СВЭ возможны на фоне реликтового излучения и на радиофоне. Первое, прежде всего, обусловлено большой плотностью реликтового излучения ($n = 410 \text{ cm}^{-3}$), а второе — низкими частотами радиофона.

Остановимся на этих вопросах более детально. Начнём с рассмотрения процесса поглощения фотонов СВЭ на квантах микроволнового фона. Энергетический порог реакции (1) в лабораторной системе

$$\omega_0^{c-r} = m^2/\omega_B,$$

где m — масса электрона, ω_B — энергия фотонов фонового излучения. Здесь и далее используется система единиц, в которой $\hbar = 1$ и $c = 1$. Учитывая, что температура реликтового излучения $T = 2,73 \text{ K}$, находим $\omega_0^{c-r} = 2 \cdot 10^{14} \text{ eV}$.

Исследование процесса (1) методами квантовой электродинамики приводит к следующим результатам.

В первом порядке теории возмущений процесс (1) описывается двумя полюсными диаграммами Фейнмана (см. рисунок), которым соответствует инвариантная амплитуда

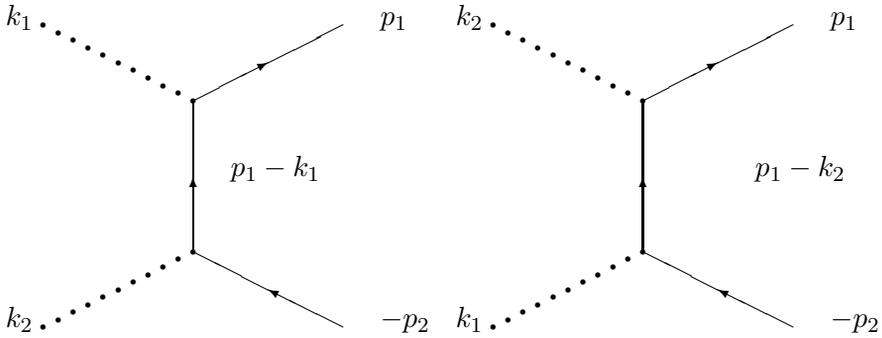
$$M = 4\pi\alpha\bar{u}(p_1) \left[\hat{\varepsilon}_1 \frac{\hat{p}_1 - \hat{k}_1 + m}{(p_1 - k_1)^2 - m^2} \hat{\varepsilon}_2 + \hat{\varepsilon}_2 \frac{\hat{p}_1 - \hat{k}_2 + m}{(p_1 - k_2)^2 - m^2} \hat{\varepsilon}_1 \right] v(p_2). \quad (2)$$

Здесь $u(p_1)$ и $v(p_2) = u(-p_2)$ — биспиноры Дирака, описывающие состояния электрона и позитрона; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — векторы поляризации фотонов; k_1, k_2 — 4-импульсы фотонов; p_1, p_2 — 4-импульсы соответственно электрона и позитрона; m — масса электрона. В формуле (2) используются стандартные обозначения: $\hat{p}_\mu = p_\mu \gamma^\mu$, $\hat{k}_\mu = k_\mu \gamma^\mu$, где γ^μ — матрица Дирака; $\bar{u} = u^+ \gamma^0$ — сопряжение Дирака.

Эффективное дифференциальное сечение реакции (1) в системе центра масс (СЦМ) определяется формулой

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{64\pi^2 s} \frac{|\vec{p}_f|}{|\vec{k}_i|} |M|^2, \quad (3)$$

где $d\Omega$ — элемент телесного угла; $s = (k_1 + k_2)^2 = (p_1 + p_2)^2$ — постоянная Манделъстама; $p_f = |\vec{p}_1| = |\vec{p}_2|$; $k_i = |\vec{k}_1| = |\vec{k}_2|$.



Диаграммы Фейнмана для процесса образования электрон-позитронной пары при столкновении фотонов. Здесь используются следующие обозначения: k_1, k_2 — 4-импульсы фотонов; p_1, p_2 — 4-импульсы, соответственно, электрона и позитрона.

Соотношения (2) и (3) в двух предельных случаях, которые представляют интерес, приводят к следующим результатам

В низкоэнергетическом пределе, когда движение образовавшихся частиц в СЦМ нерелятивистское, полное эффективное сечение (ЭС) реакции определяется формулой

$$\sigma = \pi r_e^2 v, \tag{4}$$

где $r_e = e^2/m$ — классический радиус электрона, v — скорость возникших частиц. Из формулы (4) видно, что ЭС растет с увеличением энергии столкновения фотонов.

В другом предельном случае при энергии электрона и позитрона в СЦМ $E \gg m$ ЭС падает по закону

$$\sigma = \frac{\pi\alpha^2}{\omega_{c-r}\omega_B} \left[\ln\left(\frac{4\omega_{c-r}\omega_B}{m^2}\right) - 1 \right], \tag{5}$$

а следовательно, средняя длина свободного пробега (СДСП) космических гамма-квантов СВЭ растёт, так как

$$L = 1/(n\sigma). \tag{6}$$

2. Результаты вычислений и их анализ. Максимального значения ЭС достигает при энергии $\omega_{c-r} = 2 \cdot 10^{15}$ eV. Ему соответствует минимальное значение СДСП:

$$L_{\min} = 10 \text{ крс}. \tag{7}$$

Гамма-излучения с энергией 10^{15} – 10^{16} eV были зарегистрированы еще в 80-х годах прошлого века [1, 4]. Расстояние от Земли до этих источников порядка 10 крс (расстояние до источника Лебедь X-3 — 13 крс, а до Геркулес X-1 — 5 крс). Таким образом, значение (7) для СДСП фотонов согласуется с данными астрофизических наблюдений гамма-излучений внутри нашей Галактики. Кроме того, ясно, что излучения с такой энергией, исходящие от

внегалактических источников, не способны достигнуть Земли, так как расстояние до них на 3 порядка больше значения (7) для СДСП.

Однако, как видно из формул (5) и (6), с ростом энергии фотонов космического излучения ЭС их взаимодействия с фоном падает, а следовательно, СДСП растёт. Вычисления с помощью этих формул приводят к следующим результатам для фона реликтового излучения:

$$L_{MB} = 12 \text{ Мрс при } \omega_{c-r} = 10^{19} \text{ eV}; \quad L_{MB} = 100 \text{ Мрс при } \omega_{c-r} = 10^{20} \text{ eV}.$$

Эти значения для СДСП — одного порядка с данными о расстояниях до возможных источников гамма-излучений СВЭ [1, 4, 5], а следовательно, вероятность выживания фотона с энергией $\omega_{c-r} > 10^{19} \text{ eV}$ на пути D от внегалактического источника до Земли близка к 1, так как $P = \exp(-D/L)$.

Таким образом, фон реликтового излучения, по-видимому, не способен эффективно поглощать гамма-кванты с энергиями $\omega_{c-r} > 10^{19} \text{ eV}$.

Исходя из соотношения (5) есть основание предположить, что эту функцию может выполнять низкочастотный радиофон. Однако экспериментальные данные о распределении радиофона недостаточно определены. Согласно данным наблюдений этих излучений, они доминируют в интервале длин волн от $\lambda = 3 \text{ см}$ до $\lambda = 30 \text{ м}$, а их интенсивность меняется по закону $I = A\nu^{-\beta}$ при $\beta = 0,62$ [4].

Эта формула определяет распределение плотности радиофона по частотам и позволяет вычислить дифференциальный коэффициент поглощения $d\mu = \sigma dn$, а затем и интегральный:

$$\mu = \frac{9,4 \cdot 10^7 \text{ eV cm}^{-1}}{(\beta + 1) \omega_{c-r}} [\ln(6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}^{-1} \omega_{c-r}) + 1/(\beta + 1) - 1].$$

С помощью этой формулы находим, что при энергии космического фотона $\omega_{c-r} = 10^{20} \text{ eV}$ его СДСП в среде радиофона составляет величину

$$L_{RB} = (1/\mu) = 15 \text{ Мрс}.$$

Этот результат свидетельствует о доминирующей роли радиофона в подавлении гамма-излучений СВЭ, но не исключает возможности их прохождения до окрестности Земли, поскольку найденное значение СДСП по порядку величины не отличается от расстояний до галактик с активными ядрами.

Закключение. Таким образом, радиофон, по-видимому, является основной средой поглощения. Эта область космического излучения недостаточно полно изучена, поэтому возможны коррективы. Тем не менее полученные результаты не исключают того факта, что гамма-кванты, образующиеся в активных ядрах галактик, являются переносчиками СВЭ во Вселенной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. Л. Гинзбург, "Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными (тридцать лет спустя, причем уже на пороге XXI века)?" // *УФН*, 1999. Т. 169, № 4. С. 419–441; англ. пер.: V. L. Ginzburg, "What problems of physics and astrophysics seem now to be especially important and interesting (thirty years later, already on the verge of XXI century)?" // *Phys. Usp.*, 1999. Vol. 42, no. 4. Pp. 353–373.
2. К. Greisen, "End to the Cosmic-Ray Spectrum?" // *Phys. Rev. Lett.*, 1966. Vol. 16, no. 17. Pp. 748–750.
3. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А., "О верхней границе спектра космических лучей" // *Письма в ЖЭТФ*, 1966. Т. 4, № 3. С. 114–117; англ. пер.: G. T. Zatsepin, V. A. Kuz'min, "Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays" // *JETP Letters*. Vol. 4, no. 3. Pp. 78–80.

4. В. С. Березинский, С. В. Буланов, В. Л. Гинзбург, В. А. Догель, В. С. Птускин, *Астрофизика космических лучей* / ред. В. Л. Гинзбурга. М.: Наука, 1990. 523 с.; англ. пер.: V. S. Berezinskii, S. V. Bulanov, V. A. Dogiel, V. L. Ginzburg, V. S. Ptuskin, *Astrophysics of Cosmic Rays*. Amsterdam: North-Holland, 1990. xii+534 pp.
5. J. W. Elbert, P. Somers, "In search of a source for the 320 EeV Fly's Eye cosmic ray" // *Astroph. J.*, 1995. Vol. 441, no. 1. Pp. 151–161, arXiv: astro-ph/9410069.
6. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, I. E. Sleptsov, D. S. Gorbunov, G. I. Rubtsov, S. V. Troitsky, "Constraints on the flux of primary cosmic-ray photons at energies $E > 10^{18}$ eV from Yakutsk muon data" // *Phys. Rev. D*, 2010. Vol. 82, no. 4, 041101(R). 5 pp., arXiv: 0907.0374 [astro-ph.HE].
7. M. Risse, P. Homola, R. Engel, D. Góra, D. Heck, J. Pekala, B. Wilczyńska, H. Wilczyński, "Upper limit on the photon fraction in highest-energy cosmic rays from AGASA data" // *Phys. Rev. Lett.*, 2005. Vol. 95, no. 17, 171102. 4 pp.
8. G. I. Rubtsov, L. G. Dedenko, G. F. Fedorova, E. Yu. Fedunin, A. V. Glushkov, D. S. Gorbunov, I. T. Makarov, M. I. Pravdin, T. M. Roganova, I. E. Sleptsov, S. V. Troitsky, "Upper limit on the ultrahigh-energy photon flux from AGASA and Yakutsk data" // *Phys. Rev. D*, 2006. Vol. 73, no. 6, 063009. 8 pp., arXiv: astro-ph/0601449.
9. В. А. Рябов, "Нейтрино сверхвысоких энергий от астрофизических источников и распадов сверхмассивных частиц" // *УФН*, 2006. Т. 176, № 9. С. 931–963; англ. пер.: V. A. Ryabov, "Ultrahigh-energy neutrinos from astrophysical sources and superheavy particle decays" // *Phys. Usp.*, 2006. Vol. 49, no. 9. Pp. 905–936.
10. А. Д. Филоненко, "Радиоастрономический метод измерения потоков космических частиц сверхвысокой энергии" // *УФН*, 2012. Т. 182, № 8. С. 793–827; англ. пер.: A. D. Filonenko, "Radioastronomical measurement of ultrahigh-energy cosmic particle fluxes" // *Phys. Usp.*, 2012. Vol. 55, no. 8. Pp. 741–772.

Поступила в редакцию 05/XI/2012;
в окончательном варианте — 27/III/2013.

MSC: 83F05

PHOTONS AS CARRIERS OF ULTRA-HIGH ENERGY IN COSMIC SPACE

*E. A. Buyanova*¹, *L. S. Molchatsky*²

¹ Samara State University,
1, Academician Pavlov st., Samara, 443011, Russia.

² Samara State Academy of Social and Humanities,
65/67, M. Gorky st., Samara, 443099, Russia.

E-mails: lenagukina@mail.ru, levmolchatsky@mail.ru

Absorbing process of ultrahigh-energy gamma-quanta in a cosmic space is investigated. It is shown that the main absorbing mechanism is the reactions arising at collisions of cosmic-ray photons with microwave and radio background ones. Estimate of the mean free path of a photon for different energies gives evidence that gamma-quanta with energies $E > 10^{19}$ eV running from Active Galactic Nuclei seem to reach the Earth vicinity. This result is in agreement with the recent observations of extensive air shower array experiments realized by AGASA and Yakutsk.

Key words: cosmic rays, ultrahigh-energy photons.

Original article submitted 05/XI/2012;
revision submitted 27/III/2013.

Elena A. Buyanova, Master Student, Dept. of General and Theoretical Physics.
Lev S. Molchatsky ((Ph. D. (Phys. & Math.)), Associated Professor, Dept. of Theoretical Physics.