

УДК 524.1-352

## ВЛИЯНИЕ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ДИФФУЗНОЕ КАСКАДНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

© 2024 г. А. В. Урысон<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки “Физический институт имени П. Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: uryson@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 24.05.2023

После доработки 15.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Обсуждается интенсивность диффузного гамма-излучения, образующегося в электромагнитных каскадах при распространении космических лучей ультравысоких энергий в межгалактическом пространстве. Получено, что в области энергий  $\sim 10^7$ – $10^9$  эВ спектры каскадного диффузного излучения слабо зависят от величины магнитного поля. Поэтому для оценки интенсивности каскадного гамма-излучения в этой области энергий не требуются уточненные модели межгалактического магнитного поля.

DOI: 10.31857/S0367676524030216, EDN: QKWBDN

### ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) ультравысоких энергий (УВЭ)  $E > 4 \times 10^{19}$  эВ взаимодействуют с фоновым излучением  $\gamma_b$  – СМВ, радио и внегалактическим фоновым светом (EBL) в реакциях  $p + \gamma_b \rightarrow p + \pi^0$  либо  $n + \pi^+$ ,  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ ,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ,  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  [1–4]. Рожденные  $e^\pm$ ,  $\gamma$  взаимодействуют с фоновым излучением  $\gamma_b$ , генерируя электромагнитные каскады (ЭМ-каскады) в процессах  $e + \gamma_b \rightarrow e^+ \gamma$  (IC-рассеяние) и  $\gamma + \gamma_b \rightarrow e^+ + e^-$  (образование пар) [4–9].

Помимо IC-рассеяния  $e^\pm$  могут генерировать синхротронное излучение в межгалактическом магнитном поле (EGMF), что приводит к нарушению описанного развития ЭМ-каскада. Развитие каскада не будет нарушено, если поле  $B < 10^{-9}$  Гс [10].

Межгалактическое магнитное поле неоднородно: в войдах  $B < 10^{-11}$  Гс, на границах войдов и в филаментах  $B \sim 10^{-9}$ – $10^{-7}$  Гс, внутри галактик и в их окрестности (внутри галактических кластеров)  $B \sim 10^{-6}$  Гс. Космические лучи и каскадные частицы распространяются, практически не пересекая галактики, галактические кластеры и крупномасштабные структуры вне войдов, поскольку относительный объем этих областей незначителен. Поэтому влияние их магнитных полей на развитие каскада незначительно. Однако оценка этого влияния может быть релевантной для поиска частиц темной материи. Продукты их аннигиляции, распадаясь, рождают гамма-кванты, поэтому частицы могут быть обнаружены по избытку диффузного

гамма-излучения. Вследствие этого при поиске экзотических частиц требуется знать вклад различных компонент в диффузное излучение, одной из которых является каскадное излучение.

Для выяснения влияния магнитного поля на каскадное излучение мы моделировали распространение космических частиц в однородном поле величиной  $\sim 10^{-6}$  Гс, типичном внутри галактик и галактических кластеров, и в поле  $\sim 10^{-12}$  Гс, которое содержится в областях вне галактик, галактических кластеров и в войдах. Получено, что в области энергий  $\sim 10^7$ – $10^9$  эВ спектры каскадного диффузного излучения слабо зависят от величины магнитного поля. Поэтому не требуется уточнять модели межгалактического магнитного поля для оценки интенсивности каскадного гамма-излучения в этой области энергий.

### МОДЕЛЬ

Основные предположения принятой модели таковы.

Частицы ускоряются в активных ядрах галактик (АЯГ) вблизи сверхмассивных черных дыр (СМЧД) (см., например, [11]), поэтому АЯГ могут быть источниками КЛ УВЭ независимо от типа и расстояния до них. Расстояния до источников КЛ УВЭ соответствуют красным смещениям  $z \approx 0.001$ –5.

Эволюция СМЧД неясна. Мы используем модель эволюции объектов типа Blue Lacertae objects (BL Lac), так как эта модель описывает

совокупность данных по КЛ УВЭ [12]. BL Lac — это один из типов АЯГ.

КЛ УВЭ состоят из протонов. Они ускоряются на фронтах ударных волн (в джете или аккреционном диске) [11, 13, 14], поэтому спектр инжекции КЛ — степенной  $\propto E^{-\alpha}$ ,  $\alpha = 2.2-2.5$ . В нашей модели  $\alpha = 2.2$ .

В модели были приняты следующие параметры внегалактического фонового излучения. СМВ имеет планковское распределение по энергии со средним значением энергии  $\varepsilon_r = 6.7 \times 10^{-4}$  эВ, средняя плотность фотонов  $n_r = 400 \text{ см}^{-3}$ ; параметры радиоизлучения были взяты из [15], внегалактического фонового света — из [16].

Внегалактическое магнитное поле однородное, его величина  $B = 10^{-6}$  или  $10^{-12}$  Гс.

Вычисления проводились с использованием кода TransportCR [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В области  $E \geq 10^{19}$  эВ гамма-излучение рождается в распадах  $\pi^0$ , и кривые совпадают. При меньших энергиях гамма-кванты рождаются и в ЭМ-каскадах, и в синхротронном процессе. Каскадные электроны рассеиваются на синхротронных квантах, энергия электронов уменьшается, и в спектре гамма-излучения в области  $\sim 10^{14}-10^{18}$  эВ образуется провал, выраженный тем ярче, чем больше поле  $B$ . Перекачка частиц в область низких энергий в поле

$B = 10^{-6}$  Гс приводит к совпадению кривых в области  $\sim 10^7-10^9$  эВ и росту интенсивности гамма-излучения в поле  $B = 10^{-6}$  Гс по сравнению с интенсивностью гамма-излучения в поле  $B = 10^{-12}$  Гс при  $E < 10^7$  эВ.

Когда интенсивности равны, их отношение  $R = J(E, B = 10^{-12} \text{ Гс}) / J(E, B = 10^{-6} \text{ Гс}) = 1$ . В области энергий  $\sim 10^7-10^9$  эВ относительное отклонение от единицы составляет  $\delta R \approx 0.25-0.3$ , при меньших энергиях  $\delta R \geq 3$ , с ростом энергии  $\delta R \sim 10-100$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы получили, что в области энергий  $\sim 10^7-10^9$  эВ, получая оценку вклада диффузного каскадного гамма-излучения во внегалактический гамма-фон, не требуется уточнение моделей внегалактического магнитного поля.

Интенсивность каскадного гамма-излучения, по-видимому, требуется знать при поиске экзотических частиц, так как они могут быть обнаружены по избытку диффузного гамма-излучения, поскольку продукты их аннигиляции, распадаясь, рожают гамма-кванты. Поэтому при поиске экзотических частиц необходимо знать вклад различных компонент в диффузное излучение, в том числе каскадного гамма-излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Greisen K. // Phys. Rev. Lett. 1966. V. 16. P. 748.
2. Зацепин Г.Т., Кузьмин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 4. С. 114; Zatsepin G.T., Kuz'min V.A. // JETP Lett. 1966. V. 4. P. 78.
3. Berezinsky V., Kalashev O. // Phys. Rev. D. 2016. V. 94. Art. No. 023007.
4. Шустова О.П., Калмыков Н.Н., Урысон А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 3. С. 342; Shustova O.P., Kalmykov N.N., Uryson A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2011. V. 75. No. 4. P. 313.
5. Hayakawa S. // Progr. Theor. Phys. 1966. V. 37. P. 594.
6. Прилуцкий О.Ф., Розенталь И.Л. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1969. Т. 33. С. 1776.
7. Prilutsky O., Rozental I.L. // Acta Phys. Hung. Suppl. 1970. V. 129. P. 51.
8. Урысон А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. Т. 63. С. 624; Uryson A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. 1999. V. 63. P. 627.
9. Урысон А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. С. 948; Uryson A.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. 2007. V. 71. P. 913.
10. Урысон А.В. // ЖЭТФ. 1998. Т. 113. С. 12; Uryson A.V. // JETP. 1998. V. 86. No. 1. P. 6.
11. Istomin Ya.N., Gunya A.A. // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. Art. No. 043010.

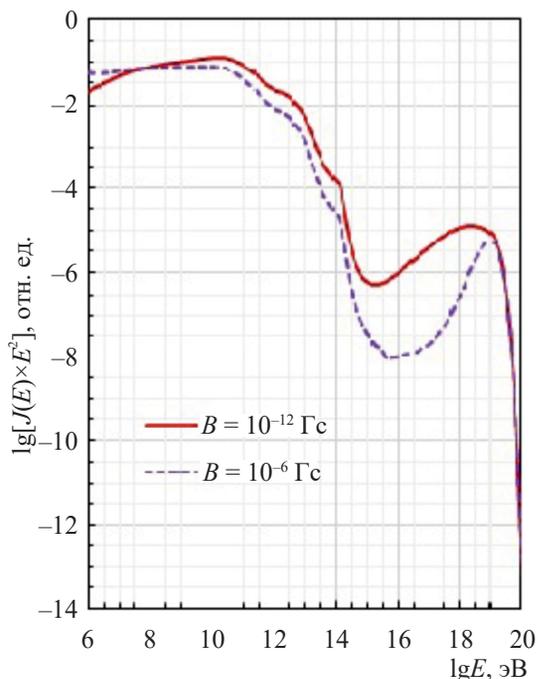


Рис. 1. Модельные спектры диффузного каскадного гамма-излучения около Земли при  $B = 10^{-6}, 10^{-12}$  Гс. Спектры при  $B < 10^{-12}$  и  $B = 10^{-12}$  Гс совпадают.

12. *Kachelries M., Kalashev O., Ostapenko S., Semikoz D.V.* // Phys. Rev. D. 2017. V. 96. Art. No. 083006.
13. *Крымский Г.Ф.* // ДАН. 1977. Т. 234. С. 1306; *Крымский Г.Ф.* // Sov. Phys. Dokl. 1977. V. 22. P. 327.
14. *Cesarsky C.J.* // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.). 1992. V. 28B. P. 51.
15. *Protheroe R.J., Biermann P.L.* // Astropart. Phys. 1996. V. 6. P. 45.
16. *Inoue Y., Inoue S., Kobayashi M. et al.* // Astrophys. J. 2013. V. 768. P. 197.
17. *Калашев О.Е., Кидо О.Е.* // ЖЭТФ. 2015. Т. 147. № 5. С. 917; *Kalashev O.E., Kido E.* // JETP. 2015. V. 120. No. 5. P. 790.

## Effect of extragalactic magnetic field on cascade gamma-ray emission

A. V. Uryson<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: uryson@sci.lebedev.ru*

The intensity of diffuse cascade gamma-ray emission produced in electromagnetic cascades when ultra-high energy cosmic rays propagate in extragalactic space is discussed. It is obtained that in the range of  $\sim 10^7$ – $10^9$  eV diffuse cascade gamma-ray spectra weakly depends on extragalactic magnetic field value. Thus, there is no need to refine extragalactic magnetic field models to estimate the intensity of cascade emission in this energy range.