

УДК 52

ВКЛАД КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ВО ВНЕГАЛАКТИЧЕСКОЕ ДИФФУЗНОЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ

© 2019 г. А. В. Урысон*

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 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

Обсуждается диффузное гамма-излучение, создаваемое в межгалактическом пространстве космическими лучами ультравысоких энергий ($E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ). Рассматриваются частицы с моноэнергетическими либо жесткими спектрами инжекции, формирующимися, возможно, при ускорении частиц в сверхмассивных черных дырах. Получено, что интенсивность диффузного гамма-излучения зависит от формы спектра инжекции. Поэтому сделан вывод, что данные о внегалактическом гамма-излучении могут применяться в исследовании сверхмассивных черных дыр.

DOI: 10.1134/S0367676519080386

Источники космических лучей (КЛ) ультравысоких энергий (УВЭ), $E > 4 \cdot 10^{19}$ эВ, пока не установлены. В настоящее время общепринята точка зрения, что КЛ УВЭ имеют внегалактическое происхождение и излучаются активными ядрами галактик. КЛ УВЭ исследуются с помощью наземных установок Pierre Auger Observatory (PAO) и Telescope Array (TA). Информация, которую получают на установках, — это направления приходов падающих частиц, их энергия и массовый состав (протоны или ядра).

В межгалактическом пространстве КЛ УВЭ взаимодействуют с фоновыми излучениями. В результате взаимодействий частиц с микроволновым космическим фоном энергетический спектр частиц «обрезается» - в нем отсутствуют частицы с энергией $E > 10^{20}$ эВ, если КЛ летят с расстояний, превышающих ~ 100 Мпк (ГЗК-эффект: [1, 2]). Энергетические спектры, полученные на установках PAO и TA, обрезаны. Однако они не согласуются по форме в области $E \geq 5 \cdot 10^{19}$ эВ, и это различие интерпретируется как разный массовый состав КЛ УВЭ: по данным PAO — это ядра, по данным TA — протоны.

Взаимодействие КЛ с фоновыми излучениями приводит, помимо ГЗК-эффекта, к образованию в межгалактическом пространстве электромагнитных каскадов [3, 4]. В каскадах образуется гамма-излучение, которое в составе внегалактического диффузного излучения измеряется с помощью прибора Fermi LAT (Large Area Telescope),

размещенного на борту космической обсерватории Fermi [5].

КЛ теперь исследуют, привлекая не только их энергетические спектры, но и данные по каскадному гамма-излучению. Вследствие этого рассматриваемые модели КЛ УВЭ должны удовлетворять двум критериям. Во-первых, как и прежде, требуется, чтобы вычисленные энергетические спектры КЛ УВЭ описывали измеренный спектр. Во-вторых, модельная интенсивность каскадного гамма-излучения должна быть меньше, чем измеренная интенсивность внегалактического диффузного излучения за вычетом вклада отдельных неразрешенных гамма-источников.

Мы обсуждаем КЛ УВЭ с моноэнергетическими либо жесткими, $|\gamma_g| < \approx 2.2$, начальными спектрами и гамма-излучение, которое порождают такие КЛ в межгалактическом пространстве. Рассматриваемые спектры инжекции могут формироваться, если частицы ускоряются непосредственно в сверхмассивных черных дырах (СМЧД). Ускорение может происходить по механизму Блендфорда–Знаека [6]. Кроме того, предложены сценарии, в которых частицы могут ускоряться до УВЭ электрическим полем в полярных областях СМЧД. Одна из таких моделей обсуждается в работах [7, 8]. В этой модели космические протоны ускоряются до энергий $2 \cdot 10^{20}$ эВ, причем спектр излучения КЛ УВЭ имеет резкий пик вблизи максимальной энергии частиц. Еще одна модель, по которой протоны ускоряются до энергии 10^{21} эВ, представлена в работе [9]. В этом

сценарии предполагается, что СМЧД окружена сверхсильным магнитным полем величиной $\sim 10^{11}$ Гс. Предложена также модель [9], в которой частицы могут ускоряться электрическим полем на участках аккреционного диска, где происходит взрывной рост поля.

В этой работе мы показываем, что источники КЛ УВЭ с жесткими и моноэнергетическими спектрами дают малый вклад в поток частиц, регистрируемых наземными установками. К тому же модельный спектр КЛ, дошедших до установки, сильно отличается от измеренного спектра по форме. Однако, несмотря на незначительную интенсивность частиц на Земле, КЛ от источников с рассматриваемыми спектрами могут создавать в межгалактическом пространстве заметный поток диффузного гамма-излучения по сравнению с данными, полученными с помощью Fermi LAT. Это необходимо учитывать, анализируя состав КЛ и их источники, а также модели темной материи, так как и каскадное излучение от КЛ УВЭ, и распады частиц темной материи вносят вклад в диффузное излучение. Кроме того, мы делаем вывод, что данные о внегалактическом диффузном гамма-излучении могут служить источником информации о процессах рождения частиц УВЭ в СМЧД. Вычисления проводились по программе TransportCR [11].

В межгалактическом пространстве КЛ УВЭ взаимодействуют с микроволновым и радио излучениями $p + \gamma_{rel} \rightarrow p + \pi^0$, $p + \gamma_{rel} \rightarrow n + \pi^+$. Распады образующихся пионов $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ и мюонов $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ дают начало позитронам и гамма-квантам, а они порождают электромагнитные каскады в реакциях с микроволновым излучением и внегалактическим фоновым светом $\gamma + \gamma_b \rightarrow e^+ + e^-$ (образование пар) и $e + \gamma_b \rightarrow e' + \gamma'$ (обратный комптон-эффект). Предположения, принятые в модели, относятся к трем пунктам: это источники КЛ УВЭ (их спектры инжекции и эволюция), внегалактические фоновые излучения и внегалактические магнитные поля. Мы предполагаем, что источники КЛ УВЭ – точечные. Это СМЧД, в которых заряженные частицы ускоряются до УВЭ в процессах [6, 9, 10]. Возможные спектры инжекции КЛ выбирались исходя из процессов ускорения КЛ в СМЧД: в модели [9] мы предполагаем моноэнергетический спектр инжекции КЛ с энергией $E_0 = 10^{21}$ эВ; при ускорении частиц в модели [10] мы полагаем исходные спектры КЛ степенными с показателем $|\gamma_g| < \approx 2.2$; кроме того, в этой модели предполагается равновероятное рождение частиц с любой энергией в диапазоне УВЭ $4 \cdot 10^{19} - 10^{21}$ эВ, тогда спектр инжекции – степенной с показателем $\gamma_g = 0$. Далее мы предполагаем, что КЛ УВЭ состоят из протонов. Мы полагаем, что рассматриваемые источ-

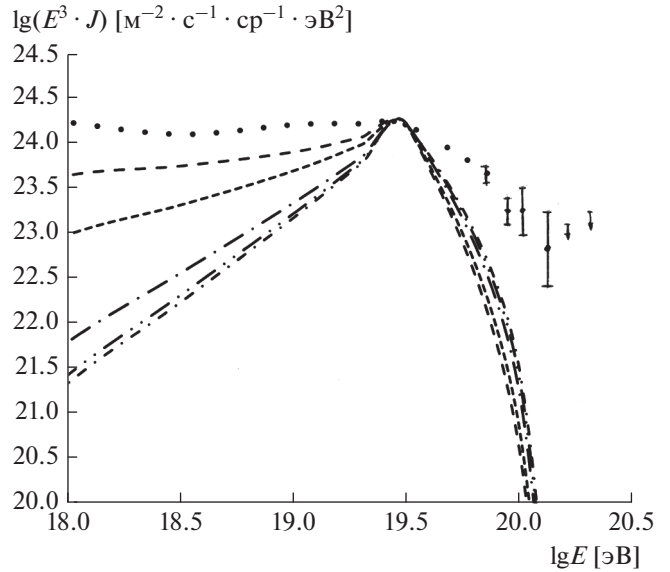


Рис. 1. Энергетический спектр КЛ УВЭ, полученный на установке РАО [13] (точки), и модельные спектры КЛ, полученные для разных значений показателя спектра инжекции γ_g : длинная пунктирная линия – $\gamma_g = 2.2$, пунктирная линия – $\gamma_g = 1.8$, длинная штрихпунктирная линия – $\gamma_g = 1$, штрихпунктирная линия с двумя точками – $\gamma_g = 0.5$, короткая штрихпунктирная линия – $\gamma_g = 0$. Модельные спектры нормированы на спектр РАО при энергии $10^{19.5}$ эВ. Спектр КЛ УВЭ с моноэнергетическим начальным спектром частиц обсуждается в [12].

ники КЛ УВЭ удалены на расстояния, соответствующие $z \geq 0.05$. Космологическая эволюция источников влияет на спектр КЛ у Земли. Космологическая эволюция СМЧД неясна и здесь рассматривается возможный сценарий эволюции, обсуждавшийся в работе [12]. Внегалактические фоновые излучения и межгалактическое магнитное поле рассматривались так же, как в [12].

Вычисленные энергетические спектры КЛ УВЭ показаны на рисунке. На нем приведен также спектр, полученный на установке РАО. При всех рассмотренных спектрах инжекции модельные спектры КЛ не описывают измеренный спектр РАО (и спектр, полученный на установке ТА). Вычисленная интегральная интенсивность каскадного гамма-излучения составляет:

$$\begin{aligned} \gamma_g = 0: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 5.416 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \gamma_g = -0.5: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 4.123 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma_g = -1: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 3.056 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \gamma_g = -1.8: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 2.015 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \gamma_g = -2.2: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 2.522 \cdot 10^{-11} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_0 = 10^{21} \text{эВ}: I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 1.002 \cdot 10^{-9} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Сравним модельную интегральную интенсивность гамма-излучения с данными Fermi LAT [5]. Измеренный внегалактический изотропный диффузный фон IGRB равен:

$$\begin{aligned} \text{IGRB}(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 1.325 \cdot 10^{-9} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}). \end{aligned} \quad (7)$$

Исключая из IGRB вклад неразрешенных источников, равный 72% (с учетом ошибки 14% [14]), получаем следующее значение $\text{IGRB}_{\text{without blazars}}(E > 50 \text{ ГэВ})$:

$$\begin{aligned} \text{IGRB}_{\text{without blazars}}(E > 50 \text{ ГэВ}) = \\ = 3.71 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}). \end{aligned} \quad (8)$$

Вычисленная интенсивность каскадного гамма-излучения меньше измеренной:

$$I_\gamma(E > 50 \text{ ГэВ}) < \text{IGRB}_{\text{without blazars}}(E > 50 \text{ ГэВ}), \quad (9)$$

если показатель экспоненциального спектра инжекции КЛ $\gamma_g < -1$.

В [5] при обработке данных измерений используются сведения о галактическом фоне, полученные в рамках трех моделей, обозначенных "А", "В" и "С". Учитывая ошибки измерения, а также неопределенность в данных о галактическом фоне в модели "А", получаем следующую полосу значений $\text{IGRB}_{\text{without blazars}}(E > 50 \text{ ГэВ})$:

$$\begin{aligned} 2.20 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}) \leq \\ \leq \text{IGRB}_{\text{without blazars}}(E > 50 \text{ ГэВ}) \leq \\ \leq 5.40 \cdot 10^{-10} (\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}). \end{aligned} \quad (10)$$

Вычисленная интенсивность каскадного гамма-излучения удовлетворяет условию (9) при степенных спектрах инжекции с показателем $\gamma_g = 0, -0.5, -1, -1.8, -2.2$. На интенсивность каскадного гамма-излучения влияет и эволюция источников КЛ: более сильная эволюция приводит к по-

вышению интенсивности каскадного гамма-излучения [12].

Возможно, что СМЧД являются источниками КЛ УВЭ, дающими малый вклад в поток частиц на Земле. Однако эти КЛ создают в межгалактическом пространстве заметный поток диффузного гамма-излучения по сравнению с данными Fermi LAT. Интенсивность каскадного гамма-излучения зависит от формы рассматриваемых спектров инжекции. Поэтому мы заключаем, что данные о внегалактическом диффузном гамма-излучении могут применяться в исследовании процессов ускорения КЛ в СМЧД. Полученные результаты зависят главным образом от вклада внегалактических источников в диффузное гамма-излучение. В настоящее время он определен с ошибкой около 15% [13]. Его уточнение возможно на приборах с лучшим угловым разрешением, чем у Fermi LAT.

Автор благодарит О.Е. Калашева за обсуждение кода Transport CR и Н.П. Топчиева за обсуждение характеристик космических гамма-телескопов. Автор благодарит рецензента за замечания.

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.
3. Hayakawa S. // Prog. Theor. Phys. 1966. V. 37. P. 594.
4. Prilutsky O., Rozental I.L. // Acta Phys. Hung. Suppl. 1970. V. 129. P. 51.
5. Ackermann M., Ajello M., Albert A. et al. // Astrophys. J. 2015. V. 799. P. 86A.
6. Blandford R.D., Znajek R.L. // MNRAS. 1977. V. 179. P. 433.
7. Neronov A. Yu., Semikoz D.V., Tkachev I.I. // New J. Phys. 2009. V. 11. Art. № 065015.
8. Kalashev O.E., Ptitsyna K.V., Troitsky S.V. // Phys. Rev. 2012. V. 86. Art. № 063005.
9. Kardashev N.S. // MNRAS. 1995. V. 522. P. 205.
10. Haswell C.D., Tajima T., Sakai J.-I. // Astrophys. J. 1992. V. 401. P. 495.
11. Kalashev O.E., Kido E. // ЖЭТФ. 2015. V. 147. P. 917.
12. Урысон А.В. // Письма в Астрон. журн. 2018. Т. 44. С. 589.
13. Aab A., Abreu P., Aglietta M. et al. (Pierre Auger Collaboration) // JCAP. 2017. V. 06. P. 026.
14. Di Mauro M. // arXiv: 1601.04323. 2016.