

## КАСКАДЫ ОТ ПЕРВИЧНЫХ ГАММА-КВАНТОВ И ЯДЕР — ИСТОЧНИК ФОНА ДЛЯ ПОИСКА ОСЦИЛЛЯЦИЙ ФОТОНОВ В АКСИНОПОДОБНЫЕ ЧАСТИЦЫ

С. А. Баклагин<sup>1</sup>, Т. А. Джатдоев<sup>1,\*</sup>, А. П. Курчева<sup>1,2</sup>,  
А. А. Люкшин<sup>1,2</sup>, Э. В. Халиков<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Рассматриваются методы поиска осцилляций фотонов в аксиноподобные частицы ( $\gamma \rightarrow \text{ALP}$ ) в спектрах экстрagalактических источников. Показано, что вторичная компонента от каскадов, инициированных первичными гамма-квантами или ядрами, может создавать значительный фон для поисков ALP в оптически толстой области спектра. Эксперименты с высоким энергетическим порогом ( $\sim 1$  ТэВ и выше) недостаточны для поиска процесса  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$ ; к этим работам необходимо привлечь инструменты со сравнительно низким энергетическим порогом ( $E < 100$  ГэВ), такие как СТА.

The methods of photon to axion-like particle oscillation ( $\gamma \rightarrow \text{ALP}$ ) search in the spectra of extragalactic sources are considered. It is shown that a secondary component from cascades initiated by primary gamma rays or nuclei can produce a significant background for ALP search in an optically thick area of the spectra. Experiments with high-energy threshold ( $\sim 1$  TeV and above) are insufficient for the  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$  process search; relatively low-energy threshold ( $E < 100$  GeV) instruments (such as СТА) should be employed in these works.

PACS: 98.54.Cm; 14.80.Va

### ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть первичных гамма-квантов с энергией  $> 1$  ТэВ от далеких (красное смещение  $z > 0,1$ ) внегалактических источников может поглощаться на фотонах внегалактического фонового излучения (Extragalactic Background Light, EBL) в результате процесса  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$  [1]. Наблюдения

---

\*E-mail: timur1606@gmail.com

\*\*E-mail: nanti93@mail.ru

ярких блазаров, которые, по-видимому, представляют собой активные ядра галактик с узкой струей, направленной на наблюдателя, позволяют изучать процессы экстрагалактического распространения гамма-квантов. При этом, как правило, используется так называемая модель только поглощения: учитывается только уменьшение потока первичных гамма-квантов в результате взаимодействия с фотонами EBL и адиабатические потери. В этом случае для выборки спектров блазаров в области оптической толщины процесса  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$   $\tau_{\gamma\gamma} > 2$  наблюдаемая интенсивность оказывается больше ожидаемой [2]. Авторы [2] интерпретировали данную аномалию как свидетельство существования нового физического процесса осцилляций первичных гамма-квантов в аксионоподобные частицы (Axion Like Particles, ALPs) и обратно фотоны в магнитных полях по пути от источника к наблюдателю.

Если гипотеза осцилляций  $\gamma \rightarrow$  ALP верна, то в спектрах гамма-источников должна присутствовать еще одна особенность — уменьшение интенсивности наблюдаемых фотонов по сравнению со случаем модели только поглощения при более низких энергиях [3]. Недавний анализ данных эксперимента Fermi LAT, однако, не обнаружил ее [4]; вместе с другими ограничениями на параметры смешивания  $\gamma \rightarrow$  ALP это позволило исключить значительную часть области пространства этих параметров, которая могла бы объяснить аномалию при  $\tau_{\gamma\gamma} > 2$  [5]. Это делает гипотезу осцилляций  $\gamma \rightarrow$  ALP менее привлекательной и требует поиска других возможных объяснений аномалии. В настоящей работе, используя в качестве примера наблюдения блазара 1ES 0229 + 200 ( $z = 0,14$ ) черенковскими гамма-телескопами VERITAS [6] и HESS [7], мы сравниваем аппроксимации спектра в рамках различных моделей.

## 1. МОДЕЛИ БЕЗ ВКЛАДА КАСКАДНОЙ КОМПОНЕНТЫ В СПЕКТР

Измеренная гистограмма спектрального распределения энергии (Spectral Energy Distribution, SED =  $E^2 dN/dE$ ) для случая наблюдений VERITAS показана кружками с погрешностями на рис. 1, *a*. Модель наблюдаемого спектра (вариант «модели только поглощения») для случая интенсивности EBL [8] изображена сплошной кривой (для аппроксимации использовалась система анализа данных ROOT [9]). Форма первичного спектра гамма-квантов в источнике  $\sim E^{-\gamma} \exp(-E/E_c)$  здесь и далее показана штриховой кривой. В данном случае оптимальное значение параметра  $E_c$  велико ( $E_c \gg 1$  ТэВ). Аналогичная аппроксимация, но с учетом возможной трансформации спектра в результате осцилляций  $\gamma \rightarrow$  ALP, приведена на рис. 1, *b* (здесь использованы расчеты [3] для модели EBL [10] и близкого  $z = 0,116$ ). При энергии 20–30 ГэВ видна спектральная особенность, обсуждавшаяся во введении. Поскольку адиабатические потери не меняют форму спектра, мы пренебрегли этим процессом при построении рис. 1, *a*, *b*, но учитываем его в дальнейшем.

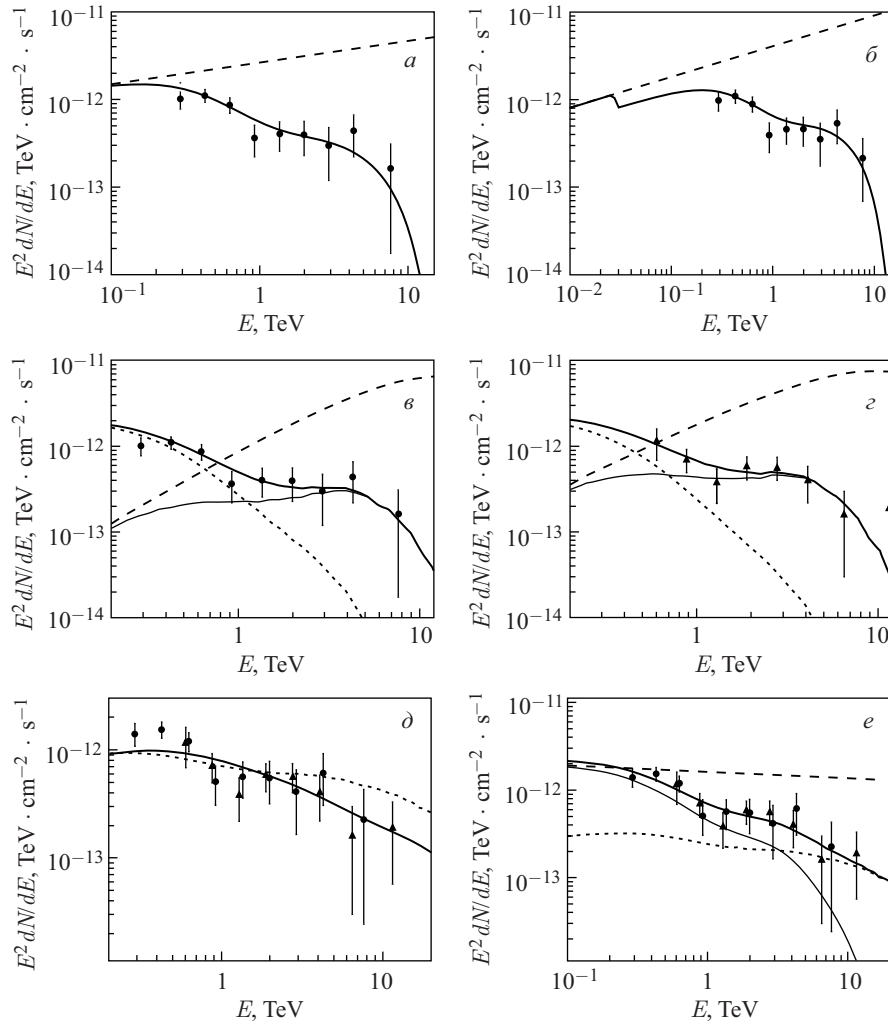


Рис. 1. Аппроксимация измеренной гистограммы SED для случая различных моделей экстрагалактического распространения гамма-квантов. *a*) «Модель только поглощения»; *б*) с учетом осцилляций  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$ ; *в*) электромагнитная каскадная модель (наблюдения VERITAS); *г*) электромагнитная каскадная модель (наблюдения HESS); *д*) базовая адронная модель; *е*) модифицированная адронная модель

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ КАСКАДНАЯ МОДЕЛЬ

Развитие электромагнитных каскадов от первичных гамма-квантов является простейшим процессом, который не выходит за рамки известной физики,

но все же обеспечивает новые эффекты по сравнению со случаем «модели только поглощения» (см. [11] и ссылки в этой работе). Для расчета спектра электромагнитных каскадов использовался код ELMAG 2.02 [12] для случая модели EBL [13]; процедура расчета и аппроксимации спектра описана в [14]. Результаты, представленные ниже, получены для случая отсутствия экстрагалактического магнитного поля; согласно существующим указаниям на наличие каскадной компоненты в спектрах блазаров это приближение справедливо при энергиях  $> 200$  ГэВ [11, 14].

Аппроксимации SED представлены на рис. 1, *в, г* для случая наблюдений VERITAS (кружки) и HESS (треугольники) соответственно. Как и на рис. 1, *а, б*, толстая сплошная кривая — полный модельный спектр. SED первичной компоненты гамма-квантов после трансформации при распространении обозначено тонкой сплошной кривой, каскадная компонента — пунктирной кривой. В отличие от «модели только поглощения» значительный вклад каскадной компоненты при энергиях  $< 1$  ТэВ обеспечивает согласие с наблюдениями в этой области энергий, несмотря на жесткий (по сравнению с рис. 1, *а*) первичный спектр.

### 3. БАЗОВАЯ И МОДИФИЦИРОВАННАЯ АДРОННАЯ МОДЕЛЬ

Существует еще один класс каскадных моделей, которые предполагают существенный вклад в наблюдаемую интенсивность вторичных фотонов, образованных первичными протонами или ядрами по пути от источника к наблюдателю [15–17] («адронные модели»). Аппроксимация спектра в случае «базовой» адронной модели [16] (в которой все наблюдаемые гамма-кванты являются вторичными) показана на рис. 1, *д*; в случае «модифицированной» модели [17], включающей и первичную компоненту гамма-квантов, — на рис. 1, *е* (оба результата для случая первичных протонов). Сплошная толстая кривая на рис. 1, *д* — расчет по коду CRProa [18], версия 3 [19] для случая первичного спектра от  $1 \text{ ЭэВ} = 10^{18} \text{ эВ}$  до  $100 \text{ ЭэВ}$  с показателем наклона падающего степенного спектра  $\gamma = 2$ . Пунктирная кривая — SED для случая первичной энергии  $30 \text{ ЭэВ}$  (в этом случае модельный спектр гамма-квантов является более пологим по сравнению с предыдущим; детали этого расчета впоследствии будут описаны в отдельной публикации). Экспериментальные данные VERITAS и HESS показаны на одном графике (кружки и треугольники соответственно); нормировка выполнена на данные HESS. На рис. 1, *е* сплошная толстая кривая — полный модельный спектр, пунктирная кривая — каскадная компонента для случая первичной энергии  $30 \text{ ЭэВ}$ , сплошная тонкая кривая — первичная компонента после трансформации (в отличие от электромагнитной каскадной модели она доминирует при сравнительно низких энергиях).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На рис. 2 для случая аппроксимаций наблюдений VERITAS показаны «коэффициенты усиления потока» (отношение модельной интенсивности к случаю «модели только поглощения» — горизонтальная линия при значении 1): для электромагнитной каскадной модели — толстой сплошной кривой 1; базовой адронной модели с первичной энергией протонов 30 ЭэВ — кружками 2; базовой адронной модели и степенного первичного спектра 1–100 ЭэВ — квадратами 3; «модифицированной адронной модели» — треугольниками 4; модели осцилляций  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$  [3] и EBL [20] — толстой штриховой кривой 5; то же, но для EBL [10] — пунктирной кривой 6. Исследование [4] поставило существенные ограничения на оптимистическую модель сильного смешивания  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$  (кривая 5), поэтому результат, обозначенный кривой 6, более реалистичен.

Все рассмотренные варианты каскадной модели дают значения коэффициента усиления потока в области  $> 3$  ТэВ, сравнимые или больше, чем экзотическая модель (пунктирная кривая). Поэтому процесс развития электромагнитных каскадов от первичных гамма-квантов или протонов может представлять собой опасный источник фона при поиске аномалий в оптически толстой области. Поскольку отличие модели с осцилляциями  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$  и каскадных моделей наиболее ярко проявляется при сравнительно низких энергиях (см. рис. 1, б и обсуждение особенностей спектра и переменности в рамках каскадных моделей в [11]), для открытия осцилляций  $\gamma \rightarrow \text{ALP}$  недостаточно экспериментов с высоким энергетическим порогом (больше 1 ТэВ); к таким поискам необходимо привлекать инструменты со сравнительно низ-

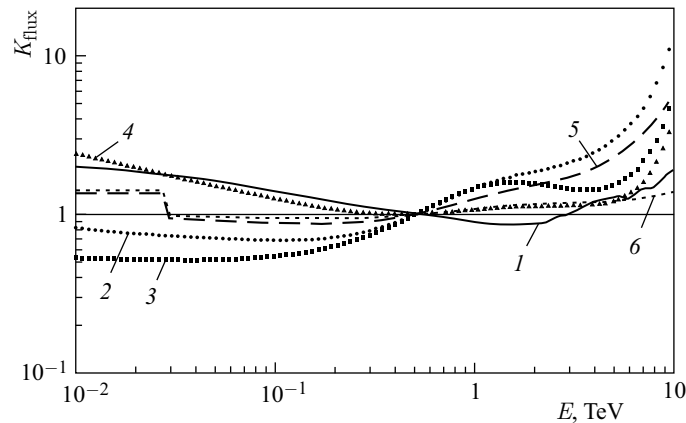


Рис. 2. Коэффициент усиления потока для различных моделей. Нормировка при энергии 500 ГэВ связана с наилучшей статистической обеспеченностью и умеренными систематическими погрешностями при этой энергии

ким порогом (100 ГэВ и ниже), такие как СТА [21]. Этот вывод важен для планирования гамма-астрономических экспериментов нового поколения.

Работа поддержана РФФИ, грант № 16-32-00823.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nikishov A. I.* // JETP. 1962. V. 14. P. 393;  
*Gould R. J., Shreder G.* // Phys. Rev. 1967. V. 155. P. 1408.
2. *Horns D., Meyer M.* // JCAP. 2012. ID 033;  
*Horns D.* astro-ph/1602.07499. 2016.
3. *Sanchez-Conde M. A. et al.* // Phys. Rev. D. 2009. V. 79. ID 123511.
4. *Ajello M. et al. (Fermi LAT)* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. ID 161101.
5. *Meyer M. et al.* // Phys. Rev. D. 2013. V. 87. ID 035027.
6. *Alui E. et al.* // Astrophys. J. 2014. V. 782. P. 13.
7. *Aharonian F. et al.* // Astron. Astrophys. 2007. V. 475. L9.
8. *Gilmore R. C. et al.* // MNRAS. 2012. V. 422. P. 3189.
9. *Brun R., Rademakers F.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 81.
10. *Primack J. R. et al.* astro-ph/0502177. 2005.
11. *Dzhatdov T. A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2015. V. 632. ID 012035
12. *Kachelriess M. et al.* // Comp. Phys. Commun. 2012. V. 183. P. 1036.
13. *Kneiske T. M., Dole H.* // Astron. Astrophys. 2010. V. 515. P. A19.
14. *Dzhatdov T. A.* // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79. P. 329.
15. *Uryson A.* // JETP. 1998. V. 86. P. 213.
16. *Essey W., Kusenko A.* // Astropart. Phys. 2010. V. 33. P. 81;  
*Essey W. et al.* // Astrophys. J. 2011. V. 731. P. 51.
17. *Essey W., Kusenko A.* // Astropart. Phys. 2014. V. 57. P. 30.
18. *Kampert K.-H. et al.* // Astropart. Phys. 2013. V. 42. P. 41.
19. *Alves Batista R. et al.* // JCAP. 2016. ID 038.
20. *Kneiske T. M. et al.* // Astron. Astrophys. 2004. V. 413. P. 807.
21. *Acharya B. S. et al. (CTA Collab.)* // Astropart. Phys. 2013. V. 43. P. 3.