

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ХАЛИКОВ ЭМИЛЬ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**КАСКАДНЫЕ МОДЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКОВ
ГАММА-КВАНТОВ ОТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ БЛАЗАРОВ**

Специальность 01.04.23 - Физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

Джатдоев Тимур Ахматович, кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты

Урысон Анна Владимировна, доктор физико-математических наук, ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, старший научный сотрудник;

Рубцов Григорий Игоревич, доктор физико-математических наук, Профессор РАН, ФГБУН Институт ядерных исследований РАН, заместитель директора по научной работе;

Птускин Владимир Соломонович, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «17» сентября 2021 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.11 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться, перейдя на страницу диссертационного совета по ссылкам:

<https://istina.msu.ru/dissertations/380172332/>

<https://www.msu.ru/science/dis-sov-msu.html>

Автореферат разослан "___" 2021 г.

Телефон совета для справок: +7 916 8717750

E-mail: galan_lidiya@mail.ru

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Л.И. Галанина

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

Из всех возможных классов активных ядер галактик наиболее яркими источниками в гамма-диапазоне являются блазары, имеющие джеты, направленные в сторону наблюдателя. Как правило, типичное спектральное распределение энергии (Spectral Energy Distribution или SED) блазаров имеет характерную двугорбую структуру. Первый пик SED, находящийся в энергетическом диапазоне от инфракрасного до рентгеновского, вызван синхротронным излучением релятивистских электронов в джете, а второй, находящийся в рентгеновском - гамма-диапазоне, - обратным комптоновским излучением электронов на фотонных полях или адронными процессами. Помимо прочих свойств блазаров, представляющих научный интерес, они также используются в качестве стандартных свечей для изучения прозрачности Вселенной по отношению к гамма-квантам. Гамма-кванты от далёких блазаров подвержены поглощению на фотонах Внегалактического Фонового Излучения (Extragalactic Background Light или EBL) посредством процесса образования пар. Это означает, что наблюдаемые SED гамма-квантов от таких источников будут более мягкими по сравнению с первичными. Первичные (или восстановленные) SED можно получить, скорректировав наблюдаемые SED с учётом вышеупомянутого поглощения гамма-квантов в Метагалактике. В данной работе рассматриваются т.н. экстремальные ТэВные блазары, то есть блазары, которые имеют пик восстановленного SED в ТэВном диапазоне. На данный момент было зарегистрировано около десяти экстремальных ТэВных блазаров [1]. Первые гамма-кванты в ТэВном диапазоне от экстремальных ТэВных блазаров зарегистрированы телескопом

Н.Е.S.S. в работе [2]. Одним из свойств, которые отличают экстремальные ТэВные блазары от остальных типов блазаров, является их медленная (как правило, месяцы-годы) и слабая (вариация амплитуды с фактором <2) переменность. Благодаря этой слабой переменности они представляют собой идеальные объекты для исследования моделей внегалактического распространения частиц.

Исследование прохождения гамма-квантов от далёких источников, таких как экстремальные ТэВные блазары, в Метагалактике является перспективной научной задачей, изучение которой может позволить уточнить структуру внегалактических магнитных (Extragalactic Magnetic Field, EGMF) и фотонных полей. Например, EGMF отклоняют заряженные частицы каскада по пути от источника к наблюдателю, что отражается на энергетическом, угловом и временном распределении наблюдаемых гамма-квантов [3,4]. Таким образом, изучение этих распределений позволяет поставить ограничения на величину и структуру EGMF. Также, на данный момент существует несколько моделей EBL, но его спектр определён неточно, в особенности, в области второго пика (средний - дальний инфракрасный диапазон). Исследование каскадных моделей может помочь поставить ограничения на спектры EBL. Помимо этого, исследование каскадных моделей позволяет поставить ограничения на параметры таких экзотических процессов, как, например, процессы с нарушением Лоренц-инвариантности.

Авторы [5] получили восстановленные SED различных блазаров (в том числе экстремальных ТэВных блазаров) и обнаружили что для нескольких источников наблюдается аномальный избыток числа гамма-квантов в оптически толстой области спектра (при энергиях порядка единиц ТэВ). Авторы [6] также провели исследование этой аномалии и установили её существование со значимостью 2 стандартных отклонения. Одна из

перспективных моделей распространения гамма-квантов в Метагалактике, способных объяснить данную особенность восстановленных спектров блазаров, - это модель т.н. аксионоподобных частиц (Axion-Like Particles, ALP). ALP представляют собой псевдоскалярные бозоны с предельно низкими массами, способные осциллировать в фотоны и обратно наподобие процесса осцилляций нейтрино. По пути от источника к наблюдателю гамма-кванты очень высоких энергий от блазаров могут переходить в ALP в магнитных полях, проходить значительное расстояние как ALP, таким образом минуя поглощение на фотонах EBL, а затем переходить обратно в гамма-кванты вблизи к наблюдателю.

Открытие аксионоподобных частиц путём поиска осцилляций гамма-квантов в ALP и обратно потребует тщательной оценки и учёта астрофизического фона для этого процесса и, затем, подавления этого фона. Каскадные гамма-кванты от первичных протонов представляют наиболее опасный источник фона для процесса осцилляций гамма-ALP [7]. Поэтому, исследование главных характеристик каскадных моделей, а также получение энергетических спектров и угловых размеров блазаров в рамках этих моделей и сравнение их со спектрами в моделях ALP позволяет потенциально уменьшить фон для поиска осцилляций гамма-ALP в оптически толстой части спектров блазаров.

Цель и задачи исследования

Целью данной диссертационной работы являлось изучение возможностей интерпретации наблюдений экстремальных ТэВных блазаров в рамках двух вариаций внегалактических каскадных моделей

(электромагнитной и адронной) и разных вариаций внегалактического магнитного поля (включая современные астрофизические модели).

В работе решены следующие задачи:

1. Разработана методика расчёта характеристик потоков наблюдаемых гамма-квантов от внегалактических источников космических лучей предельно высоких энергий, учитывающая внегалактические каскады.

2. Реализован оригинальный код, соединяющий моделирование потерь первичных частиц при взаимодействии с фотонными полям, их отклонений внегалактическим магнитным полем, а также каскадных процессов.

3. С помощью полученного кода проведены расчёты наблюдаемых спектров гамма-квантов и угловых размеров гамма-излучения экстремальных ТэВных блазаров и сопоставлены с данными наблюдений и основными характеристиками (дифференциальными чувствительностями и угловыми разрешениями) существующих и проектируемых гамма-телескопов.

Объект и предмет исследования

Объектом данного исследования являются экстремальные ТэВные блазары, то есть активные ядра галактик, у которых джет направлен преимущественно по направлению к наблюдателю и которые имеют пик восстановленного SED в ТэВном диапазоне. Конкретные источники, рассматриваемые в данной работе, имеют красные смещения $0.14 < z < 0.29$. Предмет данного исследования - это наблюдаемые угловые и энергетические распределения гамма-квантов от данных источников в рамках

внегалактических каскадных моделей.

Методология исследования

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены с помощью методов математического моделирования. Были использованы как открытые программные коды CRPropa3 [8], ELMAG 2.03 [9], так и разработанный автором оригинальный гибридный код, соединяющий расчёты на основе аналитических уравнений, используемые для распространения первичных протонов и расчёта их потерь на фотонных полях, с численным моделированием отклонения этих протонов во внегалактическом магнитном поле и численным моделированием наблюдаемых спектров от каскадов, инициированных вторичными частицами.

Научная новизна

Предложена гибридная методика, объединяющая моделирование взаимодействий первичных частиц с фотонными полями при их распространении в межгалактической среде и расчёт промежуточных каскадных спектров от вторичных частиц этих взаимодействий в предположении слабой универсальности (спектр каскада не зависит от энергии и типа инициирующей каскад частицы, но зависит от величины красного смещения точки начала каскада). Для модифицированной адронной модели данная методика также включает моделирование отклонения протонов во внегалактическом магнитном поле, описываемом современными моделями.

Разработан оригинальный программный код, основанный на данной гибридной методике и использовавшийся для расчёта наблюдаемых спектров

гамма-квантов и угловых размеров гамма-излучения от экстремальных ТэВных блазаров в рамках адронной каскадной модели.

В рамках электромагнитной каскадной модели впервые проведено фитирование наблюдаемых энергетических спектров модельными зависимостями для большой выборки экстремальных ТэВных блазаров, и детально описаны их основные особенности в рамках этой модели.

Впервые рассчитаны наблюдаемые энергетические спектры и зависимости от энергии квантилей наблюдаемого углового размера внегалактических источников протонов предельно высоких энергий (более конкретно, экстремальных ТэВных блазаров 1ES1101-232, 1ES0229+200 и 1ES0414+009) с учётом отклонения первичных протонов во внегалактическом магнитном поле (модифицированная адронная каскадная модель), описываемом современными астрофизическими моделями, соответствующими крупномасштабной структуре распределения материи во Вселенной (более конкретно, моделями [10] и [11]).

Положения, выносимые на защиту

1. Наблюдаемый спектр гамма-квантов от экстремальных ТэВных блазаров в рамках модифицированной адронной каскадной модели имеет подавление при высоких энергиях.

2. Экстремальные ТэВные блазары могут быть зарегистрированы как протяжённые (а не точечные) источники действующими и проектируемыми гамма-телескопами.

3. Межгалактические каскады от протонов предельно высоких энергий не могут значительно повышать эффективную прозрачность Вселенной для гамма-квантов очень высоких энергий, в случае если

отклонение этих протонов в скоплениях галактик и во внегалактических филаментах настолько сильное, как предсказывается моделью [10] (или сильнее, чем предсказывается этой моделью).

Теоретическая и практическая значимость

Процесс развития внегалактических электромагнитных каскадов от первичных протонов или гамма-квантов приводит к образованию вторичных (каскадных) гамма-квантов, которые наблюдаются гамма-телескопами и могут иметь достаточно высокие энергии (вплоть до нескольких ТэВ). Эти гамма-кванты представляют собой фон, маскирующий процессы осцилляций гамма-квантов в аксионоподобные частицы. Поэтому, исследование и подавление этого фона поможет упростить поиски процесса осцилляций аксионоподобных частиц в гамма-кванты.

Полученные в данной работе энергетические спектры и зависимости квантилей наблюдаемого углового размера источников от энергии могут использоваться для сравнения с будущими данными наблюдений этих источников гамма-телескопами следующего поколения, таких как СТА и LHAASO.

Гибридная методика, которая была разработана в данной диссертационной работе, может быть использована для будущих исследований внегалактического распространения высокоэнергичных гамма-квантов и космических лучей предельно высоких энергий.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов, полученных с помощью предлагаемой в

данной работе гибридной методики (в предположении слабой универсальности, означающей, что наблюдаемые спектры каскада не зависят от энергии и типа частицы, инициирующей каскад) обеспечивается сравнением с результатами, полученными с помощью другой гибридной методики, предполагающей моделирование распространения этих частиц без допущения слабой универсальности. Формы модельных спектров, полученных соискателем для базовой адронной модели, находятся в соответствии с формой модельных спектров, полученных другими авторами (в частности, [12], [13] и [14]). Результаты, полученные с помощью отдельных частей кода, использующих аналитические и модельные расчёты, сравнивались с результатами авторов этих расчётов ([15], [16], [17], [10], [18]).

Апробация результатов

Результаты работы докладывались на следующих международных конференциях:

19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions, 2016, Москва, Россия;

25 European Cosmic Ray Symposium, 2016, Турин, Италия;

The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, 2016, Москва, Россия;

35th International Cosmic Ray Conference, 2017, Бусан, Южная Корея;

Half a Century of Blazars and Beyond, 2018, Турин, Италия;

26th Extended European Cosmic Ray Symposium and 35th Russian Cosmic Ray Conference, 2018, Барнаул, Россия;

QUARKS-2018 20th International Seminar on High Energy Physics, 2018, Валдай, Россия;

The 2019 TeV Particle Astrophysics conference (TeVPA 2019), 2019, Сидней, Австралия;

The extreme Universe viewed in very-high-energy gamma rays 2020, онлайн конференция.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 7 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и SCOPUS:

1. Khalikov E., Dzhatdov T. Observable spectral and angular distributions of gamma-rays from extragalactic ultrahigh energy cosmic ray accelerators: the case of extreme tev blazars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505(2):1940–1953, 2021. Impact Factor: 5.287 [DOI: 10.1093/mnras/stab1393];

2. Emil Khalikov. Modeling gamma-ray seds and angular extensions of extreme tev blazars from intergalactic proton-initiated cascades in contemporary astrophysical egmf models. UNIVERSE, 7(7):220, 2021. Impact Factor: 2.278 [DOI: 10.3390/universe7070220]

3. T. A. Dzhatdov, E. V. Khalikov, A. P. Kircheva, and A. A. Lyukshin. Electromagnetic cascade masquerade: a way to mimic gamma-axion-like particle mixing effects in blazar spectra. Astronomy and Astrophysics, 603(59):1–24, 2017. Impact Factor: 5.802 [DOI: 10.1051/0004-6361/201629660];

4. Т. А. Джатдоев, Э. В. Халиков, А. П. Кирчева и А. А. Люкшин. Особенности спектров блазаров в рамках электромагнитной и адронной моделей межгалактического каскада. Известия Российской академии наук.

Серия физическая, 81(4):157-162, 2017. Импакт фактор (SJР): 0.226 [DOI: 10.3103/S1062873817040165];

5. С. А. Баклагин, Т. А. Джатдоев, А. П. Кирчева, А. А. Люкшин и Э. В. Халиков. Каскады от первичных гамма-квантов и ядер - источник фона для поиска осцилляций фотонов в аксионоподобные частицы. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 49(1):157–162, 2018. Импакт фактор (SJР): 0.242 [DOI: 10.1134/S1063779618010045];

6. Timur Dzhatdоеv, Emil Khalikov, Egor Podlesnyi, and Anastasia Telegina. Intergalactic gamma-ray propagation: basic ideas, processes, and constraints. Journal of Physics: Conference Series, 1181(1):1–6, 2019. Impact Factor (SJР): 0.210 [DOI: 10.1088/1742-6596/1181/1/012049];

7. Т. А. Dzhatdоеv, E. V. Khalikov, A. P. Kircheva, and A. A. Lyukshin. Testing models of extragalactic gamma-ray propagation using observations of extreme blazars in gev and tev energy ranges. Journal of Physics: Conference Series, 798:1–5, 2017. Impact Factor (SJР): 0.210 [DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012002].

Другие публикации автора:

1. Timur Dzhatdоеv, Emil Khalikov, Anna Kircheva, Egor Podlesnyi, and Anastasia Telegina. Intergalactic electromagnetic cascades in the magnetized universe as a tool of astroparticle physics. EPJ Web of Conferences, 191(08009):1–8, 2018. [DOI 10.1051/epjconf/201819108009];

2. Timur Dzhatdоеv, Emil Khalikov, Anna Kircheva, and Alexander Lyukshin. The vhe anomaly in blazar spectra and related phenomena. EPJ Web of Conferences, 145(17002):1–6, 2017. [DOI: 10.1051/epjconf/201614517002];

3. Dzhatdоеv Timur, Khalikov Emil, and Kircheva Anna. Extragalactic

γ -ray propagation: beyond the absorption-only model. Proceedings of Science, 301(866):1–8, 2017;

4. Dzhatdov Timur and Khalikov Emil. An excess of extreme tev blazars from the fermi lat distribution on the voidiness parameter. Proceedings of Science, 301(863):1–8, 2017.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 152 страницы с 46 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 291 наименование.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В **первой главе** описаны важнейшие прошлые, действующие и проектируемые эксперименты, регистрирующие внегалактические гамма-кванты высоких и очень высоких энергий, а также основные источники внегалактического гамма-излучения.

Основные инструменты, регистрирующие внегалактическое гамма-излучение, делятся на три типа: орбитальные гамма-телескопы, атмосферные черенковские телескопы и гибридные детекторы / детекторы частиц. В первом и втором разделах первой главы описаны методы регистрации гамма-квантов высоких и очень высоких энергий, реализованные в телескопах этих трёх типов, а также приведён обзор всех основных гамма-телескопов, их характеристик, научных задач и главных результатов.

Третий раздел первой главы посвящён краткому описанию основных источников внегалактического гамма-излучения. Особое внимание в этом разделе уделяется описанию свойств блазаров и, в особенности, экстремальных ТэВных блазаров, представляющих наибольший интерес для данной работы.

Во **второй главе** обсуждаются внегалактические фотонные поля (раздел 1), внегалактическое магнитное поле (раздел 2), а также основные модели распространения гамма-квантов в Метагалактике (раздел 3).

Наиболее интенсивным внегалактическим фотонным полем можно считать космическое микроволновое фоновое излучение (СМВ) или реликтовое излучение, возникшее в эпоху рекомбинации. СМВ изотропно, однородно с довольно большой точностью, заполняет всё пространство Вселенной и имеет тепловой спектр с характерной температурой 2.725 К и плотностью энергии 0.25 эВ/см^3 .

Внегалактическое фоновое излучение (EBL) - это свет, излученный звёздами и активными ядрами галактик и переизлучённый или перерассеянный частицами космической пыли за всё время существования Вселенной. Основная его часть расположена в диапазоне длин волн от 0.1 до 1000 мкм, а характерная плотность энергии составляет примерно 10% от плотности энергии СМВ. Помимо СМВ и EBL Вселенную также заполняет диффузный радио фон.

Современные модели космических магнитных полей, которые носят общее название "Внегалактическое магнитное поле" или EGMF, предполагают, что они сильно коррелируют с неоднородностями крупномасштабной структуры Вселенной (Large Scale Structure, LSS). Магнитные поля в скоплениях галактик известны хорошо и имеют напряжённости от 1 до 10 мкГс. В филаментах EGMF было зарегистрировано

благодаря синхротронному излучению [19] и имеет напряжённость 500-600 нГс. В войдах EGMF известно хуже всего, но при этом на него ставятся ограничения сверху ($B < 10^{-9}$ Гс) и снизу ($B > 10^{-21} - 10^{-17}$ Гс).

Стандартные механизмы образования магнитного поля в звёздах, галактиках и скоплениях галактик основываются на идее усиления более слабого начального ("затравочного") магнитного поля путём механизма динамо или при гравитационном коллапсе, сопровождающем образование объекта. Само же затравочное поле могло быть создано или усилено или в ранней Вселенной (в эпоху инфляции, фазовых переходов или бариогенеза), или в процессе гравитационного коллапса во время формирования LSS.

Для моделирования внегалактического магнитного поля в данной работе были выбраны две модели EGMF: Долага 2005 [10] и Хакштейна 2018 [11]. В работе [11] рассматривается шесть моделей EGMF: три первичных модели (т.е. модели, в которых затравочное магнитное поле появляется в ранней Вселенной) и три астрофизических модели (в которых магнитное поле появляется или заметно усиливается в эпоху образования LSS). Недавняя работа [18] показала, что модели *astrophysical R* и *astrophysical 1R* демонстрируют практически одинаковую зависимость среднего угла отклонения первичных КЛ от их жёсткости (энергии, поделённой на зарядовое число). Поэтому, из трёх астрофизических моделей из [11] в данной работе были рассмотрены две.

Классической моделью распространения гамма-квантов в Метагалактике считается т.н. модель только поглощения, которая учитывает поглощение гамма-квантов высоких и очень высоких энергий на фотонных полях EBL и CMB, а также адиабатические потери. Однако, существуют многочисленные указания на её неполноту. Одно из наиболее значительных было описано в работе [5]. Авторы этой работы использовали наблюдаемые

спектры ряда блазаров, зарегистрированных черенковскими детекторами, чтобы построить спектры этих блазаров за вычетом эффектов поглощения (такие спектры должны быть близки к их первичным спектрам). Полученный ими результат показал, что наблюдаемая интенсивность событий в области с оптической толщиной > 2 оказывается больше ожидаемой. Существуют и другие аномалии (например, [6]), статистическая значимость каждой из которых не является достаточно большой, чтобы доказать неприменимость модели только поглощения, но вместе они указывают на её неполноту и необходимость её модификации.

В качестве альтернативной модели распространения гамма-квантов авторы аномалии на высоких энергиях [5] предложили модель аксионоподобных частиц (ALP). Действительно, высокоэнергичные фотоны, осциллирующие в ALP около источника и распространяющиеся в таком виде большую часть пути, минуют поглощение на EBL, и могут осциллировать обратно в фотоны уже рядом с наблюдателем, тем самым объясняя завышенную долю гамма-квантов в оптически плотной части спектра.

Существует другая группа моделей внегалактического распространения гамма-квантов, которая способна объяснить аномальную жёсткость спектров блазаров. В этих моделях, именуемых каскадными моделями, предполагается, что часть наблюдаемого спектра блазаров вызвана гамма-квантами, образованными не внутри источника, а в процессе развития ЭМ каскада в Метагалактике. Межгалактические каскадные модели делятся на два вида в зависимости от типа первичной частицы: электромагнитные каскадные модели (ЕСМ), где первичные частицы - гамма-кванты, и адронные каскадные модели (НСМ), где первичные частицы - протоны и ядра. Именно эти модели используются в данной диссертационной работе.

В третьей главе описана процедура расчета наблюдаемых спектров потоков гамма-квантов от экстремальных ТэВных блазаров в рамках электромагнитной каскадной модели и результаты соответствующих расчетов.

Электромагнитная каскадная модель предполагает что:

1. Часть наблюдаемых гамма-квантов образуется не внутри источника, а в результате развития ЭМ каскадов в Метагалактике.

2. Первичные частицы – гамма-кванты очень высоких энергий; они образуют вторичные (каскадные) электроны и γ -кванты в процессах образования пар на EBL и CMB и обратного комптоновского рассеяния вторичных электронов.

3. Каскадные электроны отклоняются EGMF, поэтому каскадные гамма-кванты приходят с задержкой.

Форма наблюдаемого спектра электромагнитного каскада (согласно [12]) зависит исключительно от начальной энергии первичного гамма-кванта E_s . Поэтому, такой режим развития каскада называется режимом сильной универсальности, а этот спектр носит название универсального спектра. В более реалистичных астрофизических сценариях, учитывающих расширение Вселенной, каскадный спектр будет также зависеть от красного смещения источника z_s . Такой режим развития каскада называется режимом слабой универсальности.

В работе [20] диссертантом и соавторами под руководством Тимура Джатдоева были построены аппроксимации спектров ряда экстремальных ТэВных блазаров в рамках ЕСМ [21]. Первичный спектр гамма-квантов был выбран в соответствии с формулой $dN/dE_0 \propto E_0^{-\gamma} \exp(-E_0/E_{0c})$, где E_{0c} – порог по энергии.

Для того, чтобы уметь разделять наблюдаемые гамма-кванты от источника и гамма-кванты, образованные во внегалактических каскадах, был модифицирован выходной файл программного кода ELMAG, моделирующего распространение гамма-квантов высоких и очень высоких энергий с учётом каскадных процессов. Этот код был использован для того, чтобы рассчитать базу каскадных спектров на каждом шаге по величине красного смещения dz от гамма-квантов с первичными энергиями, распределёнными равномерно в диапазоне от 100 ГэВ до 100 ТэВ. Поскольку в режиме слабой универсальности наблюдаемый спектр каскадных гамма-квантов зависит только от красного смещения, такая база применима для расчёта наблюдаемых спектров от экстремальных ТэВных блазаров.

Итоговый наблюдаемый спектр, таким образом, будет состоять из двух компонентов: первичного компонента от первичных гамма-квантов, не поглощённых на фотонах EBL и дошедших от источника к наблюдателю, и вторичного каскадного компонента.

На рисунке 1 представлено SED блазара 1ES 0347-121, который наблюдался атмосферным черенковским телескопом H.E.S.S. [22], и его фитирование в рамках ЕСМ. Виден как первичный компонент (обозначенный чёрной кривой), так и каскадный (обозначенный зелёной кривой). При этом, каскадный компонент, доминирующий на низких энергиях, обеспечивает хорошее согласие фитирования на этих энергиях и "маскирует" более жёсткий первичный компонент в оптически тонкой части спектра. В то же время на высоких энергиях (где оптическая толщина больше 2) жёсткий первичный спектр обеспечивает достаточное число фотонов, чтобы объяснить аномалию [5]. Этот эффект маскировки не обсуждался ранее в литературе и представляет оригинальный результат.

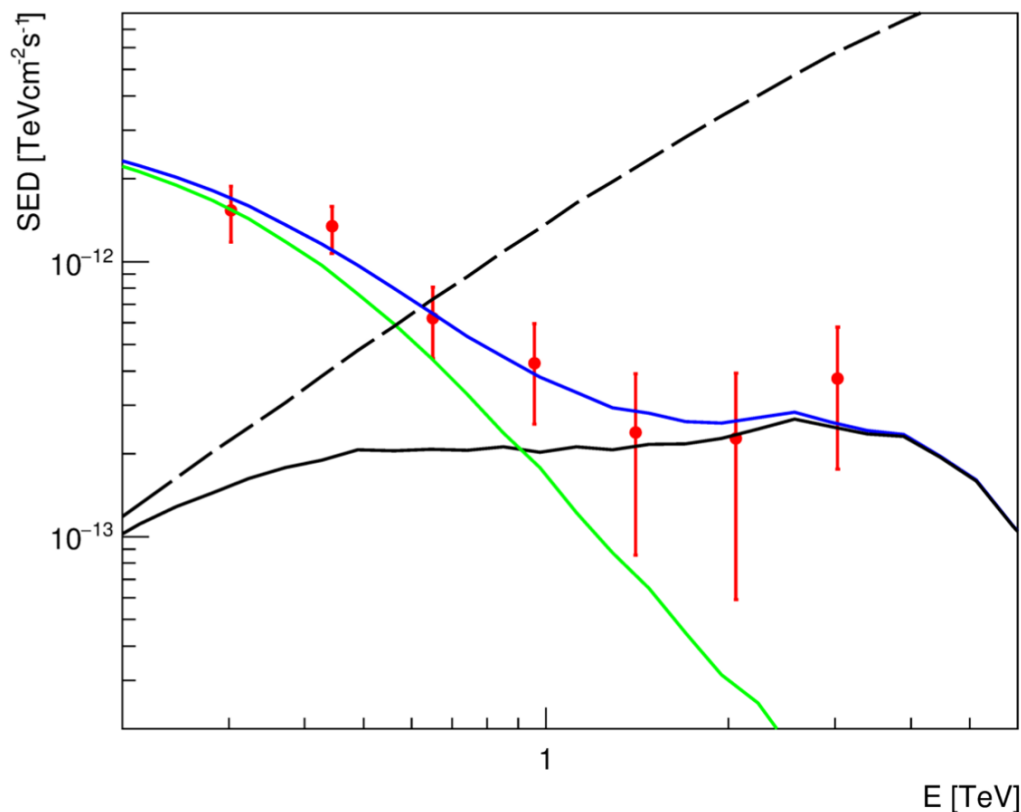


Рисунок 1. Спектральное распределение энергии (SED) наблюдаемых гамма-квантов от блазара 1ES 0347-121 при нулевом магнитном поле. Чёрная пунктирная кривая обозначает первичный спектр, чёрная сплошная – первичный компонент наблюдаемого спектра, зелёная – каскадный компонент, синяя – суммарное SED, красные точки – данные наблюдений H.E.S.S.

В четвёртой главе описана процедура расчета наблюдаемых спектров потоков гамма-квантов от экстремальных ТэВных блазаров и их угловых размеров в рамках адронных каскадных моделей и результаты соответствующих расчетов.

В адронных каскадных моделях предполагается, что:

1. Часть наблюдаемых гамма-квантов образуется не внутри источника, а в результате развития ЭМ каскадов в Метагалактике;
2. Первичные частицы – космические лучи предельно высоких энергий; они образуют вторичные электроны и γ -кванты в процессах образования пар в поле ядра и фотоадронных процессах на CMB и EBL, затем развивается каскад;

3. Первичные протоны проходят бóльшие расстояния, чем первичные гамма-кванты, и продолжают инициировать каскады даже вблизи наблюдателя.

Каскадные модели, рассмотренные в данной работе, делятся на три типа:

- Базовая НСМ: первичные частицы – только протоны, магнитное поле не учитывается,
- Смешанная НСМ: первичные частицы – протоны и гамма-кванты, магнитное поле не учитывается,
- Модифицированная НСМ: первичные частицы – только протоны, магнитное поле учитывается (или как поле скопления галактик, полностью рассеивающее поток первичных протонов, или с помощью современных моделей EGMF с учётом отклонения протонов).

В данной работе учитываются только первичные протоны, хотя все эти модели справедливы и для первичных ядер.

Для моделирования характеристик потоков наблюдаемых гамма-квантов в рамках адронных каскадных моделей был разработан код, основанный на гибридном подходе. Первым шагом этого подхода является моделирование распространения первичных протонов от источника с красным смещением z_s к наблюдателю с красным смещением $z = 0$ с шагом $dz = 10^{-5}$. На каждом шаге рассчитывались средние энергетические потери протонов на фотонных полях в соответствии с аналитическими формулами из [15], и обновлялось значение энергии протонов. Для базовой адронной модели учитывались только потери протонов на СМВ (как за счёт фотопионных процессов, так и за счёт образования пар в поле протона), для модифицированной также учитывались фотопионные потери протонов на EBL.

Вторым шагом был расчёт спектров частиц, образованных при взаимодействиях первичных протонов с фотонами СМВ. Для этих расчётов

были использованы формулы, представленные в [16]. С их помощью были рассчитаны спектры различных вторичных частиц (γ , e^+ , ν_e , ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$), которые затем сравнивались с результатами из [16] для проверки.

Третьим шагом был расчёт спектров наблюдаемых (каскадных) гамма-квантов. Поскольку большая часть вторичных фотонов и электронов имеют энергии больше 100 ТэВ, то применимо предположение об универсальности каскада. В таком случае наблюдаемый спектр практически не зависит от энергии и типа первичной частицы. Такой подход был использован для упрощения и ускорения расчёта наблюдаемых спектров. С помощью кода ELMAG 2.02 и модели EBL [23] был рассчитан массив наблюдаемых спектров от первичных гамма-квантов с фиксированной энергией 1 ПэВ для разных величин красного смещения z , распределённых случайным образом равномерно в диапазоне от 0 до 0.3.

Суммарный наблюдаемый спектр гамма-квантов был рассчитан как интеграл каскадных спектров по величине красного смещения, умноженный на величину полных потерь и на часть "активных" потерь (потерь за счёт рождения пар и фотопионных процессов), передаваемую вторичным частицам.

Получившееся SED наблюдаемых гамма-квантов от первичных протонов с энергией $E_{p0} = 30$ ЭэВ в базовой адронной модели показано на рисунке 2. По сравнению с электромагнитной моделью, для адронной модели наблюдаемый спектр гораздо более пологий в области энергий $E > 200$ ГэВ.

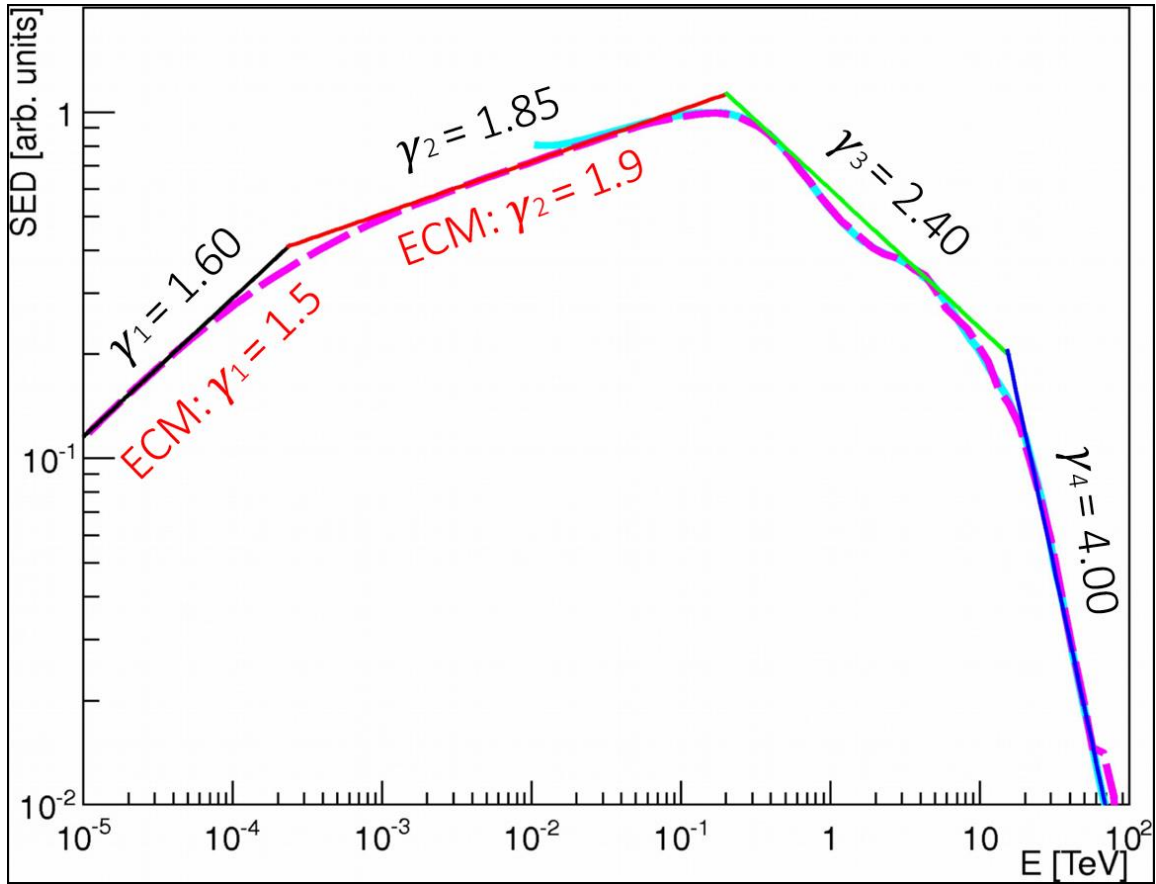


Рисунок 2. SED наблюдаемых гамма-квантов в базовой адронной модели. Штриховая пунктирная линия обозначает SED, посчитанный с порогом по энергии $E_{thr} = 10$ МэВ, голубая - SED с порогом 10 ГэВ. Чёрная, красная, зелёная и синяя линии представляют собой аппроксимации разных участков спектра степенной функцией. Чёрные подписи обозначают параметры наклона степенного спектра в базовой адронной модели, красные – в электромагнитной каскадной модели [12].

Помимо базовой адронной модели были исследованы также смешанная адронная каскадная модель и модифицированная адронная модель со скоплением галактик. Для реализации смешанной модели была проведена оптимизация четырёх параметров: нормировки первичного компонента от гамма-квантов и каскадного компонента, а также параметров первичного спектра гамма-квантов: степенного показателя спектра γ и пороговой энергии E_{0c} в формуле $dN/dE_0 \propto E_0^{-\gamma} \exp(-E_0/E_{0c})$. В модифицированной каскадной модели предполагалось, что на своём пути протоны встречают скопление галактик, магнитное поле которого полностью рассеивает протоны. Расстояние (в единицах красного смещения) от источника до такого скопления

было принято как отдельный параметр расчётов и обозначено как z_c . Результаты – наблюдаемые спектры потоков гамма-квантов от блазара 1ES 0347-121 в рамках этих моделей – представлены на рис. 3. На левом рисунке представлено SED в рамках смешанной модели и разные компоненты спектра. На правом рисунке представлены SED для случаев нулевого магнитного поля, магнитного поля скопления галактик, находящегося на разных расстояниях от источника, а также фитирование для случая степенного спектра первичных протонов с энергиями $dN_{p0}/dE_{p0} \propto E_{p0}^{-2}$ от 1 до 100 ЭэВ.

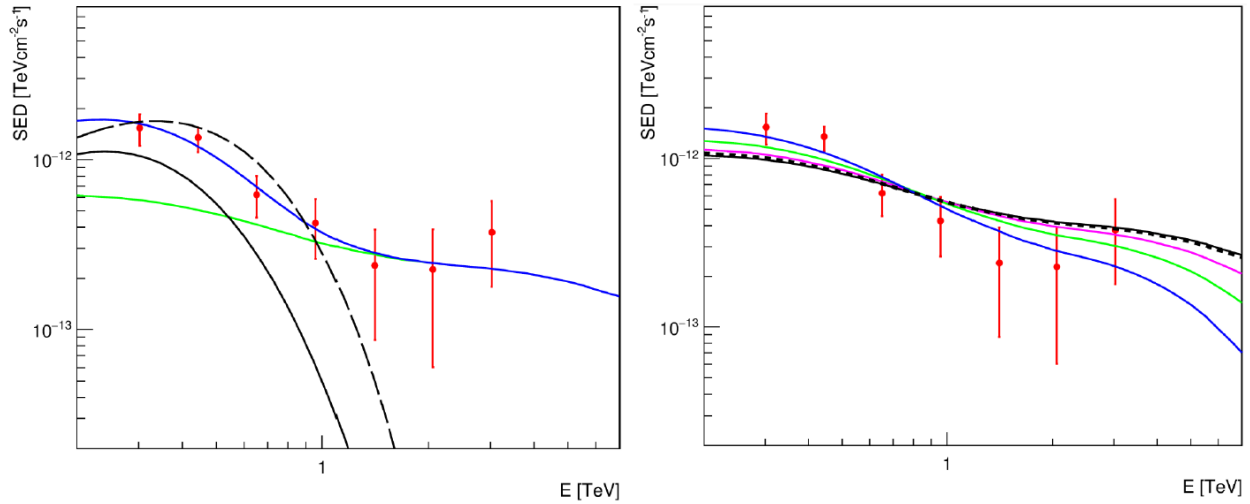


Рисунок 3. Спектры блазара 1ES 0347-121 в рамках смешанной (слева) и модифицированной (со скоплением галактик, справа) адронных каскадных моделей. Красные точки обозначают экспериментальные данные, полученные гамма-телескопом H.E.S.S. [22]. На левом рисунке синяя сплошная кривая обозначает наблюдаемый спектр, чёрная пунктирная - первичный спектр гамма-квантов, чёрная сплошная - первичный компонент, зелёная сплошная - каскадный компонент. На правом рисунке сплошной чёрной кривой обозначено фитирование для моноэнергичной первичной энергии протонов $E_{p0} = 30$ ЭэВ и значения $z_c = 0$, пурпурного - $z_c = 0.02$, зелёного - $z_c = 0.05$, синего - $z_c = 0.10$; пунктирной кривой обозначено фитирование для степенного первичного спектра протонов с энергиями от 1 до 100 ЭэВ и значения $z_c = 0$.

Результат расчёта для модифицированной каскадной модели сравнивался с результатом, полученным без предположения универсальности каскада. Наблюдаемые спектры с использованием обеих методик показали отличное согласие.

Целью дальнейшей работы являлось исследование влияния отклонения протонов в сильно неоднородном EGMF, описываемом современными

астрофизическими моделями, на наблюдаемые спектральные и угловые распределения гамма-квантов. Для этого можно рассмотреть следующую схему внегалактического распространения первичных протонов: протон от источника встречает филаменты EGMF, отклоняется на них и непрерывно создаёт каскады. Предполагается, что каскадные гамма-кванты сохраняют направление родительского протона и, не отклоняясь на EGMF, доходят до нас. Для такой схемы диссертантом были сделаны оценки величины отклонения протонов на одном, двух и произвольном числе филаментов. На рис. 4 представлены значения наблюдаемого угла (то есть угла между линией источник-наблюдатель и направлением налетающего каскадного гамма-кванта) для разного числа филаментов.

$L_V/L_{V_2}/L$	50 Мпк	100 Мпк	200 Мпк	500 Мпк
один филамент	0.064	0.13	0.25	0.64
два филамента	0.073	0.16	0.37	2.1
n филаментов	0.016	0.045	0.13	0.51

Рисунок 4. Оценки величины наблюдаемого угла (в градусах) для моделей EGMF с разным числом филаментов.

На основе свойств внегалактических каскадов можно сделать вывод, что наблюдаемый спектр становится более жёстким, когда каскады инициированы вблизи наблюдателя. Однако, эта же часть спектра будет иметь уширенный угловой размер, т.к. каскады инициируются протонами, уже сильно отклонёнными EGMF. Это должно приводить к эффективному высокоэнергичному обрезанию или подавлению наблюдаемого спектра при высоких энергиях внутри функции рассеяния точки наблюдающего инструмента.

Для того, чтобы проверить эти предположения, диссертантом был расширен гибридный код, чтобы включать также рассчитанные с помощью

открытого программного кода CRPropa3 [8] отклонения протонов в разных моделях внегалактического магнитного поля, моделирующих крупномасштабную структуру Вселенной.

Для модели EGMF [10] и первичных протонов с энергиями 30 ЭэВ были рассчитаны SED, для которых наблюдаемый угол удовлетворял условию $\theta < 0.1$ градуса (типичная величина PSF атмосферных черенковских телескопов (АЧТ)). На рис. 5 такой SED для блазара 1ES1101-232 и модели EBL [25] показан синей кривой в сравнении с интегральным SED, для которого не накладывались никакие условия для наблюдаемого угла (чёрная кривая), а также с универсальным спектром источника в рамках ECM (красная кривая). Так, предсказания про высокоэнергичное обрезание, предложенные ранее, подтверждаются представленным здесь результатом, поскольку наблюдаемое SED в рамках модифицированной HCM внутри PSF испытывает настолько сильную просадку в области ТэВных энергий по сравнению с интегральным SED, что его форма проходит гораздо ближе к универсальному спектру ECM, чем к спектру базовой адронной модели.

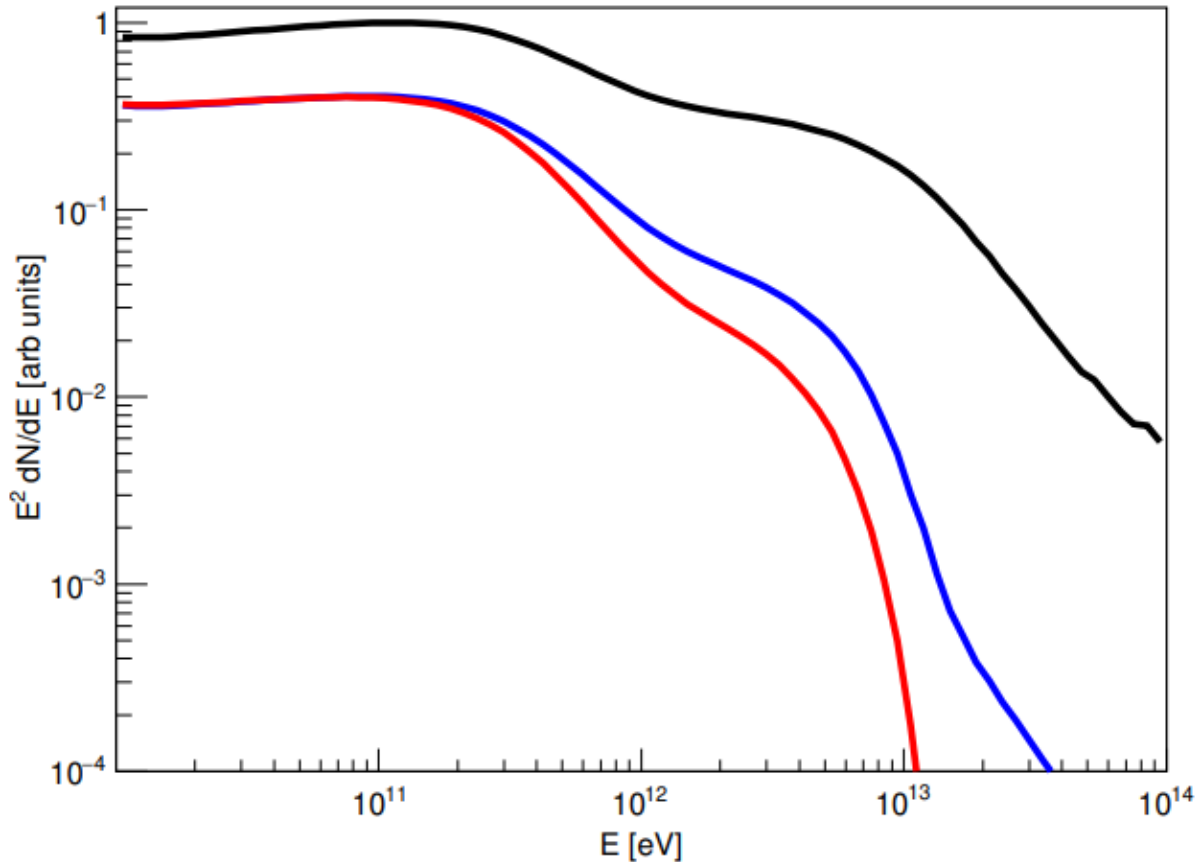


Рисунок 5. Наблюдаемые SED в рамках внегалактических каскадных моделей для источника 1ES 1101-232 с $z = 0.186$ и модели EBL [25]. Чёрная кривая обозначает SED в рамках базовой адронной каскадной модели, синяя кривая - SED в рамках модифицированной адронной каскадной модели, красная кривая - SED в рамках электромагнитной каскадной модели (универсальный режим).

Диссертантом также была построена зависимость углового размера источника от энергии (точнее, угла, в пределах которого можно зарегистрировать 68% наблюдаемых гамма-квантов от источника). На рис. 6 эта зависимость показана красной пунктирной кривой вместе с угловыми разрешениями нескольких действующих (HESS, MAGIC и Fermi-LAT) и проектируемых (CTA и MAST) гамма-телескопов. Данные для Fermi-LAT были взяты из [26], для H.E.S.S., MAGIC и CTA – из [27], для MAST - из [28]. Как видно из графика, модельный угловой размер источника проходит выше порогов углового разрешения этих инструментов, что значит, что для этого

источника эти инструменты будут видеть не точечный спектр, а скорее спектр протяжённого источника.

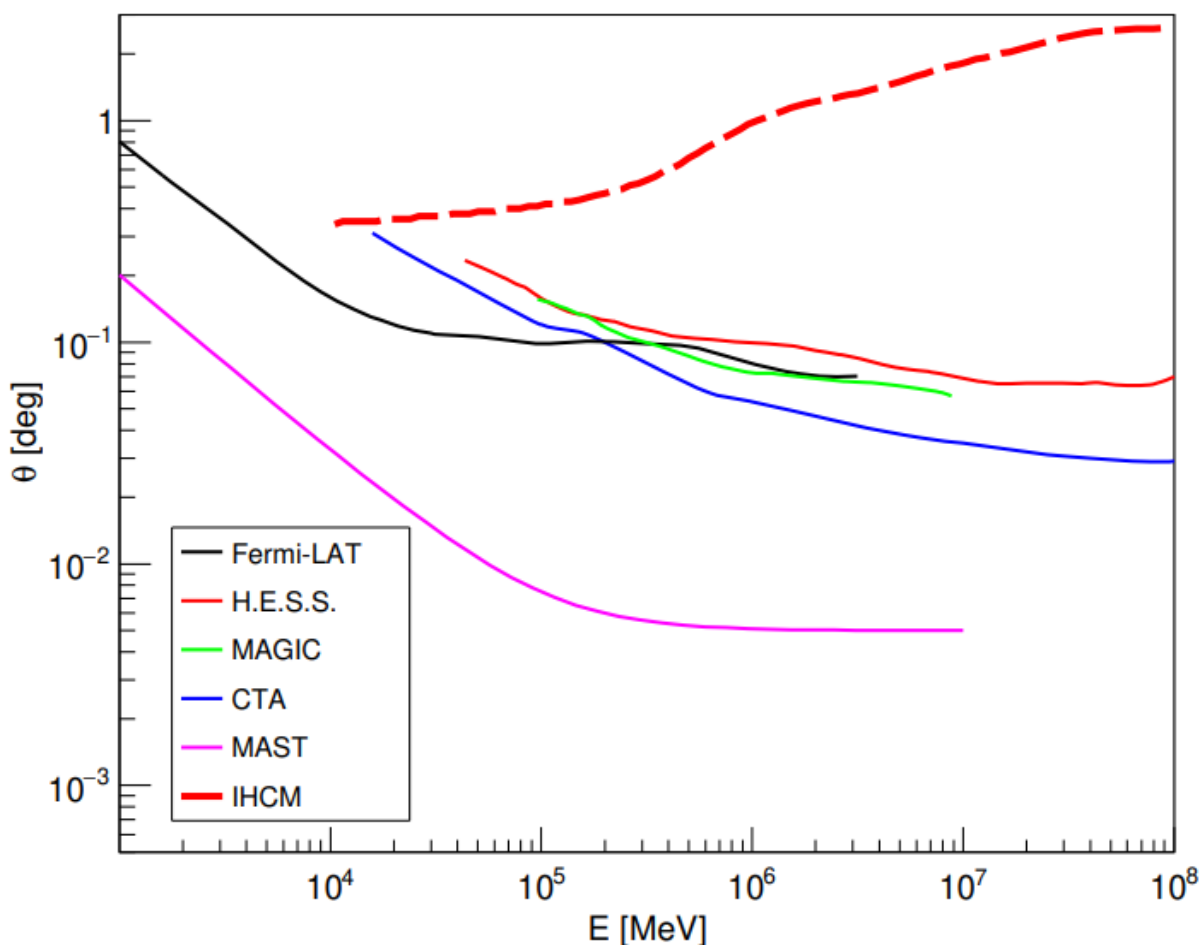


Рисунок 6. Угловое разрешение (угол PSF инструмента, в пределах которого этот инструмент способен зарегистрировать 68% наблюдаемого спектра) различных гамма-телескопов (сплошные кривые: чёрная кривая соответствует инструменту Fermi LAT, красная - H.E.S.S., зелёная - MAGIC, синяя - CTA, пурпурная - MAST) в сравнении со значением наблюдаемого угла, в пределах которого можно зарегистрировать 68% наблюдаемого спектра, для модельных спектров источника 1ES 1101-232 с $z = 0.186$ в рамках модифицированной HCM и модели EBL [23] (красная пунктирная кривая).

Наконец, для экстремальных ТэВных блазаров 1ES 0229+200 ($z = 0.14$) и 1ES 0414+009 ($z = 0.287$) были построены SED и квантили зависимостей наблюдаемого угла от энергии в рамках модифицированной адронной каскадной модели и трёх моделей EGMF: модели [10], а также моделей astrophysical и astrophysical R из [11].

На рисунке 7 изображены модельные SED, для которых наблюдаемый угол $\theta < 0.1$ градуса, полученные в рамках модифицированной HCM

(обозначенные синими кривыми) для обоих источников и трёх моделей EGMF. Также для сравнения показаны интегральные SED в рамках базовой HCM (чёрные кривые) и универсальные SED в рамках ECM (красные кривые). Из рисунка можно увидеть, что модельные SED для моделей EGMF [10] и astrophysical R значительно более мягкие по сравнению с интегральными спектрами, особенно в области более высоких энергий. Это уменьшение жёсткости спектров сильнее всего проявляется для модели [10] и слабее всего - для модели astrophysical.

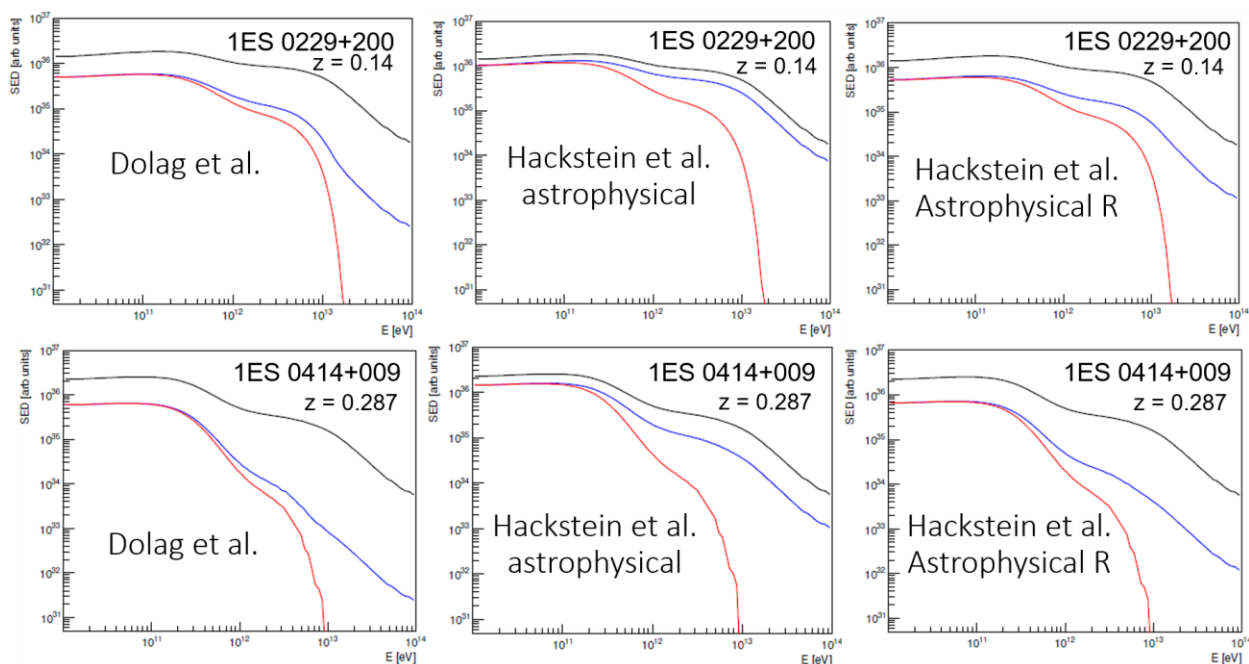


Рисунок 7. Наблюдаемые SED в рамках разных каскадных моделей и разных моделей EGMF. Синие кривые обозначают SED в рамках модифицированной HCM внутри PSF 0.1 градуса, чёрные кривые - интегральные SED в рамках HCM, красные кривые - универсальные спектры в рамках ECM. Верхние графики соответствуют источнику 1ES 0229+200 и моделям EGMF [10], astrophysical ([11]) и astrophysical R ([11]) соответственно; нижние графики-- источнику 1ES 0414+009 и моделям EGMF [10], astrophysical ([11]) и astrophysical R ([11]) соответственно.

На рис. 8 изображены значения наблюдаемого угла, в пределах которого можно зарегистрировать n % наблюдаемого спектра (квантили) в зависимости от энергии в рамках модели модифицированной HCM и вышеупомянутых источников и моделей EGMF. Можно заметить две характерных угловых картины. Для модели [10] значения угла для всех квантилей значительно

увеличиваются с ростом энергии, так что при $E = 10$ ТэВ 68% всех наблюдаемых углов больше 0.73 градуса для источника 1ES 0229+200 ($z = 0.14$) и 2.35 градуса - для источника 1ES 0414+009 ($z = 0.287$).

Совершенно другая картина наблюдается для моделей [11]. Тогда как углы верхних квантилей растут довольно быстро с ростом энергии, для нижних квантилей виден лишь небольшой рост значений углов. Это может означать, что для этих моделей достаточно большая часть протонов не встречает никаких филаментов на своём пути (или встречает более тонкие филаменты) и, тем самым, не испытывает сильного отклонения.

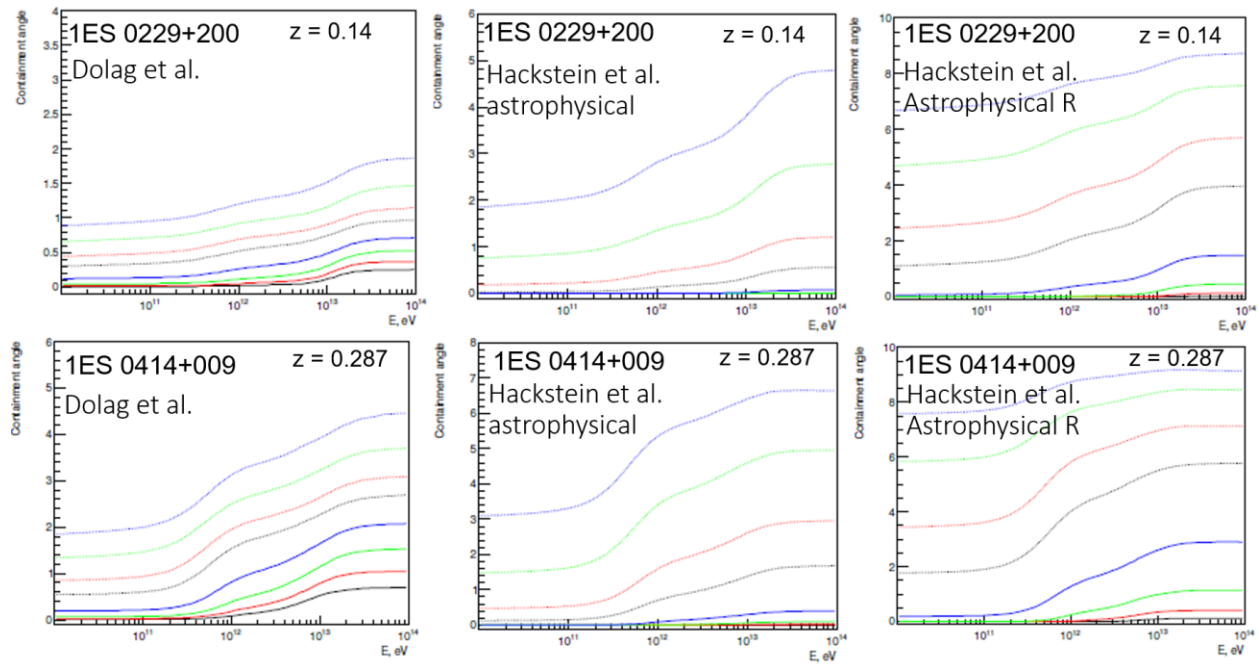


Рисунок 8. Квантили наблюдаемого углового размера источников в рамках модифицированной НСМ. Чёрная сплошная кривая обозначает угол, в котором содержится 5% каскада, красная сплошная - 10%, зелёная сплошная - 20%, синяя сплошная - 40%, чёрная пунктирная - 68%, красная пунктирная - 80%, зелёная пунктирная - 90% и синяя пунктирная - 95%. Верхние графики соответствуют источнику 1ES 0229+200 и моделям EGMF [10], astrophysical ([11]) и astrophysical R ([11]) соответственно; нижние графики-- источнику 1ES 0414+009 и моделям EGMF [10], astrophysical ([11]) и astrophysical R ([11]) соответственно.

Также, полученные в рамках этих моделей EGMF угловые размеры, как и рис. 6, показывают, что рассматриваемые источники будут восприниматься АЧТ в качестве протяжённых источников. Это хорошо видно на рис. 9, где характерные угловые размеры блазара 1ES 0229+200 (угол θ_{68}) сравниваются

с угловыми разрешениями различных гамма-телескопов (как и на рис. 6, но с добавлением данных для LHAASO, взятых из [29]). Из графика видно, что только для модели EGMF astrophysical значение $\theta_{68} < 0.1$ градуса для энергий $E < 0.7$ ТэВ. Поскольку этот источник был зарегистрирован телескопом H.E.S.S. как точечный [22], его модельные угловые размеры, полученные в данной работе, значительно уменьшают правдоподобие модифицированной адронной каскадной модели. Необходим дальнейший статистический анализ для того, чтобы поставить ограничения на эту модель или даже, возможно, закрыть её.

Все полученные в данной работе SED и угловые размеры источников можно будет сравнить с будущими данными наблюдений АЧТ, таких как СТА, или детекторов частиц, таких как LHAASO.

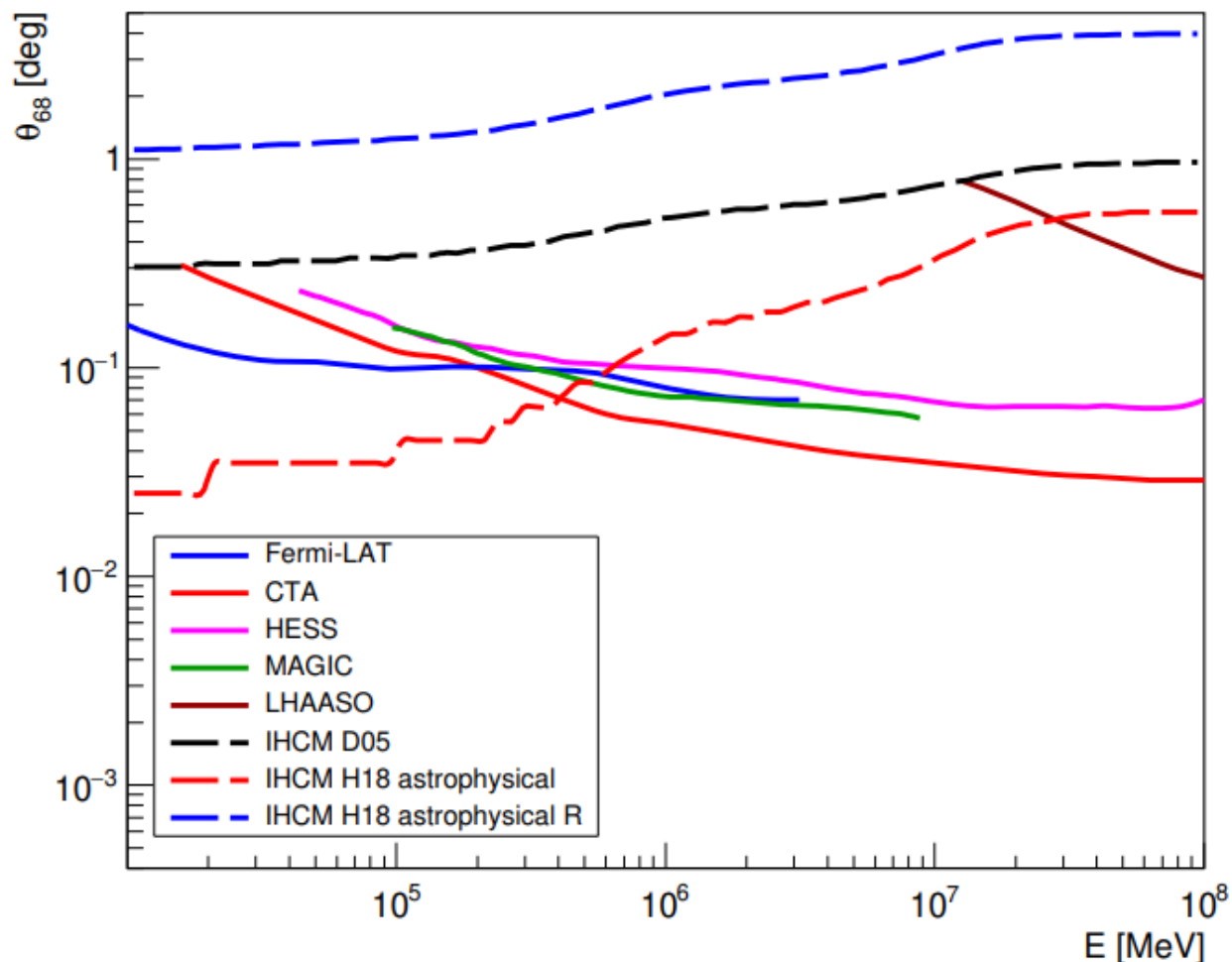


Рисунок 9. Угловое разрешение (угол PSF инструмента, в пределах которого этот инструмент способен зарегистрировать 68% наблюдаемого спектра) различных гамма-телескопов (сплошные кривые: синяя кривая соответствует инструменту Fermi LAT, розовая - H.E.S.S., зелёная - MAGIC, красная - CTA, коричневая - LHAASO) в сравнении со значением наблюдаемого угла, в пределах которого можно зарегистрировать 68% наблюдаемого спектра, для модельных спектров источника 1ES 0229+200 с $z = 0.14$ в рамках модифицированной HCM, модели EBL [25] и моделей EGMF [10] (чёрная пунктирная кривая), astrophysical ([11], красная пунктирная кривая), astrophysical R ([11], синяя пунктирная кривая).

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработан код, реализующий новую гибридную методику расчёта спектров и характеристик потоков гамма-излучения от экстремальных ТэВных блазаров с учётом современных знаний о межгалактической среде (современные модели фотонных полей и внегалактического магнитного поля).
2. В рамках электромагнитной каскадной модели подробно описаны режимы развития электромагнитных каскадов и основные особенности

энергетических спектров экстремальных ТэВных блазаров и впервые, на основании большой выборки источников, проведена детальная аппроксимация наблюдаемых энергетических спектров.

3. На основе анализа наблюдаемых энергетических спектров экстремальных ТэВных блазаров в рамках электромагнитной каскадной модели обнаружен эффект маскировки компонента от первичных гамма-квантов каскадным компонентом в оптически тонкой области наблюдаемых спектров, как новый механизм генерации аномалии при высоких энергиях в спектрах блазаров; этот результат устойчив к большому количеству систематических эффектов.

4. В рамках адронных каскадных моделей построены наблюдаемые энергетические спектры и зависимости квантилей наблюдаемого углового размера ряда экстремальных ТэВных блазаров от энергии в случае различных вариаций внегалактического магнитного поля (в том числе в сильно неоднородных полях, повторяющих LSS).

5. На основе анализа энергетических спектров экстремальных ТэВных блазаров в рамках модифицированной адронной каскадной модели сделан вывод о том, что наблюдаемый спектр гамма-квантов (т.е. спектр, который может быть измерен инструментами с типичными угловыми разрешениями АЧТ) в рамках этой модели имеет подавление при высоких энергиях (по сравнению со случаем базовой адронной модели).

6. На основе анализа угловых размеров экстремальных ТэВных блазаров в рамках модифицированной адронной каскадной модели сделан вывод о том, что эти источники могут быть зарегистрированы как протяжённые (а не точечные) гамма-телескопами следующего поколения и, возможно, действующими гамма-телескопами.

Список литературы

1. Progress in unveiling extreme particle acceleration in persistent astrophysical jets / J. Biteau, E. Prandini, L. Costamante [и др.] // *Nature Astronomy*. 2020. Jan.. Vol. 4, no. 2. P. 124–131.
2. A low level of extragalactic background light as revealed by γ -rays from blazars / F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, A. R. Bazer-Bachi [и др.] // *Nature*. 2006. Apr.. Vol. 440, no. 7087. P. 1018–1021
3. Neronov A., Vovk I. Evidence for Strong Extragalactic Magnetic Fields from Fermi Observations of TeV Blazars // *Science*. 2010. Apr.. Vol. 328, no. 5974. P. 73–75.
4. Neronov A., Semikoz D. V. Sensitivity of gamma-ray telescopes for detection of magnetic fields in the intergalactic medium // *Physical Review D*. 2009. Dec.. Vol. 80, no. 12.
5. Horns D., Meyer M. Indications for a pair-production anomaly from the propagation of VHE gamma-rays // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2012. Feb.. Vol. 2012, no. 02. P. 033–033.
6. Korochkin A., Rubtsov G., Troitsky S. Search for anomalous features in gamma-ray blazar spectra corrected for the absorption on the extragalactic background light // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2019. Dec.. Vol. 2019, no. 12. P. 002–002.
7. Cascades from primary gamma rays and nuclei as a source of background in searches for oscillations between photons and axion-like particles / S. A. Baklagin, T. A. Dzhatdоеv, A. P. Kircheva [и др.] // *Physics of Particles and Nuclei*. 2018. Jan.. T. 49, № 1. С. 90–93.
8. CRPropa 3—a public astrophysical simulation extraterrestrial ultra-high energy particles / Rafael Alves Batista, Andrej Dundovic, Martin

Erdmann [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2016. May. T. 2016, № 05. C. 038–038.

9. Kachelrieß M., Ostapchenko S., Tomàs R. ELMAG: A Monte Carlo simulation of electromagnetic cascades on the extragalactic background light and in magnetic fields // Computer Physics Communications. 2012. Apr.. Vol. 183, no. 4. P. 1036–1043.

10. Constrained simulations of the magnetic field in the local Universe and the propagation of ultrahigh energy cosmic rays / K. Dolag, D. Grasso, V. Springel [и др.] // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2005. Jan.. Vol. 2005, no. 01. P. 009–009.

11. Simulations of ultra-high energy cosmic rays in the local Universe and the origin of cosmic magnetic fields / S. Hackstein, F. Vazza, M. Brüggen [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2018. Jan.. Vol. 475, no. 2. P. 2519–2529.

12. Berezhinsky V., Kalashev O. High-energy electromagnetic cascades in extragalactic space: Physics and features // Physical Review D. 2016. Jul.. Vol. 94, no. 2.

13. BLAZARS AS ULTRA-HIGH-ENERGY COSMIC-RAY SOURCES: IMPLICATIONS FOR TeV GAMMA-RAY OBSERVATIONS / K. Murase, C. D. Dermer, H. Takami [и др.] // The Astrophysical Journal. 2012. Mar.. Vol. 749, no. 1. P. 63.

14. ROLE OF LINE-OF-SIGHT COSMIC-RAY INTERACTIONS IN FORMING THE SPECTRA OF DISTANT BLAZARS IN TeV GAMMA RAYS AND HIGH-ENERGY NEUTRINOS / W. Essey, O. Kalashev, A. Kusenko [и др.] // The Astrophysical Journal. 2011. Mar.. Vol. 731, no. 1. P. 51.

15. Berezhinsky V., Gazizov A., Grigorieva S. On astrophysical

solution to ultrahigh energy cosmic rays // *Physical Review D*. 2006. Aug.. Vol. 74, no. 4.

16. Kelner S. R., Aharonian F. A. Energy spectra of gamma rays, electrons, and neutrinos produced at interactions of relativistic protons with low energy radiation // *Physical Review D*. 2008. Aug.. T. 78, № 3.

17. Allard D. Extragalactic propagation of ultrahigh energy cosmic-rays // *Astroparticle Physics*. 2012. Dec..T. 39-40.C. 33–43.

18. Eichmann B. High Energy Cosmic Rays from Fanaroff-Riley radio galaxies // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2019. May. T. 2019, № 05. C. 009–009.

19. A radio ridge connecting two galaxy clusters in a filament of the cosmic web / F. Govoni, E. Orrù, A. Bonafede [и др.] // *Science*. 2019. Jun.. T. 364, № 6444. C. 981–984.

20. Electromagnetic cascade masquerade: a way to mimic γ -axion-like particle mixing effects in blazar spectra / T. A. Dzhatdov, E. V. Khalikov, A. P. Kircheva [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. 2017. Jul.. Vol. 603. P. A59.

21. Dzhatdov T. A. Cascade model of the anomaly in blazar spectra at very high energies // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2015. Mar.. Vol. 79, no. 3. P. 329–331.

22. Discovery of VHE γ -rays from the distant BL Lacertae 1ES 0347-121 / F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, U. Barres de Almeida [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. 2007. Aug.. T. 473, № 3. C. L25–L28.

23. Kneiske T. M., Dole H. A lower-limit flux for the extragalactic background light // *Astronomy & Astrophysics*. 2010. Jun.. Vol. 515. P. A19.

24. Planck2015 results / P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud [и др.] // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. Sep.. Vol. 594. P. A13.

25. Semi-analytic modelling of the extragalactic background light and consequences for extragalactic gamma-ray spectra / R. C. Gilmore, R. S. Somerville, J. R. Primack [и др.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. Apr.. Vol. 422, no. 4. P. 3189–3207.
26. THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE MISSION / W. B. Atwood, A. A. Abdo, M. Ackermann [и др.] // The Astrophysical Journal. 2009. May. Vol. 697, no. 2. P. 1071–1102.
27. Science with the Cherenkov Telescope Array. WORLD SCIENTIFIC, 2018. Feb..
28. Dzhatdov T., Podlesnyi E. Massive Argon Space Telescope (MAST): A concept of heavy time projection chamber for γ -ray astronomy in the 100 MeV–1 TeV energy range // Astroparticle Physics. 2019. Nov.. Vol. 112. P. 1–7.
29. The observation of the Crab Nebula with LHAASO-KM2A for the performance study / F. Aharonian, Q. An, Axikegu [и др.] // arXiv e-prints. 2020. Oct.. C. arXiv:2010.06205.