

На правах рукописи

Калашев Олег Евгеньевич

**Космические лучи
ультравысоких и сверхвысоких энергий.
Сопутствующие нейтринные
и фотонные излучения**

01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН).

Официальные оппоненты:

Быков Андрей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор. ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики, руководитель отделения.

Деденко Леонид Григорьевич, доктор физико-математических наук, профессор. ФГБОУ ВПО Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра общей физики, профессор.

Птускин Владимир Соломонович, доктор физико-математических наук. ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкина Российской академии наук, лаборатория астрофизических исследований, главный научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится _____ в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук, адрес: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте www.inr.ru.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

доктор физико-математических наук

С. В. Троицкий

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Проблема происхождения космических лучей ультравысоких энергий (КЛУВЭ) является одной из наиболее актуальных и сложных задач современной астрофизики частиц. Экспериментальные исследования в данной области сильно осложнены из-за малости потока частиц указанных энергий, порядка 1 частицы на квадратный километр на стерадиан в год при энергии 10^{19} эВ. По этой причине во всех существующих экспериментах свойства частиц ультравысоких энергий определяются косвенным образом по характеристикам широких атмосферных ливней, инициированных космическими лучами в атмосфере Земли.

Анализ наблюдений включает моделирование взаимодействий КЛУВЭ в атмосфере. Это требует экстраполяции существующих экспериментальных данных по сечениям нуклон-нуклонных взаимодействий до энергий в сотни ТэВ в системе центра масс, что вносит неизбежную систематическую ошибку во все косвенные оценки и особенно в измерения массового состава КЛУВЭ. Наименее подвержено влиянию систематики определение направлений прихода космических лучей. В современных экспериментах точность определения этой величины составляет примерно полтора градуса. Однако интерпретация направлений прихода сильно зависит от предполагаемого массового состава, поскольку космические лучи могут заметно отклоняться магнитным полем галактики.

В условиях, когда массовый состав не удаётся достоверно измерить, а интерпретация направлений прихода неочевидна, особую значимость приобретает альтернативный подход, основанный на изучении сопутствующих сигналов от взаимодействия КЛУВЭ со средой вокруг источника и межга-

лактической средой на их пути к наблюдателю. Данный подход, развитый в настоящей работе, позволяет получить независимые ограничения на массовый состав и указать на вероятные источники КЛУВЭ.

Цели и задачи диссертационной работы:

Настоящая работа посвящена проблеме происхождения КЛУВЭ, изучению массового состава первичных КЛУВЭ и возможной эволюции источников. При этом систематически используется подход, основанный на подсчёте сопутствующих потоков фотонов и нейтрино, произведённых при распространении космических лучей в межгалактическом пространстве, либо в непосредственной близости к источникам.

Для достижения поставленных целей были решены следующие задачи:

- Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий. Получено ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения.
- В различных сценариях рассчитан диапазон возможных потоков фотонов ультравысоких энергий и проведено сравнение с существующими экспериментальными ограничениями.
- В ускорительных сценариях с протонным первичным составом вычислен поток вторичного гамма-излучения и нейтрино. Проведено сравнение предсказаний с оценкой диффузного фона телескопом Ферми и с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ. В результате поставлены ограничения на эволюцию и первичный спектр КЛУВЭ.
- Предложен механизм объяснения кажущейся аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией

свыше сотен ГэВ за счёт дополнительного вклада от космических лучей.

- Рассмотрены две характерные модели взаимодействия космических лучей сверхвысоких и ультравысоких энергий со средой источника. Получены предсказания для вторичных сигналов от взаимодействия.

Научная новизна. В ходе выполнения работы впервые были получены сильные ограничения на модели происхождения КЛУВЭ, предполагающие первичный протонный состав. Предложен новый механизм объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией свыше сотен ГэВ. Ограничение на плотность энергии каскадного излучения является самым сильным и впервые получено с учётом возможной эволюции источников. Взаимодействие космических лучей с излучением аккреционного диска чёрной дыры впервые рассмотрено в реалистичной модели, учитывающей анизотропность излучения диска. Предложена оригинальная самосогласованная модель, одновременно объясняющая экстрагалактический поток гамма-излучения при энергиях свыше ГэВ и обеспечивающая протонную часть потока КЛУВЭ.

Теоретическая и практическая значимость Полученные в первой главе универсальные ограничения на плотность энергии каскадного излучения помимо физики космических лучей могут применяться в различных задачах физики элементарных частиц и астрофизики высоких энергий, в частности, в моделях распадающейся тёмной материи.

Вычисление вторичного сигнала от взаимодействий космических лучей ультравысоких энергий с межгалактическим фоном позволило получить ограничения на модели происхождения КЛУВЭ с первичным протонным составом. Данный результат дополняет исследования массового состава

ва, основанные на изучении характеристик широких атмосферных ливней.

Модель, объясняющая видимую аномальную прозрачность Вселенной для гамма-излучения высоких энергий, экспериментально проверяема и позволяет выработать рекомендации для проектируемых атмосферных черенковских телескопов следующего поколения, таких как СТА. Подтверждение или опровержение модели позволит одновременно улучшить ограничения на величину межгалактического магнитного поля, что в свою очередь будет иметь последствия для физики КЛУВЭ и гамма-астрономии.

Модели взаимодействия космических лучей в источнике доказывают возможность генерации потока астрофизических нейтрино в активных ядрах галактик и указывают на возможную связь источников гамма-излучения и нейтрино сверхвысоких энергий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Изучены общие свойства электромагнитных каскадов, инициированных частицами сверхвысоких энергий. Отдельно рассмотрен аналитический подход к вычислению спектра каскадного излучения и обсуждены границы его применимости. С помощью данных орбитального эксперимента Ферми, получено универсальное модельно-независимое ограничение на максимальную плотность энергии каскадного излучения.
2. В ускорительных сценариях и в моделях "Top-Down" (распад частиц сверхтяжёлой тёмной материи и топологических дефектов) вычислен диапазон возможных потоков фотонов ультравысоких энергий. В случае сверхтяжёлой тёмной материи, как основного источника космических лучей выше порога Грейзена-Зацепина-Кузьмина, продемонстрировано, что предсказания теории входят в противоречие с

ограничениями на долю фотонов в КЛУВЭ.

3. В ускорительных сценариях образования КЛУВЭ, предполагающих преимущественно протонный первичный состав, вычислен поток вторичного гамма-излучения и нейтрино от взаимодействия космических лучей с межгалактическим фотонным фоном. Проведено сравнение предсказаний с оценкой диффузного фона из наблюдений орбитального телескопа Ферми, а также с ограничениями эксперимента IceCube на диффузный поток нейтрино выше 10 ПэВ. В результате исключены сценарии с сильной эволюцией и жёстким первичным спектром.
4. Предложен механизм объяснения аномальной прозрачности Вселенной для гамма-излучения от далёких блазаров с энергией свыше сотен ГэВ. В его основе лежит предположение о дополнительном вкладе вторичного каскадного излучения от взаимодействия космических лучей, испущенных блазарами, с межгалактическим фотонным фоном. В данной сценарии произведена оценка возможного вклада взаимодействий в поток астрофизических нейтрино, а также получены предсказания наблюдаемого числа блазаров в планируемых атмосферных черенковских гамма-телескопах следующего поколения, таких как СТА.
5. Предложена реалистичная модель, описывающая наблюдаемый в эксперименте IceCube, в диапазоне энергий $E \gtrsim 30$ ТэВ, поток нейтрино $p\gamma$ -взаимодействиями космических лучей сверхвысоких энергий с анизотропным излучением аккреционного диска в активных ядрах галактик. Показано, что сопутствующие потоки протонов и гамма-излучения, в данной модели, существенно ниже наблюдаемых экспе-

риментально.

6. Предложена самосогласованная модель, одновременно объясняющая наблюдаемый в орбитальном эксперименте Ферми экстрагалактический поток γ -излучения при энергиях свыше ГэВ и обеспечивающая протонную часть потока КЛУВЭ, предсказанную в независимой работе из анализа данных обсерватории им. Пьера Оже, KASCADE и KASCADE-Grande. В рамках данной модели, вторичный сигнал фотонов и нейтрино обязан своим происхождением взаимодействию КЛ с газом вблизи активных ядер галактик Фонарев-Райли I или Лацертид. Предсказываемый в модели поток нейтрино может составлять до 60% от наблюдаемого в эксперименте IceCube.

Степень достоверности и апробация результатов. Все результаты диссертации являются обоснованными. Ограничения на модели с протонным первичным составом и сценарии "Top-Down" согласуются с результатами других авторов, полученными позже. Модель, объясняющая аномальную прозрачность Вселенной по отношению к гамма-излучению высоких энергий получила широкую известность и активно обсуждается в научном сообществе. Численный код, для моделирования взаимодействий КЛУВЭ, разработанный автором, опубликован в сети интернет, а результаты расчётов неоднократно сравнивались с независимыми вычислениями. Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в реферируемых журналах и докладывались автором на многочисленных российских и международных конференциях.

Список публикаций по теме диссертации По материалам диссертации опубликовано 23 работы, из них 16 статей в рецензируемых научных журналах [1–16], 7 статей в сборниках трудов конференций [17–23].

Личный вклад автора. Диссертация основана на работах, выполненных автором в ИЯИ РАН (Москва) в 2003-2016 гг. Основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав основного текста, заключения, библиографии, одного приложения и списка сокращений. Она содержит 42 рисунка и 8 таблиц. Общий объем диссертации 187 страниц. Библиография включает 234 наименований.

Содержание работы

Во Введении обсуждается текущий статус проблемы идентификации источников и определения природы КЛУВЭ. Обоснована актуальность темы диссертационной работы и сформулирована цель исследований, представлены выносимые на защиту научные положения. Также во введении даны общие сведения о процессе распространения КЛУВЭ в межгалактическом пространстве. Обсуждаются способы моделирования этого процесса и неопределённости, связанные с непрямым характером измерения свойств среды распространения. Материал вводной части основан на работах [3, 12].

В первой главе подробно рассматриваются свойства электромагнитного каскада (ЭК), который создаётся электронами, позитронами или фотонами достаточно высоких энергий, благодаря цепочке реакций рождения пар (РП)



и обратного Комптоновского рассеяния (ОКР)

$$e + \gamma_t \rightarrow \gamma' + e \quad (2)$$

на фотонах фонового излучения γ_t . Для существования ЭК необходимо, чтобы энергия фотонов превышала порог рождения электрон-позитронных пар на фоновых фотонах с энергией ε

$$E_{th} = \frac{m_e^2}{\varepsilon}. \quad (3)$$

По мере развития ЭК, число частиц в нем экспоненциально растёт, при примерном сохранении полной энергии. Так продолжается до тех пор, пока энергия фотонов не опускается ниже порога РП, после чего фотоны становятся "стерильными", а электроны постепенно теряют энергию за счёт ОКР. Таким образом, энергия ЭК в результате его развития аккумулируется в основном в форме подпороговых фотонов, а форма спектра излучения оставшегося после развития ЭК почти не зависит от энергии частиц, инициировавших каскад.

В разделе 1.1 содержится вводная информация, обсуждаются смежные проблемы астрофизики и физики космических лучей, приводится краткий обзор главы.

В разделе 1.2 физика ЭК подробно рассматривается для случая статической Вселенной, приводится аналитический вывод равновесного спектра каскадного излучения в приближении дихроматического спектра фоновых фотонов с энергиями $\epsilon_{\text{cmb}} = 6.3 \times 10^{-4}$ эВ и $\epsilon_{\text{ebl}} \simeq 0.7$ эВ, примерно соответствующими характерным энергиям реликтового излучения (РИ) и межгалактического фонового света (МФС). При этом подразумевается, что плотность РИ много выше плотности МФС, а единственным свободным параметром модели остаётся ϵ_{ebl} . Каскад инициируется фотоном или

электроном с энергией E_s выше порога рождения пар на РИ (3) и развивается, благодаря цепочке реакций (1) и (2) на фотонах мишени γ_t . Когда развитие каскада завершается спектр принимает универсальную форму, не зависящую от энергии E_s (в предположении, что E_s достаточно велика).

Универсальный спектр [24]

$$n_\gamma(E_\gamma) \propto \begin{cases} E_\gamma^{-3/2} & , E_\gamma \leq \mathcal{E}_X \\ E_\gamma^{-2} & , \mathcal{E}_X \leq E_\gamma \leq \mathcal{E}_\gamma^{ebl} \\ 0 & , E_\gamma > \mathcal{E}_\gamma^{ebl} \end{cases} \quad (4)$$

характеризуется двумя параметрами - энергией обрезания

$$\mathcal{E}_\gamma^{ebl} = \frac{m_e^2}{\epsilon_{ebl}} = 3.9 \times 10^{11} \text{ эВ},$$

и энергией укрупнения спектра

$$\mathcal{E}_X = \frac{1}{3} \mathcal{E}_\gamma^{ebl} \frac{\epsilon_{cmb}}{\epsilon_{ebl}} = 1.2 \times 10^8 \text{ эВ}$$

Расчёты примерно подтверждаются компьютерными вычислениями. Спектр (4) обладает свойством "сильной универсальности", то есть в известных пределах не зависит, ни от расстояния до источников, ни от начальной энергии E_s частиц, инициировавших каскад. Универсальность нарушается для близких источников, в случае когда наблюдается неполное развитие ЭК. Далее проводится сравнение упрощённых аналитических расчётов каскадных спектров, с результатами численных расчётов в расширяющейся Вселенной для ЭК, инициированных при различных красных смещениях z . Сравнение показывает хорошее согласие при небольших $z \lesssim 0.15$, а для более далёких источников достичь удовлетворительного согласия удаётся перемасштабированием параметра ϵ_{ebl} .

Затем изучается интересный как с физической так и с технической точки зрения случай распространения каскадов в чистом РИ, без примеси

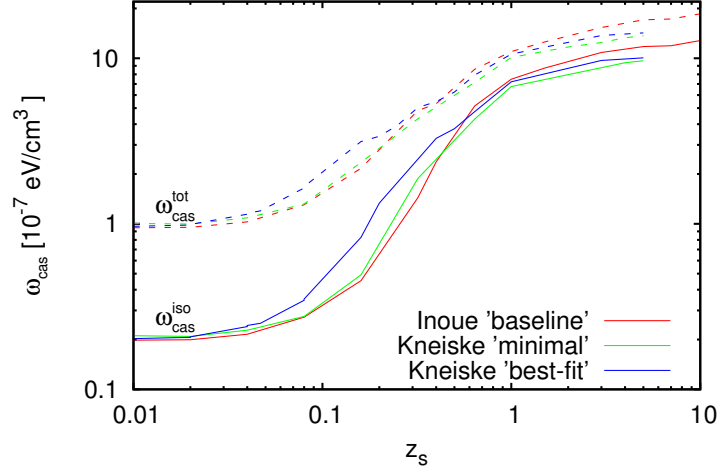
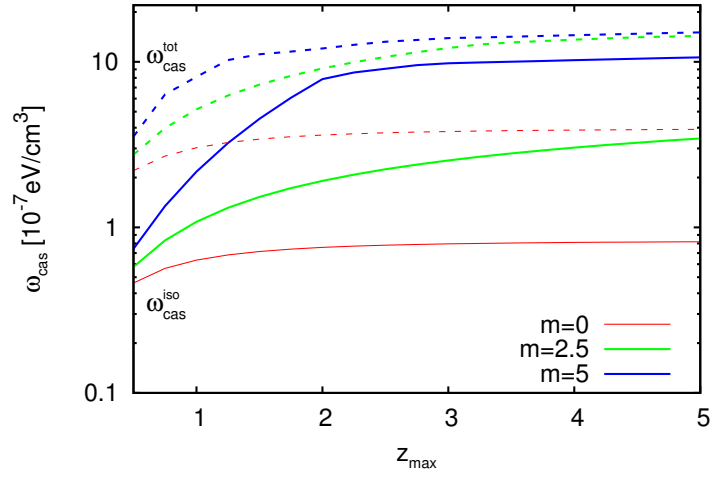
(a) источники при фиксированном $z = z_s$ (b) непрерывное распределение по z

Рис. 1: Верхние пределы на ω_{cas} , полученные в модели со вспышкой излучения при фиксированном красном смещении z на Рис. (a), и для распределения источников с концентрацией $\propto (1+z)^{3+m}$, $z < z_{\text{max}}$ на Рис. (b). Отдельно приведены ограничения на полную плотность энергии $\omega_{\text{cas}}^{\text{tot}}$ (пунктирные кривые) и изотропную часть $\omega_{\text{cas}}^{\text{iso}}$ (сплошные линии). На Рис. (a) также проиллюстрирована зависимость от предполагаемой модели МФС на примере модели [25] (красные кривые), [26] (синие кривые), и модели [27] (зелёные кривые). График (b) построен в модели МФС [25].

оптических фотонов. Этот случай представляет практическую важность для рассмотрения каскадов на больших z , когда МФС мал или отсутствует. Технически случай чистого РИ интересен, так как эффект наблюдаемый для дихроматического спектра воспроизводится и в этом варианте, но роль МФС выполняют фотоны из хвоста распределения Планка.

В разделе 1.3 обсуждаются численное моделирование ЭК путём решения кинетических уравнений и методом Монте-Карло. Первый способ более быстрый и позволяет точно вычислить спектр, в случае когда отклонения в магнитном поле не важны, например для вычисления диффузного потока от популяции источников. Второй метод позволяет аккуратно учитывать эффекты, связанные с отклонением электронов в магнитных полях, что важно для изучения каскадов от единичных источников. Результаты вычислений с помощью двух указанных методов сравниваются между собой и с независимыми вычислениями.

В разделе 1.4 для спектра ЭК вводится понятие слабой универсальности, и подробно обсуждаются границы применимости полученных результатов. В приближении слабой универсальности форма каскадного спектра по-прежнему не зависит от начальной энергии частиц, инициировавших каскад, но может зависеть от расстояния до источников.

В разделе 1.5 спектры каскадного излучения, вычисленные в различных предположениях о распределении источников с использованием нескольких реалистичных моделей МФС, сравниваются с современными измерениями полного и изотропного экстрагалактического потока гамма-лучей в орбитальном телескопе Ферми. Из требования о непревышении наблюдаемого потока выводится ограничение сверху на плотность каскадного излучения ω_{cas} . Ограничения показаны на Рис. 1. Важное отличие новой оценки ω_{cas} от более ранней, помимо использования самых современ-

ных измерений, состоит в том, что учтена слабая универсальность ЭК, а также некоторая неопределённость в спектре МФС и его эволюции.

В Разделе 1.6 приведены выводы к первой главе. Материал главы основан на работах [6, 15].

Вторая глава посвящена изучению диффузных потоков вторичных частиц производимых КЛУВЭ при их распространении в межгалактическом пространстве. Рассматривается 3 вида вторичного сигнала. Это так называемые космогенные нейтрино и фотоны, частицы с энергией свыше 0.1 ЭэВ, а также диффузное гамма-излучение в диапазоне от МэВ до сотен ГэВ. Нейтрино и фотоны, а также электроны ультравысоких энергий (УВЭ) появляются как продукты распада π -мезонов, образующихся при взаимодействии ядер и нуклонов УВЭ с реликтовым излучением (а также МФС), приводящем к обрезанию потока КЛУВЭ, т.н. эффект Грайзена - Зацепина - Кузьмина (ГЗК) [31, 32].

$$N + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow \pi^{\pm,0} + X, \quad (5)$$

При этом энергия вторичных частиц оказывается примерно на порядок меньше энергии нуклонов, участвующих во взаимодействии. Общее происхождение приводит к тому, что потоки фотонов и нейтрино УВЭ оказываются связанными между собой. Стоит, однако, отметить принципиальную разницу между ними. В отличие от нейтрино, беспрепятственно распространяющихся на космологические расстояния, фотоны и электроны УВЭ эффективно взаимодействуют с реликтовым микроволновым и радио излучением в межгалактическом пространстве, сравнительно быстро теряя энергию и иницируя ЭК. Таким образом, наблюдаемый поток фотонов УВЭ чувствителен только к процессам, происходящим в относительной близости к нашей галактике. И напротив, поток нейтрино, а также диф-

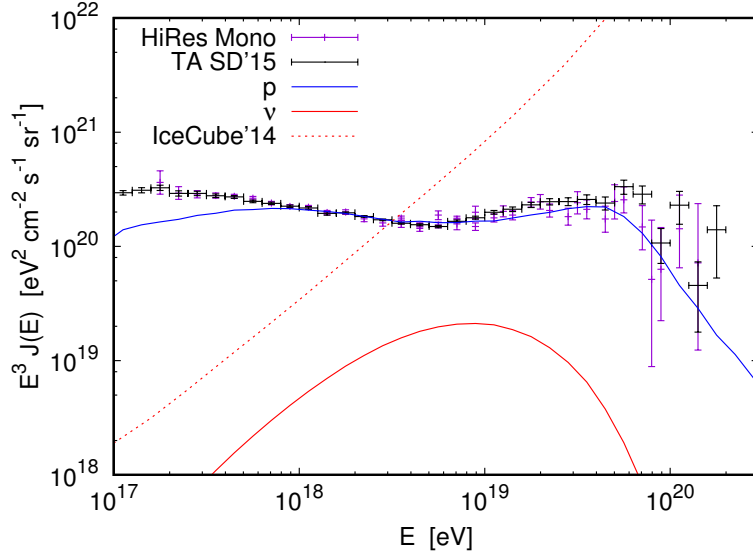
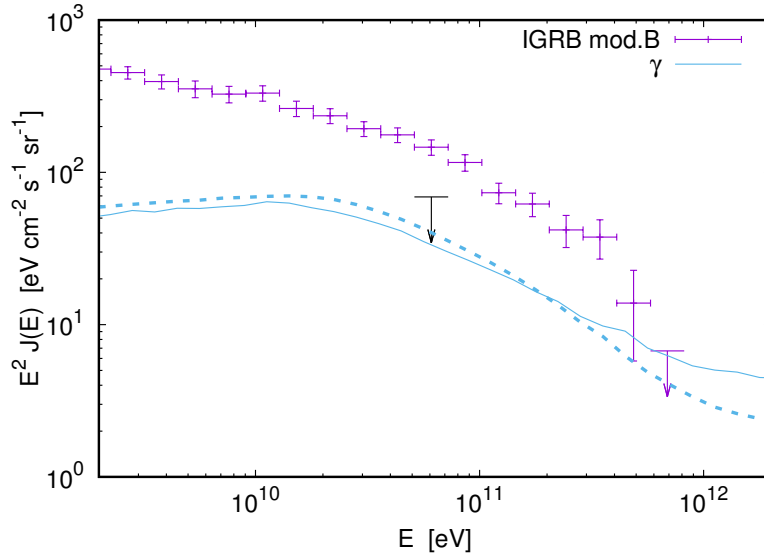
(a) КЛУВЭ и вторичные ν (b) вторичные γ

Рис. 2: Энергетический спектр протонов и нейтрино (верхняя панель) и каскадных фотонов (нижняя панель) от источников, испускающих протоны со степенным спектром (7), $p = 2.6$, $m = 1$ и $z_{\max} = 5$, нормированный на данные Telescope Array [28]. Также на верхней панели показано ограничение на дифференциальный поток нейтрино [29], а на правой панели показаны оценка изотропного гамма-фона [30] и чёрной стрелкой ограничение на поток фотонов с энергией выше 50 ГэВ с учётом вклада неразрешенных источников в фон, измеряемый гамма-телескопом Ферми. Поток фотонов зависит от предполагаемой модели МФС. Использовались оценки [25] (сплошная линия) и [26] (пунктирная линия).

фузного гамма-излучения, аккумулируясь на космологических расстояниях, несут информацию об усреднённой интенсивности производства частиц во Вселенной и чувствительны к эволюции источников.

Электромагнитные каскады постоянно подпитываются продуктами распада π -мезонов, и в значительно большей степени электронами и позитронами, образующимися в реакции рождения пар ядрами на РИ

$$A + \gamma_{\text{СМВ}} \rightarrow e^+ + e^- + A, \quad (6)$$

имеющей менее высокий порог чем процесс (5). Отметим, что процесс (6) практически не даёт вклада в поток фотонов УВЭ, поскольку электроны и позитроны произведённые в этой реакции имеют характерную энергию на 3-4 порядка ниже энергии ядра. Таким образом, космогенные фотоны и нейтрино обязаны своим происхождением почти исключительно реакции (5). По этой причине в литературе их также часто называют фотонами (нейтрино) ГЗК.

Как было отмечено выше, развитие ЭК приводит к образованию диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий до нескольких сот ГэВ. Причём форма спектра каскадного излучения практически не зависит от спектра исходных фотонов и электронов, зато чувствительна к эволюции источников и МФС.

Процессы (5) и (6) более эффективно идут на лёгких ядрах, так как пороговая энергия примерно пропорциональна массе ядра. Поэтому интенсивность сопутствующих сигналов связана с массовым составом КЛУВЭ. Таким образом, космогенные фотоны, нейтрино и диффузное гамма-излучение являются взаимодополняющими друг друга источниками косвенной информации об энергетическом спектре и массовом составе КЛУВЭ.

Раздел 2.1 содержит вводную информацию. В разделе 2.2 для широ-

кого класса моделей с протонным первичным составом космических лучей, удовлетворительно объясняющих наблюдаемый спектр при ультравысоких энергиях, вычисляется поток каскадного гамма-излучения и космогенных нейтрино. При этом используется феноменологическая модель источников со степенным спектром инжекции

$$Q(E, z) \propto (1 + z)^3 n(z) \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-p}, \quad E \in [E_{\min}, E_{\max}], \quad (7)$$

где для усреднённой сопутствующей плотности источников $n(z)$ используются либо общее выражение

$$n(z) = n(0)(1 + z)^m \quad \text{при } z \in [z_{\min}, z_{\max}], \quad (8)$$

либо различные параметризации, соответствующие конкретным классам источников, описанные в Приложении А.

Поток вторичных каскадных гамма-лучей во многих случаях оказывается выше потока изотропного гамма-излучения, наблюдаемого телескопом Ферми при энергиях свыше нескольких сотен ГэВ. Противоречие также возникает при меньших энергиях $E \gtrsim 50$ ГэВ, если учесть гарантированный вклад неразрешенных источников (главным образом блазаров) в изотропный фон. В моделях с относительно жёстким спектром инжекции, $p \lesssim 2.3$ и сильной эволюцией, $m \gtrsim 4$, наблюдается перепроизводство каскадных фотонов. В то же время, модели с мягким первичным спектром, одна из которых иллюстрируется на Рис. 2, пока формально не противоречат данным Ферми, но не полностью объясняют поток КЛУВЭ при энергиях $E \gtrsim 10^{19}$ эВ. Трение указанных моделей с измерениями гамма-телескопа Ферми можно частично ослабить, сдвинув шкалу энергий КЛУВЭ до 20% вниз, что позволено в рамках систематической ошибки определения энергии в современных экспериментах по космическим лучам. Также отмеча-

ется заметная зависимость поставленных ограничений от предполагаемого спектра МФС.

Поток нейтрино сверхвысоких энергий, вычисленный в тех же сценариях, может быть выше или ниже современных ограничений, следующих из ненаблюдения частиц при энергиях $E_\nu > 10$ ПэВ. Ограничения из данных IceCube, приведённые в таблицах 2.1-2.4 во второй главе, получены с использованием экспозиции эксперимента за 7 лет наблюдений [38]. В большинстве случаев ограничения IceCube оказываются слабее ограничений из данных по диффузному гамма-фону телескопа Ферми.

Отдельно рассматриваются сценарии с первичным протонным составом, объясняющие спектр КЛУВЭ в ограниченном интервале энергий $1 \text{ ЭэВ} \leq E \leq 4 \text{ ЭэВ}$, где результаты анализа массового состава КЛУВЭ во всех экспериментах указывают на преобладание лёгкой компоненты. Показано, что и в этом случае модели с жёстким спектром инжекции и сильной эволюцией перепроизводят поток гамма-излучения, хотя ограничения на параметры моделей оказываются несколько слабее.

Раздел 2.3 посвящён фотонам ультравысоких энергий. Обсуждаются факторы, влияющие на поток, проводится вычисление спектра фотонов УВЭ в астрофизических сценариях образования КЛУВЭ и в так называемых моделях "Top-Down", в которых КЛУВЭ образуются в результате распада или аннигиляции гипотетических частиц (сверхтяжёлой тёмной материи (СТТМ) [39] или топологических дефектов (ТД) [40]). Исторически подобные модели предлагались для объяснения возможного отсутствия ГЗК-обрезания в спектре КЛУВЭ, до того как обрезание было надёжно подтверждено.

Среди факторов, определяющих наблюдаемый спектр фотонов УВЭ, помимо первичного состава и спектра инжекции КЛУВЭ, рассматривают-

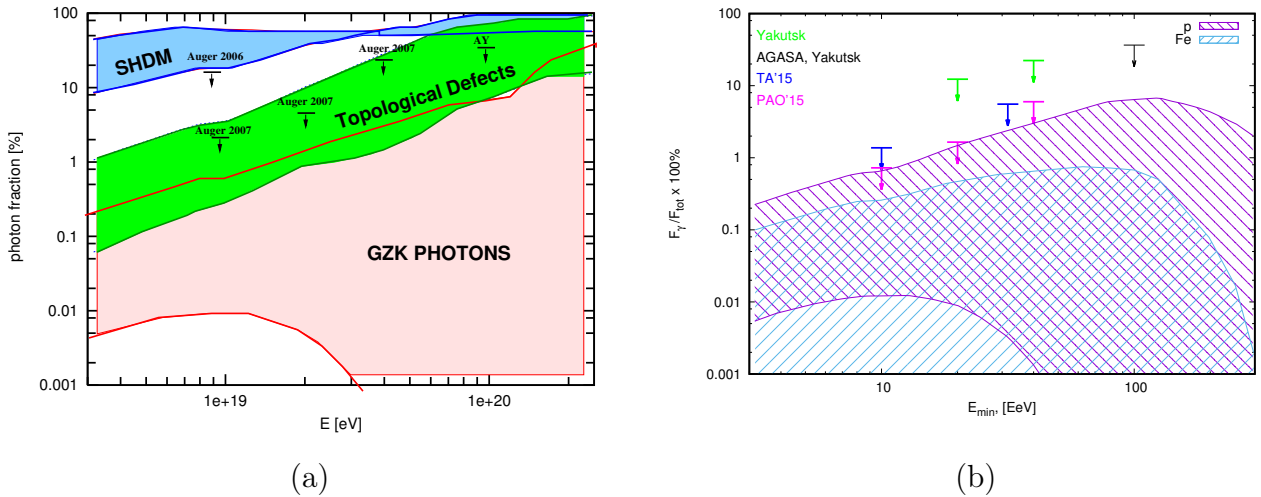


Рис. 3: Диапазон относительной доли фотонов в интегральном потоке КЛУВЭ выше энергии E_{\min} . Рис.(a) - в моделях "Top-Down" в сравнении с диапазоном потоков ГЗК-фотонов от астрофизических источников. Зелёным и голубым соответственно показаны диапазоны для моделей ТД и СТТМ. Рис.(b) - в подмножестве ускорительных моделей со степенным спектром инъекции (7) и максимальной энергией $E_{\max} = Z \times 10^3$ ЭэВ (Z - заряд ядра), объясняющих энергетический спектр КЛУВЭ выше 40 ЭэВ. Модели, предполагающие протонный первичный состав, показаны областью, заштрихованной сиреневым цветом. Модели с источниками, испускающими ядра железа, показаны областью, заштрихованной синим цветом. В случае железа нижняя граница диапазона выходит за края рисунка. Также для сравнения на графиках показаны экспериментальные пределы на долю фотонов в КЛУВЭ, полученные Якутской Установкой [33], обсерваторией им. Пьера Оже [34], Telescope Array [35] и ограничения из совместного анализа данных Якутской Установки и эксперимента AGASA [36]. Отбор моделей производился с помощью спектра КЛУВЭ по данным эксперимента HiRes [37].

ся недостаточно изученные характеристики среды распространения, такие как уровень межгалактического радио излучения и магнитного поля. Последнее может влиять на поток фотонов, выводя часть энергии из электромагнитного каскада, вследствие синхротронного излучения электронов. На Рис. 3а приведён диапазон относительной доли фотонов в интегральном потоке КЛУВЭ выше энергии E_{\min} в моделях "Top-Down" и астрофизических моделях с лёгким (протоны) составом. Результаты аналогичного анализа для подмножества астрофизических моделей с ограниченной максимальной энергией в случае лёгкого (протоны) и тяжёлого (железо) первичного состава приведены на Рис. 3б.

Максимальная энергия КЛУВЭ в сценариях "Top-Down" ограничивается внешним параметром, например массой сверхтяжёлых частиц. Особенностью таких моделей является относительно жёсткий первичный спектр КЛУВЭ и доминирование потока фотонов и лептонов в первичном составе космических лучей на самых высоких энергиях. Для построения консервативных ограничений на указанные модели, спектр при низких энергиях объяснялся независимой компонентой, и предполагались моды распада через кварки с последующей адронизацией. Последнее позволяло уменьшить отношение исходного потока фотонов к потоку протонов до 2-3.

Существующие экспериментальные лимиты на долю фотонов в КЛУВЭ [33–36] пока позволяют эффективно исключать лишь экзотические сценарии происхождения КЛУВЭ (модели "Top-Down", а также астрофизические сценарии с экстремально высокой максимальной энергией ускорения).

В Разделе 2.4 приведены выводы ко второй главе. Материал главы основан на работах [1, 2, 4, 5, 9, 12, 16–18, 20, 21, 23].

В третьей главе обсуждается проблема аномальной видимой про-

зрачности Вселенной для гамма-излучения с энергией свыше нескольких сот ГэВ от далёких блазаров. Гамма-лучи указанных энергий могут рождавать электрон-позитронные пары при взаимодействии с фотонами МФС с длинами волн от ультрафиолетовых до инфракрасных. Концентрация фотонов фона, на которых может произойти реакция, резко растёт с увеличением энергии гамма-лучей. В результате индивидуальный спектр гамма-лучей от далёких объектов должен обрезаться примерно при энергии $E \gtrsim 300$ ГэВ, на которой оптическая толщина становится равной единице.

Недавнее наблюдение гамма-излучения с энергией порядка ТэВ от блазаров [41, 42] с красным смещением свыше 0.1, вызвало резонные вопросы и породило ряд экзотических сценариев, объясняющих повышенную жёсткость спектра, в частности, основанных на гипотетических аксионоподобных частицах [43] или нарушении Лоренц-инвариантности [44].

В диссертации обсуждается альтернативная интерпретация, основанная на предположении о том, что наблюдаемые удалённые блазары, также являются источниками космических лучей сверхвысоких энергий. Протоны, испущенные блазарами, могут взаимодействовать с реликтовым излучением и МФС, рождая электрон-позитронные пары (6) и пи-мезоны (5). Оба процесса инициируют электромагнитные каскады, равномерно распределенные по линии наблюдения. При этом гамма-лучи более высоких энергий производятся относительно близко к наблюдателю, так что поглощение на МФС для них не играет большой роли. Взаимодействия протонов сверхвысоких энергий с фоновыми фотонами вдоль линии наблюдения могут производить точечные изображения, наблюдаемые атмосферными черенковскими телескопами, только в том случае если отклонения протонов по

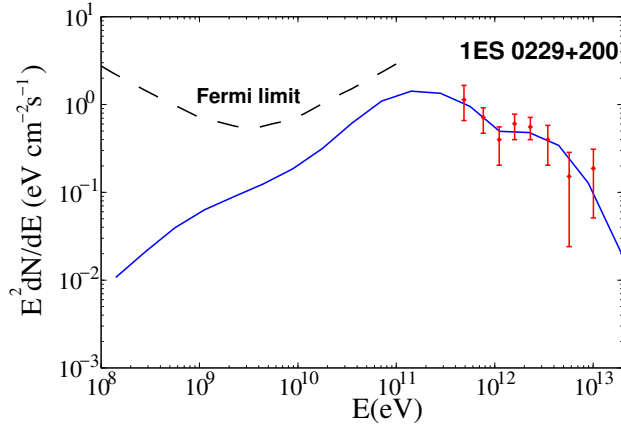


Рис. 4: Сравнение предсказанных спектров с данными HESS для блазара 1ES 0229+200 [42]. Также показаны верхние пределы потока при низких энергиях, следующие из данных гамма-телескопа Ферми [46]. Спектр получен в предположении сравнительно высокого МФС в модели [47].

пути в беспорядочном магнитном поле,

$$\Delta\theta \sim 0.1^\circ \left(\frac{B}{10^{-14}\text{Гс}} \right) \left(\frac{4 \times 10^7 \text{ ГэВ}}{E} \right) \left(\frac{d}{1 \text{ Гпк}} \right)^{1/2} \left(\frac{l_c}{1 \text{ Мпк}} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

меньше, чем угловое разрешение телескопов. Для корреляционной длины порядка 1 Мпк это означает предельный верхний уровень величины магнитного поля около 10 фемтогаусс, что не противоречит современным ограничениям [45]. Наблюдаемый поток при этом состоит из двух компонентов: первичный поток гамма-излучения, произведённый в источнике, и вторичный поток гамма-излучения, который возникает от взаимодействий космических лучей на линии видимости. Рис 4 показывает, что вторичный поток гамма-излучения может достаточно точно воспроизвести наблюдаемый спектр удалённых блазаров. При этом зависимость спектра от предполагаемой модели МФС оказывается умеренной.

В разделе 3.1 содержится вводная информация, приводится краткий обзор главы.

В разделе 3.2 вычисляется спектр вторичного гамма-излучения от

космических лучей, испущенных далёкими блазарами. Численные оценки предваряются аналитическими расчётами зависимости потока первичных и вторичных гамма-лучей от расстояния до источника. Для потока первичного гамма-излучения $F_{\text{перв}}(d)$ на расстоянии d от источника согласно предварительным оценкам имеем

$$F_{\text{перв},\gamma}(d) \propto \frac{1}{d^2} \exp\{-d/\lambda_\gamma\}, \quad (10)$$

где λ_γ - длина поглощения фотонов, тогда как для потока вторичных фотонов

$$F_{\text{втор},\gamma}(d) = \frac{p\lambda_\gamma}{4\pi d^2} [1 - e^{-d/\lambda_\gamma}] \propto \begin{cases} 1/d, & \text{при } d \ll \lambda_\gamma, \\ 1/d^2, & \text{при } d \gg \lambda_\gamma, \end{cases} \quad (11)$$

где p коэффициент определяющий темп генерации вторичных гамма-лучей протонами. Таким образом, на достаточно далёком расстоянии от источника поток вторичных гамма-лучей начинает преобладать над первичным потоком.

В силу свойства универсальности электромагнитных каскадов, форма спектра вторичных фотонов практически не зависит от спектра инжекции космических лучей, однако требуемая светимость источника в протонах может варьироваться. Характерные значения светимости, вычисленные для модели со степенным спектром инжекции $\Phi_p(E) \propto E^{-2}$, $E < 100$ ЭэВ, представлены в Таблице 3.1 диссертационной работы. Для угла раскрытия джета $\theta_{jet} = 6^\circ$ они составляют $10^{43} - 10^{44}$ эрг/с.

Помимо подпитки электромагнитного каскада, некоторая часть энергии протонов может выделяться в виде нейтрино. В разделе 3.3 производится оценка возможного вклада данного механизма в суммарный поток нейтрино с энергиями порядка ПэВ, наблюдаемый в эксперименте IceCube. Типичная энергия нейтрино, произведённых космическими лучами в ре-

акции фоторождения пионов, составляет примерно $1/20$ от энергии первичного нуклона. С учётом роста числа активных ядер галактик с увеличением красного смещения характерная энергия нуклонов должна быть порядка 100 ПэВ. Космические лучи с такой энергией могут рождать пионы лишь на фотонах МФС. Детальные расчёты показывают, что в реалистичных сценариях диффузный поток нейтрино при энергии порядка ПэВ составляет не больше 10% наблюдаемого. Ограничение сверху на абсолютную величину потока в сценарии получается путём нормирования средней концентрации протонов на измерения спектра в эксперименте KASCADE Grande [48].

В разделе 3.4 рассмотрено возможное влияние вклада вторичных гамма-лучей на предсказания ожидаемого числа блазаров, доступных для наблюдения в атмосферных черенковских телескопах следующего поколения, таких как СТА [49]. Иллюстративные оценки получены в предположении о болометрической светимости блазаров в протонах с энергией от 0.1 до 1 ЭэВ совпадающей со светимостью тех же объектов в гамма-лучах. Результаты также зависят от предположений о средней величине межгалактического магнитного поля. Увеличение магнитного поля подавляет вторичный поток гамма-излучения при низких энергиях. При $B = 10^{-15}$ Гс самый далёкий детектируемый блазар может иметь красное смещение до $z \simeq 5$. Это предсказание коренным образом отличается от ожиданий при отсутствии вклада вторичных гамма-лучей. В последнем случае максимальное красное смещение $z \lesssim 0.4$.

В разделе 3.5 подводятся итоги. Материал главы основан на работах [7, 8, 10, 11, 19].

В четвёртой главе, на примере активных ядер галактик (АЯГ), рассматриваются возможные сигналы от взаимодействия космических лучей

со средой вблизи источников.

Анализ, приведённый во второй главе, показывает, что сценарии происхождения КЛУВЭ, предполагающие 100% протонный первичный состав, близки к исключению из-за довольно высокого предсказываемого вклада в поток диффузного гамма-излучения, а также поток нейтрино с энергией выше 10 ПэВ. В то же время можно показать, что поток каскадного гамма-излучения и нейтрино от взаимодействия составных ядер с межгалактическим излучением может быть на порядки меньше. Более того, спектр астрофизических нейтрино, наблюдаемый в эксперименте IceCube в диапазоне энергий от десятков ТэВ до ПэВ, в принципе сложно объяснить взаимодействиями КЛУВЭ с межгалактическим фотонным фоном, поскольку типичная энергия космогенных нейтрино составляет 0.1 – 10 ЭэВ. В такой ситуации реакции космических лучей вблизи источника могут давать существенно больший вклад в наблюдаемый поток гамма-излучения и астрофизических нейтрино, чем взаимодействия космических лучей в межгалактическом пространстве.

Вступительный раздел 4.1 содержит аргументацию, приведённую выше. В разделе 4.2 изучается развитие модели [50], в которой нейтрино сверхвысоких энергий, производятся при фоторождении пионов протонами на внутреннем фотонном фоне источника. АЯГ давно считаются потенциальными источниками нейтрино. Они, вероятно, способны ускорять протоны до ультравысоких энергий. В то же время АЯГ окружены интенсивными радиационными полями, где могут происходить фотоадронные взаимодействия, приводящие к образованию нейтрино.

В сердце АЯГ, как предполагается, находится сверхмассивная чёрная дыра, окружённая аккреционным диском. Горячий диск является источником термального излучения с максимумом в ультрафиолетовом диапа-

зоне, что придаёт объектам видимый синеватый оттенок при наблюдении в оптике. Ускоренные частицы движутся вдоль джетов, перпендикулярно аккреционному диску, пересекая область интенсивного излучения.

В рассматриваемой модели предполагается, что ускорение протонов происходит в окрестности горизонта чёрной дыры (см. например [51]). Нейтринно сверхвысоких энергий возникают в результате распада пи-мезонов, образовавшихся в реакциях $p\gamma \rightarrow n\pi^+$ и $n\gamma \rightarrow p\pi^-$, в столкновениях протонов и вторичных нейтронов с анизотропным излучением аккреционного диска. Для расчёта функции распределения фоновых фотонов используется модель Шакуры-Сюняева [52].

Эффективная температура оптически толстого материала на масштабе гравитационного радиуса задаётся выражением

$$T_0 = 30 \text{ eV} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right)^{-1/4} \left(\frac{L}{\eta L_{\text{Edd}}} \right)^{1/4}, \quad (12)$$

где M - масса чёрной дыры и η - эффективность превращения гравитационной энергии в электромагнитное излучение, $L = \eta \dot{M}$, при данной скорости аккреции \dot{M} . Эддингтоновская светимость, L_{Edd} , определяется как

$$L_{\text{Edd}} = 1.26 \cdot 10^{46} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot} \right) \text{ эрг с}^{-1}.$$

Температура диска зависит от радиальной координаты примерно степенным образом, $T \propto r^{-\beta}$. В теории [52] $\beta = 3/4$. Наблюдаемый наклон находится в согласии с теорией тонкого диска, $\beta = 0.61_{-0.17}^{+0.21}$.

При расчёте оптической толщины по отношению к реакции фоторождения пионов для протонов, предполагается, что сегмент диска радиусом r излучает как чёрное тело с температурой $T(r)$,

$$T(r) = T_0 F(r), \quad (13)$$

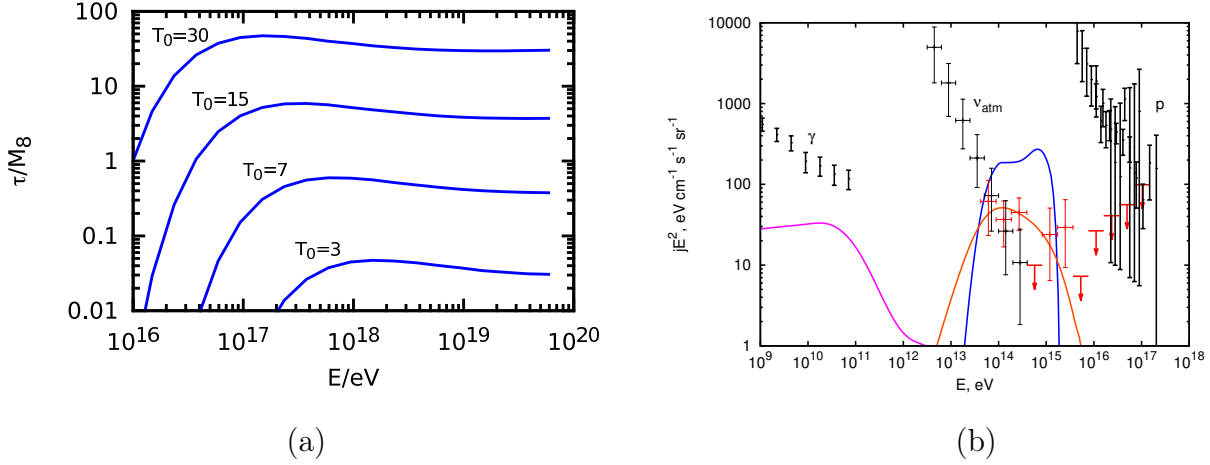


Рис. 5: (a): оптическая толщина, как функция энергии протонов, для нескольких значений $T_0/\text{эВ}$. (b): поток вторичных нейтрино (красная кривая) и гамма-лучей (розовая кривая) от протонов (синяя кривая) с начальным спектром $1/E^2$ и максимальной энергией $E_{max} = 30$ ПэВ при температуре диска $T_0 = 120$ эВ и эволюции источников $\propto (1+z)^3$.

где T_0 задаётся выражением (12), а $F(r)$ равно [52]

$$F(r) = \left(\frac{r_g}{r}\right)^{3/4} \left(1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}}\right)^{1/4}. \quad (14)$$

Здесь $r_g = 2\kappa M$ гравитационный радиус,

$$r_g = 3 \times 10^{13} \left(\frac{M}{10^8 M_\odot}\right) \text{ см},$$

и r_{in} - радиус внутреннего края диска, который связан с радиационной эффективностью:

$$\eta = \frac{3}{2} \int_{r_{in}}^{\infty} r dr F^4(r).$$

Для η предполагается часто используемое в литературе значение $\eta = 0.1$. Оптическая толщина, поделённая на массу чёрной дыры в единицах $10^8 M_\odot$, для протонов,двигающихся вдоль оси диска из точки на расстоянии $z_0 = 2r_g$ от чёрной дыры, приведена на Рис. 5а. Расчёт наблюдаемых

спектров проводится в два этапа. Вначале, с помощью Монте Карло вычислений, рассчитывается спектр нуклонов, фотонов и нейтрино, покидающих источник. Затем результат используется в качестве эффективного спектра инъекции в стандартной задаче с экстрагалактическими источниками. При этом учитывается возможное распределение источников по красному смещению и эффекты, связанные с распространением. Последние, главным образом, сводятся к красному смещению, осцилляциям нейтрино, распаду нейтронов и развитию электромагнитных каскадов на РИ и МФС. Эта процедура проводится с использованием численного кода [12], разработанного автором.

На Рис. 5b приведён пример расчёта спектров вторичных нейтрино, гамма-лучей и протонов от популяции идентичных источников с массой $10^8 M_{\odot}$. Поток нейтрино на графике нормируется с помощью данных IceCube (красные точки). При этом поток вторичного каскадного гамма-излучения не противоречит измерениям диффузного гамма-излучения телескопом Ферми (чёрные точки с меткой " γ "), а вклад протонов от АЯГ в наблюдаемый поток по данным KASCADE-Grande [48] (чёрные точки с меткой " p ") оказывается пренебрежимо мал.

В разделе 4.3 в качестве основного механизма производства гамма-излучения и нейтрино рассматривается взаимодействие космических лучей с газом вблизи источников. При этом предполагается что $p\gamma$ взаимодействиями можно пренебречь. Такая ситуация может реализовываться вблизи чёрных дыр, в случае радиационно неэффективной аккреции. В качестве вероятных источников в разделе рассматриваются радиогалактики с активным ядром Фонарев-Райли I (ФР I) и, в частности, Лацертиды.

Из-за низкого порога pp -взаимодействий вклад в поток астрофизических нейтрино и гамма-лучей в данном механизме дают космические лучи

сравнительно невысоких энергий, а спектр вторичных частиц существенно искажается вследствие диффузии космических лучей вблизи источника. Детали этого процесса зависят от геометрии источника и характера турбулентности магнитного поля. В вычислениях раздела 4.3 предполагается колмогоровский спектр турбулентности. В этом случае время вылета частиц из источника зависит от энергии следующим образом:

$$t_{\text{esc}} = \frac{R}{c} \left(\frac{E}{E_{\text{free}}} \right)^{-1/3} \simeq 5 \times 10^6 \text{ с} \left[\frac{E}{10^{11} \text{ эВ}} \right]^{-1/3}, \quad (15)$$

где для оценки используется размер источника $R = 10^{14}$ см и магнитное поле $B = 10^4$ Гс.

Космические лучи, задержанные в источнике, теряют энергию в pp -взаимодействиях. В случае радиационно неэффективных аккреционных потоков, питающих источники типа ФР I, плотность газа относительно небольшая $n \lesssim 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Время потери энергии протонами

$$t_{pp} = \frac{1}{\kappa \sigma_{pp} n} \simeq 1 \times 10^6 \text{ с} \left(\frac{n}{10^9 \text{ см}^{-3}} \right)^{-1}, \quad (16)$$

где $\sigma_{pp} \sim (3 - 8) \times 10^{-26} \text{ см}^2$ сечение неупругого pp столкновения и $\kappa \simeq 0.6$ средняя доля теряемой в одном столкновении энергии. Время взаимодействия короче, чем время вылета, $t_{\text{esc}} \gtrsim t_{pp}$ для космических лучей с энергией $E < E_{\text{esc}} = 8 \times 10^{12} \text{ эВ}$, где для численной оценки также используется $R = 10^{14}$ см и $B = 10^4$ Гс. Таким образом, космические лучи с энергией порядка 10 ТэВ не успевают покинуть источник. Заметим, однако, что приведённые выше цифры существенно зависят от значений n , B и R , то есть должны рассматриваться лишь как грубая оценка.

Вместо того, чтобы решать частную задачу для некоторой фиксированной геометрии, распределения газа и магнитного поля, в расчётах раздела 4.3 вводится феноменологический свободный параметр E_{esc} , задающий энергию, при которой оптическая толщина источника для протонов,

с учётом диффузионного характера их распространения, становится равной единице. Для первичного спектра инъекции протонов используется степенная форма с обрезанием:

$$\frac{dN_{CR}}{dE} \propto E^{-\alpha_p} \exp\left(-\frac{E}{E_{\text{cut}}}\right). \quad (17)$$

Как и в задаче предыдущего раздела, вычисление проводится в два этапа: на первом рассчитываются спектры частиц, покидающих источник, а на втором проводится интегрирование по распределению источников с учётом взаимодействий космических лучей и электромагнитных каскадов в межгалактической среде.

Для расчёта эффективной сопутствующей плотности источников используется оценка, основанная на наблюдаемой эволюции светимости Лацертид в гамма-лучах:

$$n(z) \propto \int_{L_\gamma^{\min}}^{L_\gamma^{\max}} \rho(z, L_\gamma) L_\gamma dL_\gamma, \quad (18)$$

где для $\rho(z, L_\gamma)$, числа источников на единицу сопутствующего объёма и светимости, использовалась параметризация [53]. Таким образом, предполагается, что светимость в протонах пропорциональна светимости в гамма-лучах. Абсолютная нормировка потока выбрана таким образом, чтобы объяснить протонную часть экстрагалактического потока КЛУВЭ, полученную в рамках так называемой модели 'утечки', предложенной в независимом анализе [54] на основании данных KASCADE Grande и обсерватории им. Пьера Оже по спектру и составу космических лучей с энергией свыше 10 ПэВ.

Результаты вычислений представлены на Рис. 6. По графикам на панелях (а) и (с) видно, что поток фотонов от популяции Лацертид и ФР I мо-

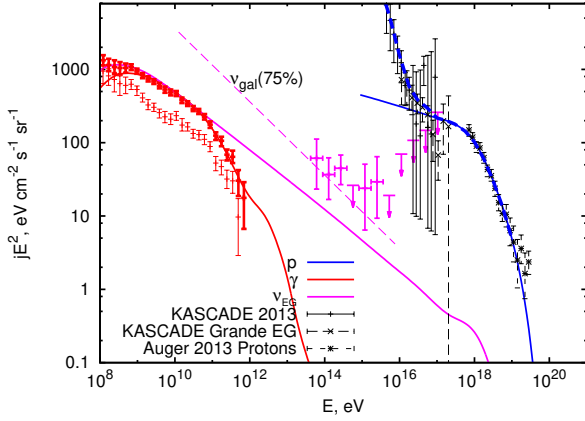
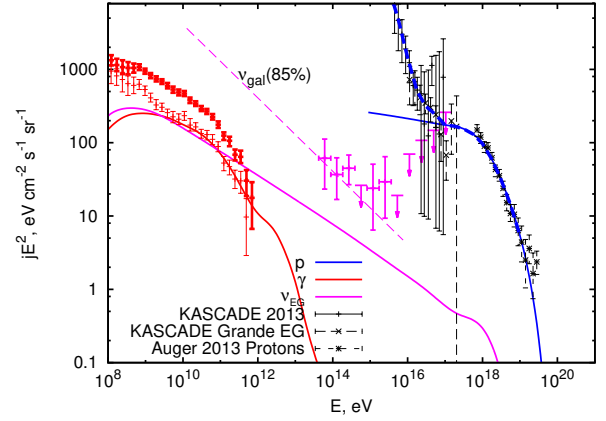
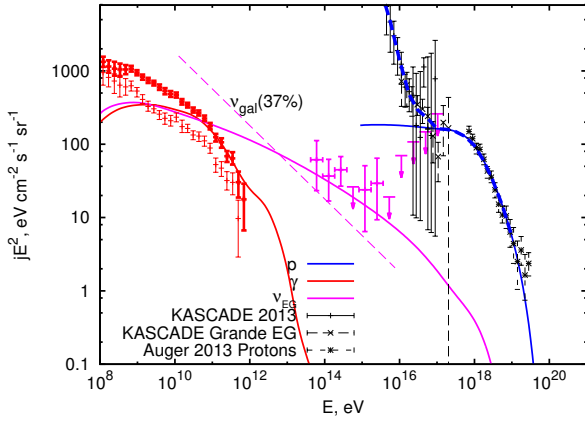
(a) $\alpha_p = 2.17$ и $E_{\text{esc}} = 3 \times 10^{11}$ эВ(b) $\alpha_p = 2.10$ и $E_{\text{esc}} = 3 \times 10^{11}$ эВ(c) $\alpha_p = 2.10$ и $E_{\text{esc}} = 10^{14}$ эВ

Рис. 6: Диффузный поток протонов от Лацертид / ФР I (сплошная синяя кривая), спектр протонной компоненты космических лучей в модели [54] (штриховая синяя кривая), а также вторичный поток фотонов (красная кривая) и нейтрино (розовая кривая). Во всех изображённых моделях $E_{\text{cut}} = 10^{19}$ эВ. Также показаны спектры протонов в KASCADE, KASCADE-Grande [48] и обсерватории им. Пьера Оже (чёрные точки) [55, 56], изотропный и полный поток внегалактических гамма-лучей по данным телескопа Ферми [30] (красные точки) и поток нейтрино сверхвысоких энергий по данным IceCube [57] (розовые точки).

жет полностью объяснить экстрагалактический поток гамма-лучей. Соответствующий выбор параметров будет подразумевать, что основная часть наблюдаемых гамма-лучей с энергией порядка ГэВ-ТэВ имеют адронное происхождение.

Экстрагалактический поток гамма-лучей на Земле обязан своим происхождением генерации в источнике а также развитию электромагнитного каскада на пути к наблюдателю. Если генерация в источнике доминирует или межгалактические магнитные поля достаточно малы (см. главу 3), направление прихода гамма-лучей указывают на их источники.

Для $\alpha_p = 2.1$ и $E_{\text{esc}} = 3 \times 10^{11}$ эВ (панель b), поток фотонов от популяции Лацертид ФР I оказывается на уровне изотропного фона, по измерениям телескопа Ферми [30].

Выбор параметров $\alpha_p = 2.10$ и $E_{\text{esc}} = 10^{14}$ эВ (панель c) позволяет объяснить примерно 60% наблюдаемого в IceCube потока нейтрино. На Рис. 6, штриховые розовые линии показывают требуемый дополнительный поток нейтрино, вероятно галактических, необходимый для того, чтобы полностью объяснить сигнал нейтрино в IceCube. Дополнительный вклад лежит примерно в диапазоне от 40% до 90%, в зависимости от α_p .

Предсказываемый уклон спектра нейтрино, в рассмотренной модели с параметром $\alpha_p \simeq 2.1 - 2.2$ близок к наблюдаемому в IceCube $\alpha_\nu \simeq \alpha_p + \delta \simeq 2.5$ в случае колмогоровской турбулентности, $\delta = 1/3$.

С увеличением объёма данных станет возможным ограничить отношение галактической компоненты потоков нейтрино к внегалактической, путём изучения анизотропии направления прихода. В предложенной модели это отношение сильно зависит от наклона спектра экстрагалактических протонов. Таким образом, определение галактического вклада предоставит информацию о характеристиках внегалактических источников КЛУ-

ВЭ. Результаты четвертой главы опубликованы в работах [13, 14, 22].

В Заключении подводятся итоги работы.

Список публикаций

1. Gelmini G., Kalashev O. E., Semikoz D. V. GZK photons as ultra high energy cosmic rays // *J. Exp. Theor. Phys.* 2008. Vol. 106. P. 1061–1082. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0506128](#).
2. Gelmini G., Kalashev O. E., Semikoz D. V. GZK Photons in the Minimal Ultrahigh Energy Cosmic Rays Model // *Astropart. Phys.* 2007. Vol. 28. P. 390–396. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0702464](#).
3. Arisaka K., Gelmini G. B., Healy M. D. et al. Composition of UHECR and the Pierre Auger Observatory Spectrum // *JCAP*. 2007. Vol. 0712. P. 002. [arXiv:astro-ph/0709.3390](#).
4. Kalashev O. E., Semikoz D. V., Sigl G. Ultra-High Energy Cosmic Rays and the GeV-TeV Diffuse Gamma-Ray Flux // *Phys. Rev.* 2009. Vol. D79. P. 063005. [arXiv:astro-ph/0704.2463](#).
5. Gelmini G. B., Kalashev O. E., Semikoz D. V. GZK Photons Above 10-EeV // *JCAP*. 2007. Vol. 0711. P. 002. [arXiv:astro-ph/0706.2181](#).
6. Demidov S. V., Kalashev O. E. Double Pair Production by Ultra High Energy Cosmic Ray Photons // *J. Exp. Theor. Phys.* 2009. Vol. 108. P. 764–769. [arXiv:astro-ph/0812.0859](#).
7. Essey W., Kalashev O. E., Kusenko A., Beacom J. F. Secondary photons and neutrinos from cosmic rays produced by distant blazars // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104. P. 141102. [arXiv:astro-ph.HE/0912.3976](#).
8. Essey W., Kalashev O., Kusenko A., Beacom J. F. Role of line-of-sight cosmic ray interactions in forming the spectra of distant blazars in TeV

- gamma rays and high-energy neutrinos // *Astrophys. J.* 2011. Vol. 731. P. 51. [arXiv:astro-ph.HE/1011.6340](#).
9. Gelmini G. B., Kalashev O., Semikoz D. V. Gamma-Ray Constraints on Maximum Cosmogenic Neutrino Fluxes and UHECR Source Evolution Models // *JCAP*. 2012. Vol. 1201. P. 044. [arXiv:astro-ph.CO/1107.1672](#).
 10. Kalashev O. E., Kusenko A., Essey W. PeV neutrinos from intergalactic interactions of cosmic rays emitted by active galactic nuclei // *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111, no. 4. P. 041103. [arXiv:astro-ph.HE/1303.0300](#).
 11. Inoue Y., Kalashev O. E., Kusenko A. Prospects for future very high-energy gamma-ray sky survey: impact of secondary gamma rays // *Astropart. Phys.* 2014. Vol. 54. P. 118–124. [arXiv:astro-ph.HE/1308.5710](#).
 12. Kalashev O. E., Kido E. Simulations of Ultra High Energy Cosmic Rays propagation // *J. Exp. Theor. Phys.* 2015. Vol. 120, no. 5. P. 790–797. [arXiv:astro-ph.HE/1406.0735](#).
 13. Kalashev O., Semikoz D., Tkachev I. Neutrinos in IceCube from active galactic nuclei // *J. Exp. Theor. Phys.* 2015. Vol. 120, no. 3. P. 541–548.
 14. Giacinti G., Kachelriess M., Kalashev O. et al. Unified model for cosmic rays above 10^{17} eV and the diffuse gamma-ray and neutrino backgrounds // *Phys. Rev.* 2015. Vol. D92, no. 8. P. 083016. [arXiv:astro-ph.HE/1507.07534](#).
 15. Berezhinsky V., Kalashev O. High-energy electromagnetic cascades in extragalactic space: Physics and features // *Phys. Rev. D.* 2016. — Jul. Vol. 94. P. 023007. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.94.023007>.
 16. Berezhinsky V., Gazizov A., Kalashev O. Cascade photons as test of protons in UHECR // *Astropart. Phys.* 2016. Vol. 84. P. 52–61. [arXiv:astro-ph.HE/1606.09293](#).

17. Kalashev O. E. GZK photons as ultra high energy cosmic rays // New trends in high-energy physics. Proceedings, Summer School and Conference, Jalta, Ukraine, September 10-17, 2005. 2005. P. 170–176.
18. Kalashev O. E., Gelmini G., Semikoz D. [Constraints on secondary 10-100 EeV gamma ray flux in the minimal bottom-up model of Ultra High Energy Cosmic Rays](#) // Proceedings, 30th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2007). Vol. 4. 2007. P. 491–494. [4,491(2007)]. [arXiv:astro-ph/0706.3847](#). URL: <http://inspirehep.net/record/754008/files/arXiv:0706.3847.pdf>.
19. Kalashev O. E. [Secondary neutrinos and multi-TeV photons from distant blazars](#) // Proceedings, 16th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS 2010). 2010. URL: http://quarks.inr.ac.ru/2010/proceedings/www/p2_SM/Kalashev.pdf.
20. Gelmini G. B., Kalashev O., Semikoz D. V. Restrictions on cosmogenic neutrinos and UHECR from Fermi 3 years data // *J. Phys. Conf. Ser.* 2012. Vol. 375. P. 052012.
21. Kido E., Kalashev O. E. [Constraining UHECR source models by the TA SD energy spectrum](#) // Proceedings, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013): Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013. 2013. P. 0136. [arXiv:astro-ph.HE/1310.6093](#). URL: <http://inspirehep.net/record/1261846/files/arXiv:1310.6093.pdf>.
22. Giacinti G., Kachelriess M., Kalashev O. et al. Diffuse CR, neutrino and gamma-ray fluxes from AGNs // *PoS.* 2016. Vol. ICRC2015. P. 1124.
23. Kalashev O. [Constraining Dark Matter and Ultra-High Energy Cosmic Ray Sources with Fermi-LAT Diffuse Gamma Ray Background](#) // 19th International Seminar on High Energy Physics (Quarks 2016) Pushkin, Russia, May 29-June 4, 2016. 2016. [arXiv:astro-ph.HE/1608.07530](#). URL: [http:](http://)

[//inspirehep.net/record/1484150/files/arXiv:1608.07530.pdf](http://inspirehep.net/record/1484150/files/arXiv:1608.07530.pdf).

Цитируемая литература

24. Berezhinskii V. S., Bulanov S. V., Dogiel V. A. et al. Astrophysics of Cosmic Rays. Elsevier, Amsterdam // *Astronomische Nachrichten*. 1990. Vol. 312, no. 6. P. 413–415. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/asna.2113120620>.
25. Inoue Y., Inoue S., Kobayashi M. A. R. et al. Extragalactic Background Light from Hierarchical Galaxy Formation: Gamma-ray Attenuation up to the Epoch of Cosmic Reionization and the First Stars // *Astrophys. J.* 2013. Vol. 768. P. 197. [arXiv:astro-ph.CO/1212.1683](https://arxiv.org/abs/1212.1683).
26. Kneiske T. M., Bretz T., Mannheim K., Hartmann D. H. Implications of cosmological gamma-ray absorption. 2. Modification of gamma-ray spectra // *Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 413. P. 807–815. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0309141](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309141).
27. Kneiske T. M., Dole H. A Lower-Limit Flux for the Extragalactic Background Light // *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 515. P. A19. [arXiv:astro-ph.CO/1001.2132](https://arxiv.org/abs/astro-ph.CO/1001.2132).
28. Ivanov D. et al. TA Spectrum Summary // *PoS*. 2016. Vol. ICRC2015. P. 349.
29. Ishihara A. *Neutrino Astronomy (Rapporteur Talk)* // Proceedings, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015). 2015. [arXiv:astro-ph.HE/1511.03820](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1511.03820). URL: <http://inspirehep.net/record/1404133/files/arXiv:1511.03820.pdf>.
30. Ackermann M. et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV // *Astrophys. J.* 2015. Vol. 799. P. 86.

- [arXiv:astro-ph.HE/1410.3696](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1410.3696).
31. Greisen K. End to the cosmic ray spectrum? // *Phys. Rev. Lett.* 1966. Vol. 16. P. 748–750.
 32. Зацепин Г. Т., Кузьмин В. А. О верхней границе спектра космических лучей // *Письма в ЖЭТФ*. 1966. Vol. 4. P. 78–80.
 33. Glushkov A. V., Gorbunov D. S., Makarov I. T. et al. Constraining the fraction of primary gamma rays at ultra-high energies from the muon data of the Yakutsk extensive-air-shower array // *JETP Lett.* 2007. Vol. 85. P. 131–135. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0701245](https://arxiv.org/abs/astro-ph/astro-ph/0701245).
 34. Bleve C. Updates on the neutrino and photon limits from the Pierre Auger Observatory // *PoS*. 2016. Vol. ICRC2015. P. 1103.
 35. Rubtsov G. Telescope Array search for photons and neutrinos with the surface detector data // *PoS*. 2016. Vol. ICRC2015. P. 331.
 36. Rubtsov G. I. et al. Upper limit on the ultrahigh-energy photon flux from agasa and yakutsk data // *Phys. Rev.* 2006. Vol. D73. P. 063009. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0601449](https://arxiv.org/abs/astro-ph/astro-ph/0601449).
 37. Abbasi R. U. et al. First observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin suppression // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100. P. 101101. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0703099](https://arxiv.org/abs/astro-ph/astro-ph/0703099).
 38. Aartsen M. G. et al. Constraints on ultra-high-energy cosmic ray sources from a search for neutrinos above 10 PeV with IceCube. 2016. [arXiv:astro-ph.HE/1607.05886](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1607.05886).
 39. Kuzmin V. A., Rubakov V. A. Ultrahigh-energy cosmic rays: A Window to postinflationary reheating epoch of the universe? // *Phys. Atom. Nucl.* 1998. Vol. 61. P. 1028. [arXiv:astro-ph/astro-ph/9709187](https://arxiv.org/abs/astro-ph/astro-ph/9709187).
 40. Berezhinsky V., Vilenkin A. Cosmic necklaces and ultrahigh-energy cosmic rays // *Phys. Rev. Lett.* 1997. Vol. 79. P. 5202–5205. [arXiv:astro-ph/astro-ph/9709187](https://arxiv.org/abs/astro-ph/astro-ph/9709187).

- [iv:astro-ph/astro-ph/9704257](#).
41. Aharonian F. et al. Discovery of VHE gamma-rays from the distant BL Lac 1ES 0347-121 // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 473. P. L25–L28. [arXiv:astro-ph/0708.3021](#).
 42. Aharonian F. et al. New constraints on the Mid-IR EBL from the HESS discovery of VHE gamma rays from 1ES 0229+200 // *Astron. Astrophys.* 2007. Vol. 475. P. L9–L13. [arXiv:astro-ph/0709.4584](#).
 43. De Angelis A., Roncadelli M., Mansutti O. Evidence for a new light spin-zero boson from cosmological gamma-ray propagation? // *Phys. Rev.* 2007. Vol. D76. P. 121301. [arXiv:astro-ph/0707.4312](#).
 44. Kifune T. Invariance violation extends the cosmic ray horizon? // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 518. P. L21–L24. [arXiv:astro-ph/astro-ph/9904164](#).
 45. Durrer R., Neronov A. Cosmological Magnetic Fields: Their Generation, Evolution and Observation // *Astron. Astrophys. Rev.* 2013. Vol. 21. P. 62. [arXiv:astro-ph.CO/1303.7121](#).
 46. Neronov A., Vovk I. Evidence for strong extragalactic magnetic fields from Fermi observations of TeV blazars // *Science*. 2010. Vol. 328. P. 73–75. [arXiv:astro-ph.HE/1006.3504](#).
 47. Stecker F. W., Malkan M. A., Scully S. T. Intergalactic photon spectra from the far ir to the uv lyman limit for $0 < Z < 6$ and the optical depth of the universe to high energy gamma-rays // *Astrophys. J.* 2006. Vol. 648. P. 774–783. [arXiv:astro-ph/astro-ph/0510449](#).
 48. Apel W. D. et al. KASCADE-Grande measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays // *Astropart. Phys.* 2013. Vol. 47. P. 54–66. [arXiv:astro-ph.HE/1306.6283](#).
 49. Acharya B. S. et al. Introducing the CTA concept // *Astropart. Phys.* 2013. Vol. 43. P. 3–18.

50. Stecker F. W., Done C., Salamon M. H., Sommers P. High-energy neutrinos from active galactic nuclei // *Phys. Rev. Lett.* 1991. Vol. 66. P. 2697–2700. [Erratum: *Phys. Rev. Lett.*69,2738(1992)].
51. Neronov A. Y., Semikoz D. V., Tkachev I. I. Ultra-High Energy Cosmic Ray production in the polar cap regions of black hole magnetospheres // *New J. Phys.* 2009. Vol. 11. P. 065015. [arXiv:astro-ph/0712.1737](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0712.1737).
52. Shakura N. I., Sunyaev R. A. Black holes in binary systems. Observational appearance // *Astron. Astrophys.* 1973. Vol. 24. P. 337–355.
53. Di Mauro M., Donato F., Lamanna G. et al. Diffuse γ -ray emission from unresolved BL Lac objects // *Astrophys. J.* 2014. Vol. 786. P. 129. [arXiv:astro-ph.HE/1311.5708](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1311.5708).
54. Giacinti G., Kachelriess M., Semikoz D. V. Escape model for Galactic cosmic rays and an early extragalactic transition // *Phys. Rev.* 2015. Vol. D91, no. 8. P. 083009. [arXiv:astro-ph.HE/1502.01608](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1502.01608).
55. Letessier-Selvon A. et al. Highlights from the Pierre Auger Observatory // *Braz. J. Phys.* 2014. Vol. 44. P. 560–570. [1277(2013)]. [arXiv:astro-ph.HE/1310.4620](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1310.4620).
56. Aab A. et al. Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. II. Composition implications // *Phys. Rev.* 2014. Vol. D90, no. 12. P. 122006. [arXiv:astro-ph.HE/1409.5083](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1409.5083).
57. Aartsen M. G. et al. Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data // *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 113. P. 101101. [arXiv:astro-ph.HE/1405.5303](https://arxiv.org/abs/astro-ph.HE/1405.5303).

Калашев Олег Евгеньевич

Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий.
Сопутствующие нейтринные и фотонные излучения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,5 Зак. № 22401 Тираж 100 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а