

ОТЗЫВ

официального оппонента, главного научного сотрудника Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, доктора физико-математических наук, профессора **Стожкова Юрия Ивановича на работу** сотрудника Института ядерных исследований РАН **Рубцова Григория Игоревича «Диффузное излучение от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ и ограничения на новые модели физики элементарных частиц»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Настоящая диссертация посвящена детальному рассмотрению диффузного астрофизического излучения в широкой области энергий и теоретических ограничений на новые модели физики элементарных частиц.

Диффузное излучение представляет собой поток частиц, связанный с масштабными космологическими или астрофизическими процессами, которые сопровождаются выделением большого количества энергии. Этот поток частиц занимает широкий энергетический диапазон от радиоизлучения до высокоэнергичных гамма-квантов. Экспериментальные данные по диффузному излучению дают возможность получить важные ограничения на модели новой физики частиц, на модели происхождения космических лучей ультравысоких энергий. Актуальность темы не вызывает сомнений, о чем свидетельствует широкое обсуждение вышеперечисленных вопросов на многочисленных российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, а также и большое число публикаций по данному направлению в ведущих мировых журналах.

Диссертация включает в себя введение, 4 главы, приложение, список литературы.

Во введении приведено детальное описание экспериментальных данных, используемых в данной работе. Прежде всего это экспериментальные данные космического эксперимента Планк о реликтовом

излучении (РИ, энергии порядка 10^{-4} эВ). Это излучение было образовано на ранней стадии развития Вселенной, когда ее возраст составлял несколько сотен тысяч лет. Нужно отметить высокое качество данных эксперимента Планк. Кроме РИ автор работы указывает на важность инфракрасного и оптического диапазонов, которые играют большую роль в поглощении высокоэнергичного гамма-излучения ($10^{11} - 10^{12}$) эВ. Считается, что это гамма-излучение возникает от далеких звездных объектов – блазаров. Анализ спектров гамма-излучения таких источников приводит к выводу, что поглощение этих квантов при их распространении во Вселенной слабее предсказанного даже в минимальных моделях внегалактического фона.

Объяснение аномальной прозрачности Вселенной предполагает существование новых явлений в астрофизике и физике частиц. Среди актуальных расширений стандартной модели физики частиц заслуживает внимания модель, в которой существуют гипотетические аксионы или аксионоподобные частицы. В этих моделях поглощение высокоэнергичных гамма-квантов подавляется за счет процессов конверсии фотона в аксионоподобные частицы и обратно в астрофизических магнитных полях. Нужно отметить, что аксионоподобные частицы являются возможными кандидатами на роль холодной темной материи.

В области космических лучей ультравысоких энергий $E \geq 10^{19}$ до настоящего времени не удалось обнаружить источник(и) таких частиц. Поэтому была выдвинута идея, что частицы ультравысоких энергий могут быть связаны с распадом частиц сверхтяжелой темной материи. В моделях распада частиц сверхтяжелой темной материи предсказывается значительный поток гамма-квантов с энергией выше 10^{19} эВ. Гамма-кванты таких энергий должны также должны рождаться в результате взаимодействия протонов ультравысоких энергий с РИ (реакция Грейзена – Зацепина - Кузьмина). Однако, в этом случае ожидаемый поток космогенных фотонов будет на

порядок ниже потока фотонов, образованного в моделях распада частиц сверхтяжелой темной материи.

Глава первая посвящена рассмотрению ограничений на модели новой физики частиц из наблюдений РИ. Как уже говорилось выше, данные о РИ получены в эксперименте Планк. Автор дает детальное описание этих экспериментальных данных. Спектр РИ близок к спектру абсолютно-черного тела с температурой 2.725 К. Температура РИ неоднородна по небу, ее среднеквадратичное отклонение составляет около 0.1 мК без учета дипольной компоненты.

Автор исследовал два класса моделей физики частиц:

- часть темной материи составляют гипотетические частицы с дробным электрическим зарядом,
- исследованы наблюдательные следствия модели псевдоконформной Вселенной, которые являются альтернативными моделями инфляционной Вселенной.

Как уже говорилось выше, в первой главе произведено детальное рассмотрение модели, в которой имеются гипотетические частицы-миллизаряженные частицы (МЗЧ) - с дробным электрическим зарядом $e' = \epsilon e$, где e - заряд электрона, а $\epsilon \ll 1$ – безразмерная константа. Эти частицы могли бы быть рождены в ранней Вселенной и составлять сегодня часть холодной темной материи. Взаимодействие МЗЧ с веществом ранней Вселенной может приводить к изменениям в спектре мощности РИ. Автор показывает, что МЗЧ влияет на свойства как ранней, так и поздней Вселенной. Автор получил ограничения на реликтовую плотность МЗЧ, используя данные об РИ. В этой главе получены также ограничения на параметры инфляционной модели ранней Вселенной. Эти ограничения показывают, что МЗЧ могут составить лишь незначительную долю холодной темной материи (не более 1% от плотности темной материи).

Вторая глава посвящена гамма-излучению блазаров и исследованиям моделей с аксионоподобными частицами. Были рассмотрены наиболее энергичные астрономические объекты, которые наблюдаются на космологических расстояниях (красной смещение $z \geq 1$). К таким объектам относятся блазары – активные ядра галактик с близким к лучу наблюдателя релятивистским джетом. Блазары излучают гамма-кванты до энергий 10^{12} эВ и выше. Эти высокоэнергичные гамма-кванты могут рождают электрон-позитронные пары при их взаимодействии с инфракрасным и видимым внегалактическим фоновым излучением (0.1-1) эВ. Как говорилось выше, аксионоподобные частицы являются одним из кандидатов на роль темной материи. Кроме того, они могут объяснить ряд других астрофизических явлений, не описываемых сегодня в рамках стандартных моделей. В частности, с их помощью можно понять корреляцию направлений прихода космических лучей ультравысоких энергий ($\sim 10^{19}$ эВ) с положением лацертид (подкласс блазаров). Эта корреляция была найдена по данным установки HiRes. В этом сценарии блазары окружены крупномасштабными магнитными полями, в которых происходит конверсия гамма-квантов в аксионоподобные частицы. Эта модель предсказывает наличие протяженного гало гамма-лучей вокруг источника.

Автор диссертации рассмотрел очень важный вопрос аномальной прозрачности Вселенной и ее возможное объяснение с помощью аксионов и аксионоподобных частиц.

Во внешних магнитных полях эти гипотетические частицы могут превращаться в фотоны и обратно (если поля достаточно велики, $>10^9$ Гс). В случае слабых магнитных полей, сам процесс конверсии фотонов в аксионоподобные частицы происходит в областях с более сильными магнитными полями вблизи источника, а обратный переход имеет место вблизи наблюдателя. Третьим возможным сценарием является наличие нестандартных астрофизических предположений, например, происходит

дополнительное рождение гамма-квантов. Эти дополнительные гамма-кванты рождаются во взаимодействии с фоновым излучением космических протонов ультравысоких энергий. Предполагается, что последние рождаются в том же источнике, что и гамма-кванты.

В этой же главе получены ограничения на размеры и поток излучения протяженного гало блазара 3C 279. Ограничения получены во время солнечных затмений этого источника (7 затмений в 2008-2014 гг.). Блазар 3C 279 является одним из самых ярких источников гамма-лучей на небе. Впервые получены ограничения на размер возможного гало этого источника (см. рис. 2.4 диссертации).

Во 2-ой главе проведен анализ поглощения гамма-излучения далеких блазаров в межгалактической среде по данным наземных гамма-телескопов и орбитального телескопа Fermi LAT. Восстановлены спектры гамма-квантов, испущенных блазарами, и показано, что эти восстановленные спектры испытывают излом вверх на тех энергиях, при которых становятся существенными эффекты поглощения. Полученные результаты находятся в согласии с предсказанием сценария, в котором фотоны превращаются в аксионоподобные частицы в окрестности источника, а обратная конверсия происходит вблизи наблюдателя. Как уже говорилось выше, далекие источники высокоэнергичного гамма-излучения являются блазарами, принадлежат к классу активных ядер галактик, наблюдаемый релятивистский джет которых направлен на наблюдателя. Автором работы был построен ансамбль источников высокоэнергичных гамма-квантов по данным эксперимента Fermi LAT и из каталога TeVCat. Основным выводом, полученным во 2-ой главе, является обнаружение аномальной прозрачности Вселенной по отношению к высокоэнергичному гамма-излучению. Наблюдаемую аномалию можно полностью описать в рамках модели новой физики, основанной на конверсии фотонов в аксионоподобные частицы в окрестности источника и обратно в нашей Галактике.

Третья глава рассматривает ограничения на модели происхождения космических лучей ультравысоких энергий по данным Якутской установки. В настоящее время имеется несколько экспериментальных установок, регистрирующих космические лучи высоких и ультравысоких энергий. К ним относятся установка ТАЙГА, Якутская установка ШАЛ, Обсерватория им. Пьера Оже, Telescope Array и др. Автор детально проанализировал данные Якутской установки ШАЛ, которая регистрирует частицы с энергиями выше 10^{17} эВ. Детекторы этой установки регистрируют суммарный отклик сцинтилляторов от всех попадающих на него частиц: электронов, фотонов, мюонов и адронов. В ночное время установка регистрирует излучение Вавилова-Черенкова в атмосфере с помощью черенковских детекторов. Кроме того, установка имеет подземный мюонный детектор. Данные мюонного детектора используются для определения типа частицы, которая вызвала ШАЛ.

Несколько слов о моделях происхождения космических лучей ультравысоких энергий. В течение многих десятилетий происхождение космических лучей ультравысоких энергий $E > 10^{18}$ эВ остается неизвестным. Автор рассматривает два класса моделей, которые могли бы объяснить существование таких частиц.

Первый класс – астрофизические модели, в которых заряженные частицы ускоряются в электрических полях источника. При этом должны выполняться некоторые условия, например, так называемый критерий Хилласа. Поэтому класс астрофизических источников включает в себя активные ядра галактик и сверхмассивные черные дыры.

Второй класс моделей основан или на распаде частиц гипотетической сверхтяжелой темной материи или на распаде (аннигиляции) гипотетических топологических дефектов, например, космических струн. В этих классах моделей существенным является тот факт, что они предсказывают различные потоки гамма-квантов ультравысоких энергий. Большинство моделей

второго класса, включающих распады объектов новой физики, дают значительно больший поток гамма-квантов ультравысоких энергий, чем модели первого класса. Кроме того, если будут зарегистрированы фотоны ультравысоких энергий, это позволит уточнить ограничения на параметры нарушения Лоренц-инвариантности.

В настоящее время в эксперименте HiRes получены указания на корреляцию космических частиц с энергиями $E > 10^{19}$ эВ с лацертидами (подкласс активных ядер галактик). Если этот результат будет подтвержден, то для его объяснения может потребоваться введение гипотетических аксионоподобных частиц.

Автору диссертации удалось получить ограничения на поток фотонов с энергией $E > 10^{18}$ эВ, используя данные мюонного телескопа комплексной Якутской установки ШАЛ. Был выполнен большой объем моделирования ШАЛ, вызванных первичными фотонами, и проведено детальное сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Детали отбора данных и параметров моделирования ШАЛ изложены в данной главе. Для моделирования использованы программные пакеты CORSIKA с библиотекой FLUKA, JEANT и другие. Автором установлены наиболее точные к настоящему времени ограничения на поток фотонов в области энергий (10^{18} – 10^{20}) эВ.

Анализ экспериментальных данных и модельных расчетов представленных во 2-ой главе, привел автора работы к выводу, что весь поток космических лучей предельно высоких энергий не может быть объяснен распадом частиц сверхтяжелой темной материи.

Четвертая глава диссертации посвящена космическому излучению ультравысоких энергий по данным Обсерватории Telescope Array. Эта обсерватория – одна из сравнительно новых установок большой площади – включает в себя сцинтилляционные и флуоресцентные детекторы. Одним из

необычных результатов многолетней работы (5 лет наблюдений) этой установки является обнаружение «горячего пятна» - области повышенной плотности событий, которую вызывают ШАЛы с энергиями выше $5.7 \cdot 10^{19}$ эВ. Статистическая достоверность существования «горячего пятна» составляет 3.4 стандартных отклонения для изотропного распределения космических лучей.

В данной главе подробно описаны характеристики Обсерватории Telescope Rray. Автор сравнивает характеристики ШАЛ, которые вызваны адронами и гамма-квантами. Одной из особенностей их различия является то, что ШАЛы, вызванные фотонами, содержат меньше мюонов и обладают большей кривизной фронта, чем события, вызванные адронами. Для рассматриваемых энергий при расчетах был учтен эффект Ландау-Померанчука-Мигдала (дополнительное подавление сечения электромагнитного взаимодействия при энергиях $E > 10^{19}$ эВ).

События, разыгранные методом Монте-Карло, были смоделированы для протонного состава космических лучей и первичных гамма-квантов. Определены условия отбора экспериментальных событий. Проведено детальное рассмотрение статистической значимости «горячего пятна». Если «горячее пятно» не является статистической флуктуацией, то можно предположить, что оно может быть связано с ближайшей группой галактик или с галактической нитью, соединяющей Млечный Путь со Скоплением Девы. Так как принято решение расширить площадь наземной решетки детекторов Обсерватории Telescope Rray в четыре раза, то вопрос о статистической значимости существования «горячего пятна» будет окончательно решен в ближайшие годы.

В данной главе получены наилучшие на настоящее время ограничения на поток фотонов с энергиями выше 10^{19} эВ, выше $10^{19.5}$ эВ и 10^{20} эВ. Выполнено детальное сравнение расчетных и экспериментальных данных Обсерватории Telescope Array, а также сравнение с данными о фотонах,

полученными Обсерваторией им. Пьер Оже. Приведены верхние границы потока фотонов для трех вышеуказанных интервалов энергий.

Основные результаты работы представлены в тексте диссертации и в автореферате и вряд ли целесообразно их повторять в отзыве еще раз.

К недостаткам работы можно отнести небольшое количество опечаток, которые в целом не оказывают влияния на доброту выполненную работу.

Рассматриваемая работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям. В работе получен ряд новых важных результатов, относящихся к космологии, структуре Вселенной и физике частиц.

Автор работы Рубцов Григорий Игоревич является специалистом высокого класса в области теоретической физики и анализа экспериментальных данных. За полученные новые результаты, представленные в диссертации и опубликованные в иностранных и отечественных журналах высокого уровня, а также детально обсужденных на многократных российских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, он достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Главный научный сотрудник ФИАН,

д.ф.-м.н., профессор

Ю.И.Стожков

Подпись Ю.И. Стожкова заверяю

Ученый секретарь ФИАН

к. ф.-м.н.



А.В. Колобов

10 октября 2016 г.