

УТВЕРЖДАЮ

директор ИЗМИРАН

д.ф.-м.н. В.Д. Кузнецов

« 13 » сентября 2016 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации **Рубцова Григория Игоревича** «Диффузное астрофизическое излучение от 10^{-4} эВ до 10^{+20} эВ и ограничения на новые модели физики элементарных частиц», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, библиографии и трех приложений. Она содержит 44 рисунка и 7 таблиц. Общий объем диссертации 200 страниц. Библиография включает 360 наименований. По материалам диссертации опубликовано 25 работ, из них 12 статей в рецензируемых научных журналах, 13 статей в сборниках трудов конференций. Диссертация основана на работах, выполненных автором в ИЯИ РАН (Москва) в 2003-2015 гг. Часть работ выполнена в обсерватории Telescope Array (Юта, США) в рамках международной коллаборации в 2008-2015 гг.

Автор определяет диффузное излучение как поток «астрофизических» частиц (лучше сказать астрофизического происхождения), не исходящих от одного или нескольких источников. Такое излучение обычно связано с масштабными космологическими или астрофизическими процессами, сопровождающимися выделением большой энергии. Во **Введении** на рисунке 1 показан широкий спектр диффузного излучения, регистрируемого соответствующими приборами наблюдений, в корреляции с дальнейшим последовательным изложением в

главах диссертации. Далее Введение включает все необходимые разделы, начиная с актуальности темы исследования, целей и задач диссертационной работы и т. д. по всем пунктам в соответствии с правилами ВАК.

Первая глава диссертации посвящена поиску ограничений на модели новой физики частиц из наблюдений реликтового излучения (РИ). Глава начинается с обзора данных спутника Планк в разделе 1.1. В разделе 1.2 изучаются ограничения на параметры моделей частиц с дробным электрическим зарядом (МЗЧ или миллизаряженные частицы). Напомним, что в конце 90-х годов активно развивалась модель зеркального (скрытого) мира, предсказанного, в частности, струнными моделями $E(8) \times E'(8)$, в которых материя в скрытом секторе (фермионы, бозоны) взаимодействует с материей видимой Вселенной только гравитационно. Ясно, что зеркальная материя могла бы претендовать и на роль холодной темной материей, что мотивировало авторов исследовать ее свойства. Эта модель активно развивалась в работах Зураба Бережиани с соавторами ([105], [106]), причем появление МЗЧ в скрытом секторе рассматривалось и ранее в 80-х годах, например, в работах Окуня, Волошина, Захарова [103]. **Григорий Рубцов** рассматривает модель, включающую скрытый калибровочный сектор с включением «темного фотона» A_μ , кинетически связанного с обычным фотоном в добавочном свободном лагранжиане электромагнитного поля посредством единственной малой безразмерной константы $\epsilon \ll 1$, которая и входит как фактор в определение заряда МЗЧ, $e' = \epsilon e$, где e - заряд электрона. За счет такого малого заряда может возникать электромагнитное взаимодействие МЗЧ с обычной плазмой в ранней Вселенной, которое также зависит от варьируемой неизвестной массы m_χ таких частиц зеркального мира. Ограничения на параметр заряда ϵ и массу m_χ получены из самых разных соображений других исследователей: это прямые эксперименты в Стэнфорде или астрофизические расчеты, например, в работах Раффельта. Что делает **Рубцов**, ограничивая реликтовую плотность МЗЧ по данным РИ в Планк эксперименте? Им решаются кинетические уравнения

релятивистской гидродинамики с учетом возмущений метрики в уравнении Эйнштейна, когда в стандартной Λ CDM модели пространственно плоской Вселенной добавлен один параметр: реликтовая плотность МЗЧ $\Omega_{\text{мзч}} h^2$. Основным результатом раздела 1.2 первой главы в уравнении (1.7), $\Omega_{\text{мзч}} h^2 < 0.001$ (95 % CL), практически исключает вклад такой частицы зеркального мира как кандидата в холодную темную материю: менее 1% от плотности $\Omega_{\text{CDM}} h^2$.

В следующем разделе 1.3 **Рубцов** получает ограничения на параметр самодействия скалярного поля - h в модели псевдоконформной Вселенной с использованием данных эксперимента Планк.

Как известно, одним из предсказаний модели космологической инфляции в режиме медленного скатывания является изотропия скалярных возмущений метрики. Замысел авторов нового сценария инфляции (Рубаков с соавторами) касался возможности учесть возможную статистическую анизотропию (СА) скалярных возмущений, а также негауссовость возмущений температуры РИ на уровне триспектра фазы комплексного скалярного поля, которые могли бы наблюдаться в эксперименте Планк или в крупномасштабных структурах Вселенной. По оценкам автора диссертации [4] детальный анализ триспектра по данным WMAP и Планк позволит ограничить h^2 в сценарии с относительно малой амплитудой СА на уровне $h^2 < 0.01 - 0.1$. Здесь, пожалуй, **следовало бы автору различать обозначения** параметра самодействия скалярного поля h в данном разделе и нормировку h параметра Хаббла $H_0 = 100 h \text{ км сек}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$ в предыдущем разделе 1.2.

Во **второй главе** автором ведется поиск проявлений новой физики на основании данных космической обсерватории Fermi LAT и наземных гамма-телескопов. После краткого введения с известным лагранжианом взаимодействия аксиона с электромагнитным полем в разделе 2.1 в следующем разделе 2.2 рассмотрено распространение гамма-излучения в межгалактической среде.

Как известно, в Стандартной Модели (СМ) ключевым процессом при распространении гамма излучения высоких энергий от далеких внегалактических источников является фоторождение электрон-позитронных пар при рассеянии гамма лучей на фоновом инфракрасном излучении, $\gamma + \gamma_{\text{инфра}} \rightarrow e^+ + e^-$, где существенную роль в распространении фотонов высоких энергий играет оптическая толщина $\tau = n\sigma L$. Здесь L – расстояние от источника до наблюдателя, σ – стандартное СМ сечение аннигиляции фотонов, n – плотность внегалактического инфракрасного излучения. Такая плотность плохо известна, в особенности, на больших красных смещениях. Поэтому в случае большой прозрачности среды для наблюдаемого гамма излучения высоких энергий оптическую толщину $\tau = n\sigma L$ теоретически можно уменьшить двумя путями. Консервативные экспериментаторы предпочитают ориентироваться на процесс аннигиляции фотонов, оставаясь в рамках СМ с заданным сечением, но смело моделируют (уменьшают) плотность инфракрасного фона, а теоретики (в данной диссертации это работы **Рубцова с Троицким**) говорят о новой физике, рассматривая аксионоподобные (пока неоткрытые) частицы (АПЧ), для которых величина сечения мала при слабом взаимодействии (аксиона) с внегалактическим (и галактическим) веществом. Сценарий, действительно, интересен. Помимо того, что аксион — хороший кандидат в темную материю (ТМ), превращение исходного гамма кванта высокой энергии в аксион во внешнем магнитном поле гарантирует высокую прозрачность для такого фотона на пути к Земле, когда в галактическом магнитном поле может произойти обратное превращение аксиона в наблюдаемый фотон. Ясно, что для такого каскада превращений потребуется также знание внегалактического магнитного поля (ВМП). Но это при условии большого ВМП, $B_{\text{ВМП}} > 10^{-9}$ Гаусс, запрещенного известными мерами фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоизлучения (в эксперименте Планк, в частности). Для меньших и допустимых ВМП первое превращение фотона в аксион может произойти в более сильных магнитных полях вблизи источника.

Интересным является полученное ограничение на протяженность гамма-

излучения блазара 3C 279 в разделе диссертации 2.3 из наблюдений его ежегодных затмений Солнцем (сентябрь?). **Рубцовым** с соавторами изучались размеры гало такого блазара, не закрываемого солнечным диском. Здесь остается не совсем ясным прохождение гамма излучения через край диска Солнца при учете магнитного поля солнечной конвективной зоны с временным превращением фотона в аксион вдоль хорды на краю диска Солнца (задача, решавшаяся Троицким с соавторами). Вопрос: насколько это меняет оценки размера гало блазара в работе самого Рубцова?

Восстановление исходного спектра блазара (раздел 2.4.3) базируется на модели Гилмора с соавторами (группа Примака) как модели с наименьшим поглощением, где большинство регистрируемых событий с энергией фотонов $E(\text{ТэВ})$ соответствуют малой оптической толщине $\tau \ll 1$. Если многие модели, включая модель Гилмора [189], имеют совпадения кривых $E(z)$ в настоящее время $z=0$, то это не так для удаленных источников с большими красными смещениями в разных теоретических моделях. **Верна ли модель Гилмора для больших z ?**

В **третьей главе** диссертации изучаются ограничения на модели происхождения космических лучей ультравысоких энергий по данным Якутской установки. До сих пор никто не наблюдал гамма лучи с энергией выше 100 ТэВ. Учитывая что «космогенные» фотоны от распадов нейтральных пионов ультравысоких энергий, превышающих предел Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК) в реакции на реликтовых фотонах $p + \gamma_{2.7 \text{ К}} \rightarrow p + \pi^0$, в принципе могут существовать во Вселенной, можно ожидать, что для протонов соответствующих энергий, регистрация которых вполне реальна в действующих экспериментах, такие фотоны могут быть регистрируемы. Правда, если первичные космические лучи таких энергий это тяжелые ядра, а не протоны, то из-за фото-дезинтеграции ядер на реликтовом излучении такие пионы не образуются и поток фотонов будет резко ограничен сверху.

В разделе 3.3 представлены результаты анализа мюонной компоненты ШАЛ для энергий космических лучей $E > 10^{18}$ эВ, зарегистрированных Якутской установкой. Несколько непонятно сравнение Якутского эксперимента с данными Обсерватории им. Пьера Оже на рисунке 3.8 страницы 99 и рисунке 3.13 на странице 114. Соответственно непонятно сравнение рисунков 5 и 6 автореферата. Если на рисунке 3.13 для энергий $E \geq 10^{18}$ эВ ограничение Оже эксперимента на поток фотонов на порядок лучше ограничения, полученного на Якутской установке, что кажется естественным из-за разного масштаба установок, то на рисунке 3.8, особенно на рисунке 3.7, наоборот, ограничения Якутска лучше ограничений Оже эксперимента. **Как это объяснить?**

В четвертой главе продолжено исследование проблемы происхождения космических лучей сверхвысоких энергий по данным обсерватории Telescope Array (ТА) в штате Юта, в эксперименте, в анализе результатов которого автор диссертации **Г.И. Рубцов** принимал самое непосредственное участие. Эта глава не вызывает каких-либо нареканий и заслуживает самой высокой оценки. По данным наземной решетки ТА установлены ограничения на поток гамма-квантов с энергиями выше 10^{19} эВ, $10^{19.5}$ эВ и 10^{20} эВ. Полученные ограничения совместно с результатами, полученными в предыдущей главе на Якутской установке, указывают на астрофизическое происхождение большей части космических лучей ультравысоких энергий, а не на распады гипотетических сверхтяжелых частиц темной материи.

В области энергий выше 5.7×10^{19} эВ обнаружено «горячее пятно» - область повышенной плотности событий радиусом 20° . Горячее пятно с известными угловыми координатами центра пятна может быть связано с одним или несколькими яркими источниками космических лучей, а его протяженность отклонениями в магнитных полях. В последнем случае это скорее протоны с большим в Z раз чем у ядер (с зарядом Z) ларморовским радиусом. Автор не исключает такой возможности.

В **Заключении** кратко перечисляются полученные результаты и указаны перспективы будущих наблюдений поиска гамма квантов ультравысоких энергий в Обсерватории ТА при расширении наземной решетки в 3-4 раза.

Имеются опечатки . На странице 68 в заголовке раздела 2.4.2 «Построение ансамбля **источников**» в последнем слове должно быть **источников**.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, но также содержит опечатки. Так, на рисунке 4 страницы 21 автореферата по оси абсцисс откладывается логарифм красного смещения z , где для $z=0.1$ указан $\log z=-10$ вместо правильного $\log z=-1.0$, показанного на соответствующем (правильном) рисунке 2.7 самой диссертации, стр. 73. На следующей 22 странице автореферата надо поменять знак неравенства в первой фразе последнего абзаца о величине «...ультравысоких энергий» с меньше ($<$) на больше: $> 10^{18}$ эВ. Выше на этой же 22 странице следовало бы избегать эмоционального литературного словосочетания «...в высшей части темного (?) энергетического диапазона...».

Несмотря на отмеченные выше недостатки: путаница обозначений (разделы 1.2 и 1.3), некоторые опечатки, работа Г.И. Рубцова производит самое положительное впечатление и заслуживает высокой оценки. Автор многое проделал лично сам, используя сложные коды программ в своих вычислениях, наконец, он участник ТА эксперимента, где часть работ была выполнена с зарубежными коллегами. Его высокий профессиональный уровень не вызывает сомнений.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого

постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Рубцов Григорий Игоревич**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составлен доктором физ.-мат. наук В.Б. Семикозом

Отзыв обсуждался и одобрен на общеинститутском теоретическом семинаре 12 сентября 2016 г.

Заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН,

доктор физ.-мат. наук



В.Б. Семикоз

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

142190 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, дом 4, ИЗМИРАН
Тел. 8(495) 851-01-20, e-mail: semikoz@yandex.ru