

На правах рукописи

СЕРГИЕНКО
Андрей Валентинович

**Электрослабые и нестандартные процессы
при сверхвысоких энергиях и их возможные
проявления в астрофизике и космологии**

Специальность: 01.04.02 – теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре теоретической физики
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
профессор А.В. Кузнецов (ЯрГУ, Ярославль)

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор В.Б. Семикоз (ИЗМИРАН, Москва)

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Д.С. Горбунов (ИЯИ РАН, Москва)

Ведущая организация:

МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится «_____» _____ 201__ г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института ядер-
ных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу:
117312, Москва, В-312, проспект 60-летия октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН,
г. Москва.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

Б.А. Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Астрофизические и космологические наблюдения и оценки играют в последние десятилетия все более заметную роль в изучении физических свойств известных и гипотетических частиц и их взаимодействий. «Небесные лаборатории» существенно дополняют наземные ускорительные и неускорительные эксперименты, особенно в области физики слабо взаимодействующих элементарных частиц. Среди них нейтрино — одна из интереснейших частиц. Астрофизика и космология играют фундаментальную роль в физике нейтрино, поскольку свойства звёзд и Вселенной в целом дают некоторые из наиболее сильных ограничений на нестандартные свойства этих трудноуловимых частиц.

Данное исследование проведено на стыке квантовой теории поля, астрофизики и космологии — перспективных тесно связанных друг с другом направлений современной физики. В Стандартной модели нейтрино приписываются самые минимальные свойства, которые согласуются с экспериментальными данными: нулевые масса, электрический заряд, дипольные электрический и магнитный моменты, вероятность распада — почти все физические характеристики считаются равными нулю. Это простая картина, и любое отклонение от неё будет чувствительным инструментом для проверки физики за пределами Стандартной модели. Поэтому столь привлекательны исследования по поискам масс нейтрино и их смешивания (в том числе эксперименты по обнаружению и подтверждению осцилляций нейтрино), по распадам нейтрино, по их электромагнитным свойствам.

И даже наделённые «минимальными» характеристиками нейтрино играют важную роль в астрофизике, так как энергетические потери в звёздах по современным представлениям определяются в основном нейтринными потерями благодаря их слабому взаимодействию с веществом. Кроме того, по этой же причине они оказываются основным действующим элементом в термальной и динамической эволюции как сверхновых, так и Вселенной в целом. Это объясняется тем, что слабо взаимодействующие нейтрино достигают термального равновесия в двух возможных физически интересных случаях: в ранней Вселенной незадолго до эпохи нуклеосинтеза и в ядре сверхновой за несколько секунд до коллапса. Таким образом, в силу указанных причин задачи изучения квантовых процессов с участием таких слабо взаимодействующих частиц (как известных, так и гипотетических: нейтрино — стандартных и нестандартных; голдстоуновских и псевдоголдстоуновских бозонов: аксионов, майоронов, фамилонов; WIMPs) в астрофизических условиях представляют большой интерес: за счёт слабого взаимодействия с веществом они могут сильно влиять на энергетику астрофизических процессов, а включение нестандартных свойств может существенно менять ход этих процессов, что может быть обнаружено в наблюдениях.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании процессов с участием слабо взаимодействующих частиц сверхвысоких энергий во внешней активной среде, запрещённых или сильно подавленных в стандартной модели, которые становятся возможными при выходе за рамки стандартной модели, а также их возможных проявлений в астрофизике и космологии.

Научная новизна результатов.

Предметом исследований нового направления в физике – астрофизики элементарных частиц, зародившейся на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии и бурно развивающейся в последние десятилетия, являются элементарные процессы в экстремальных физических условиях, которые характерны для астрофизических объектов и не могут быть реализованы в современных лабораторных условиях. Исследования такого рода, с одной стороны, представляют интерес с концептуальной точки зрения, поскольку они открывают новые нетривиальные свойства частиц. С другой стороны, они интересны с точки зрения возможных астрофизических и космологических приложений, поскольку теоретический анализ в совокупности с имеющимися экспериментальными данными и численным моделированием астрофизических процессов позволяет изучать недоступные прямому экспериментальному исследованию фундаментальные основы строения материи, в том числе и на ранней стадии развития Вселенной. Полученная в диссертации оценка величины порога обрезания нейтринного энергетического спектра при распространении нейтрино ультравысоких энергий в сильном магнитном поле магнитара и её зависимость от интенсивности поля актуальна в связи с недавней регистрацией и изучением на нейтринном телескопе IceCube космических нейтрино ультравысоких энергий, порядка 1 ПэВ и выше, поскольку вылет таких нейтрино из магнитаров не может быть адекватно описан без учета их взаимодействия с сильным магнитным полем, приводящего к распаду нейтрино ультравысоких энергий на электрон и W -бозон. Полученные в диссертации оценки нижней границы массы лептокварка и других параметров модели с кварк-лептонной симметрией, основанные на обнов-

лейных и улучшенных экспериментальных данных по распадам мезонов, сильно подавленным или запрещённым в стандартной модели, с учетом всех возможных типов фермионного смешивания, актуальны в связи с постоянными поисками возможных обобщений стандартной модели элементарных частиц. Полученные в диссертации ограничения на параметры модели УФ-стабильной фантомной тёмной энергии с учётом эволюции возмущений метрики, обнаружение тахионных нестабильностей при больших длинах волн и экспоненциального роста со временем как тахионных мод, так и возмущений метрики, начиная с очень маленьких величин, определяемых вакуумными флуктуациями, и вплоть до их значительного роста при поздних временах, актуальны в связи с интенсивно ведущимися исследованиями по построению самосогласованной космологической модели как ранней, так и современной Вселенной.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Вычисление вероятности распада нейтрино ультравысоких энергий $\nu \rightarrow e^- W^+$ во внешних магнитных полях, присутствующих на поверхности магнитара. Построение зависимости порога обрезания нейтринного спектра энергий от напряжённости внешнего магнитного поля.
2. Теоретическое рассмотрение третьего типа фермионного смешивания при взаимодействии лептокварков Пати-Салама с кварками и лептонами. Получение косвенных ограничений на массу лептокварка Пати-Салама.
3. Изучение эволюции гравитационного потенциала в модели ультрафиолетово-стабильной фантомной тёмной энергии, имеющей тахионные нестабильности в инфракрасной области.

Практическая ценность работы. Полученная оценка величины порога обрезания нейтринного энергетического спектра при распространении нейтрино ультравысоких энергий в сильном магнитном поле магнитара должна учитываться при обработке данных по регистрации на нейтринном телескопе IceCube космических нейтрино ультравысоких энергий, порядка 1 ПэВ и выше, поскольку вылет таких нейтрино из магнитаров не может быть адекватно описан без учёта их взаимодействия с сильным магнитным полем, приводящего к распаду нейтрино ультравысоких энергий на электрон и W -бозон. Полученные в диссертации оценки нижней границы массы лептокварка и других параметров модели с кварк-лептонной симметрией, основанные на обновлённых и улучшенных экспериментальных данных по распадам мезонов, сильно подавленным или запрещённым в стандартной модели, с учётом всех возможных типов фермионного смешивания, могут быть предложены составителям Международных таблиц свойств элементарных частиц (Review of Particle Physics) для включения в очередное издание 2014 года. Полученные в диссертации ограничения на параметры модели УФ-стабильной фантомной тёмной энергии с учетом эволюции возмущений метрики, обнаружение тахионных нестабильностей при больших длинах волн и экспоненциального роста со временем как тахионных мод, так и возмущений метрики, начиная с очень маленьких величин, определяемых вакуумными флуктуациями, и вплоть до их значительного роста при поздних временах, могут быть использованы в исследованиях по построению самосогласованной космологической модели как ранней, так и современной Вселенной.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- XVI Международный семинар “Кварки’2010”, Коломна Московской обл., 6-12 июня 2010 г.
- XVII Международный семинар “Кварки’2012”, Ярославль, 4-10 июня 2012 г.
- Научная сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», Москва, МИФИ, 11-16 ноября 2012 г.
- Научный семинар Лаборатории теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (Дубна)
- Научный семинар по гравитации и космологии им. А.Л. Зельманова в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова
- Научный семинар кафедры теоретической физики ЯрГУ им. П.Г. Демидова.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в числе которых 3 статьи – в ведущих рецензируемых российских и международных журналах и 2 статьи в материалах международных научных конференций. Список работ приведён в конце автореферата.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Она содержит два приложения, пять рисунков, пять таблиц. Список цитируемой литературы включает 231 наименование. Общий объём диссертации составляет 106 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность проблемы исследования процессов с участием слабо взаимодействующих частиц сверхвысоких энергий во внешней активной среде, запрещённых или сильно подавленных в стандартной модели, которые становятся возможными при выходе за рамки стандартной модели, а также их возможных проявлений в астрофизике и космологии. Сделан обзор литературы по данной тематике. Сформулирована цель работы. Кратко изложено содержание глав диссертации.

Первая глава посвящена исследованию процесса распада нейтрино ультравысоких энергий $\nu \rightarrow e^- W^+$ в сильном магнитном поле магнитара.

В первом параграфе даётся обзор работ, в которых исследовались дисперсионные свойства нейтрино во внешнем магнитном поле.

Во втором параграфе определяется собственно-энергетический оператор нейтрино и дополнительная энергия, приобретаемая нейтрино во внешнем магнитном поле. Из собственно-энергетического оператора также можно извлечь мнимую часть собственной энергии нейтрино в среде, определяющую вероятность распада нейтрино на W^+ -бозон и заряженный лептон.

В третьем параграфе определяются пропагаторы заряженного лептона, W -бозона и нефизического заряженного скалярного Φ -бозона, необходимость учитывать вклад от которого появляется при работе в фейнмановской калибровке.

В четвёртом параграфе описывается вычисление вероятности распада нейтрино с поперечным по отношению к магнитному полю импульсом $p_{\perp} \gtrsim m_W$ и $p_{\perp} \gg m_W$ на электрон и W^+ -бозон во внешнем магнитном поле $B_e \ll B \ll B_W$ ($B_e = \frac{m_e^2}{e} = 4.41 \cdot 10^{13}$ Гс, $B_W = \frac{m_W^2}{e} = 1.09 \cdot 10^{24}$ Гс). Вероятность процесса может быть представлена в виде

$$w(\nu \rightarrow e^- W^+) = \frac{G_F (eB)^{3/2} p_{\perp}}{\pi \sqrt{2\pi} E} \Phi(\eta), \quad (1)$$

где $\Phi(\eta)$ – функция только одного безразмерного параметра $\eta = 4eBp_{\perp}^2/m_W^4$. Эта формула справедлива в широкой области значений параметра η : $0 < \eta \ll m_W^2/(eB)$. Функция $\Phi(\eta)$ может быть существенно упрощена при больших и малых значениях аргумента. В пределе $\eta \gg 1$

$$\Phi(\eta \gg 1) \simeq \frac{1}{3} \sqrt{\pi(\eta - 0.3)}, \quad (2)$$

при этом ошибка составляет менее 1 % для $\eta > 10$. В другом пределе $\eta \ll 1$

$$\Phi(\eta \ll 1) \simeq \exp\left(-\frac{1}{\eta}\right) \left(1 - \frac{1}{2}\eta + \frac{3}{4}\eta^2\right) \quad (3)$$

с ошибкой менее 1 % для $\eta < 0.5$.

В пятом параграфе строится зависимость порога обрезания нейтринного спектра энергий от напряжённости внешнего магнитного поля в интервале значений $10^{-2}B_e \lesssim B \lesssim 10^4 B_e$ при фиксированной средней длине свободного пробега нейтрино $\lambda = 1$ км (Рис. 1). Энергия обрезания $E_c = 10^{15}$

эВ соответствует значению поля $B \simeq 5B_e \simeq 2.2 \times 10^{14}$ Гс. Канал распада $\nu \rightarrow e^- W^+$ является доминирующим. Нейтрино с $E > E_c$ не вылетят из сильного магнитного поля магнитара.

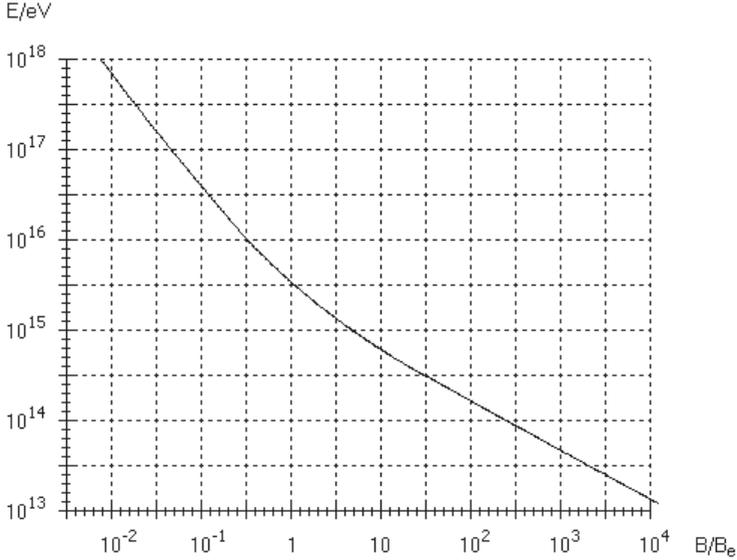


Рис. 1: Зависимость энергии обрезания E_c (эВ) для спектра нейтрино от интенсивности магнитного поля по отношению к критическому полю при фиксированной средней длине свободного пробега нейтрино $\lambda = 1$ км.

Вторая глава посвящена исследованию низкоэнергетических проявлений возможного минимального расширения электрослабой стандартной модели, основанного на кварк-лептонной симметрии типа Пати-Салама $SU(4)_V \otimes SU(2)_L \otimes G_R$. Масштаб нарушения $SU(4)_V$ -симметрии до $SU(3)_c$ – это масса лептокварка M_X .

В первом параграфе даётся обзор работ, в которых исследовались проявления теории Пати-Салама.

Во втором параграфе показывается, что для перенормируемости теории Пати-Салама необходимо рассматривать третий тип смешивания во взаимодействиях $SU(4)_V$ -лептокварков с кварками и лептонами. Матрицы смешивания во взаимодействиях $SU(4)_V$ -лептокварков с верхними фермионами \mathcal{U} и нижними фермионами \mathcal{D} связаны единственным условием с известной матрицей смешивания кварков (Кабиббо-Кобаяши-Маскава) V :

$$\mathcal{U}^\dagger \mathcal{D} = V. \quad (4)$$

В третьем параграфе приводится эффективный лагранжиан взаимодействия векторных лептокварков Пати-Салама с кварками и лептонами с учётом КХД-поправок.

В четвёртом параграфе исследуются вклады от взаимодействия с лептокварками в низкоэнергетические редкие процессы, запрещённые или сильно подавленные в стандартной модели. Исходя из этого, получаются косвенные ограничения на массу векторного лептокварка и параметры смешивания. Рассматриваются лептонные распады нейтральных и заряженных π -, K -, B -мезонов, а также τ -лептона и μe -конверсия на титане.

В пятом параграфе получается комбинированное ограничение на массу лептокварка. Все ограничения, полученные из распадов π -, K -, B -мезонов, τ -лептона и μe -конверсии на титане, содержат элементы неизвестных унитарных матриц смешивания \mathcal{U} и \mathcal{D} . Дополнительная свобода в выборе параметров смешивания позволяет значительно уменьшить (от тысяч и сотен ТэВ до десятков) нижний предел на массу векторного лептокварка. Комбинированное ограничение на массу лептокварка:

$$M_X > 39 \text{ ТэВ}. \quad (5)$$

В шестом параграфе рассматривается случай различных смешиваний для левых и правых фермионов. Комбинированное ограничение на массу векторного лептокварка:

$$M_X > 41 \text{ ТэВ.} \quad (6)$$

В седьмом параграфе рассматривается процесс, в котором нижний предел на массу векторного лептокварка не зависит от параметров смешивания: $\pi \rightarrow \nu\bar{\nu}$. В стандартной модели вероятность этого процесса подавлена фактором m_ν^2 , однако он может идти также через обмен лептокварком. Нижний предел на массу векторного лептокварка:

$$M_X > 0.6 \text{ ТэВ.} \quad (7)$$

Третья глава посвящена изучению эволюции гравитационного потенциала в модели УФ-стабильной фантомной тёмной энергии, имеющей тахионные нестабильности в ИК-области.

В первом параграфе даётся обзор работ, в которых исследовались модели фантома с УФ-стабильным поведением.

Во втором параграфе представляется модель УФ-стабильной фантомной тёмной энергии. Модель представляет собой эйнштейновскую гравитацию, взаимодействующую с одним векторным и одним скалярным полями. При $z \sim 1$ тёмная энергия типа квинтэссенции, а позже становится фантомом.

В третьем параграфе решается система линеаризованных уравнений для возмущений полей метрики и тёмной энергии. В лидирующем порядке ВКБ-приближения по малым параметрам модели система не включает гравитационный потенциал. Система имеет тахионную моду в ИК-области.

В четвёртом параграфе выясняется, что так же как и возмущения полей тёмной энергии, имеющие тахионную природу, скалярные возмущения метрики экспоненциально растут со временем, начиная с очень маленьких значений, определяемых вакуумными флуктуациями на масштабе малых импульсов $H_0 \ll P_c \lesssim \epsilon$, но они могут в конечном счёте стать большими.

В пятом параграфе выводится ограничение на параметры модели. Требуя, чтобы $\Phi \ll 1$ в настоящее время, мы получаем:

$$H_0 \ll \epsilon \lesssim 280H_0,$$

где H_0 – современное значение параметра Хаббла.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

В **приложении А** подробно описывается вычисление вероятности распада нейтрино с поперечным по отношению к магнитному полю импульсом $p_\perp \gtrsim m_W$ и $p_\perp \gg m_W$ на электрон и W^+ -бозон во внешнем магнитном поле $B_e \ll B \ll B_W$ ($B_e = \frac{m_e^2}{e} = 4.41 \cdot 10^{13}$ Гс, $B_W = \frac{m_W^2}{e} = 1.09 \cdot 10^{24}$ Гс).

В **приложении Б** выводятся линеаризованные уравнения для возмущений полей метрики и тёмной энергии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Вычислена вероятность распада нейтрино с поперечным по отношению к магнитному полю импульсом $p_\perp \gtrsim m_W$ или $p_\perp \gg m_W$ на электрон и W^+ -бозон во внешнем магнитном поле $B_e \ll B \ll B_W$ ($B_e = \frac{m_e^2}{e} = 4.41 \cdot 10^{13}$ Гс, $B_W = \frac{m_W^2}{e} = 1.09 \cdot 10^{24}$ Гс). Построена зависимость порога обрезания нейтринного спектра энергий от на-

пряжённости внешнего магнитного поля в интервале значений $10^{-2}B_e \lesssim B \lesssim 10^4 B_e$ при фиксированной средней длине свободного пробега нейтрино $\lambda = 1$ км. Энергия обрезания $E_c = 1$ ПэВ соответствует значению поля $B \simeq 5B_e \simeq 2.2 \times 10^{14}$ Гс.

2. Рассмотрено возможное минимальное расширение электрослабой стандартной модели, основанное на кварк-лептонной симметрии типа Пати-Салама $SU(4)_V \otimes SU(2)_L \otimes G_R$. Показано, что для перенормируемости теории Пати-Салама необходимо рассматривать третий тип смешивания во взаимодействиях $SU(4)_V$ -лептокварков с кварками и лептонами. Дополнительная свобода в выборе параметров смешивания позволяет значительно уменьшить нижний предел на массу векторного лептокварка, получаемый из низкоэнергетических редких процессов, запрещённых или сильно подавленных в стандартной модели.
3. Рассмотрена модель УФ-стабильной фантомной тёмной энергии, имеющей тахионные нестабильности в ИК-области. Показано, что так же как и тахионные моды, возмущения метрики экспоненциально растут со временем, начиная с очень маленьких значений, определяемых квантовой физикой вакуумных флуктуаций, и могут стать значительными при поздних временах. Получено ограничение на параметры модели, которое следует из требования, что амплитуды возмущений метрики не слишком большие сегодня.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации представлены в статьях:

1. Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Serghienko A. V. High energy neutrino absorption by W production in a strong magnetic field // Physics Letters B. 2010. Vol. 690, No. 4. P. 386–389.
2. Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Сергиенко А.В. Распад нейтрино ультравысоких энергий на электрон и W -бозон в магнитном поле и его влияние на форму нейтринного спектра // Вестник ЯргУ. Серия: Естественные и технические науки. 2010. № 2. С. 12-18.
3. Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Serghienko A. V. A decay of the ultra-high-energy neutrino $\nu_e \rightarrow e^-W^+$ in a magnetic field and its influence on the shape of the neutrino spectrum // In: Proceedings of the 16th International Seminar “Quarks’2010”, Kolomna, Moscow Region, Russia, June 6-12, 2010. Eds. V.A. Matveev e.a. V. 1. P. 282-289 [arXiv:1010.0582 (hep-ph)].
4. Kuznetsov A.V., Mikheev N.V., Serghienko A.V. The third type of fermion mixing in the lepton and quark interactions with leptoquarks // Int. J. Mod. Phys. A 2012. V. 27. No. 11. P. 1250062.
5. Kuznetsov A.V., Mikheev N.V., Serghienko A.V. The third type of fermion mixing and indirect limits on the Pati–Salam leptoquark mass // In: Proceedings of the 17th International Seminar “Quarks’2012”, Yaroslavl, Russia, June 4-10, 2012 (submitted) [arXiv:1210.3697 (hep-ph)].
6. Сергиенко А.В., Рубаков В.А. Фантомная тёмная энергия с тахионными нестабильностями: возмущения метрики // Теор. мат. физ. 2012. Т. 173. № 3. С. 441-452.