

Отзыв научного консультанта

на диссертацию Румянцева Дмитрия Александровича «Резонансные электрослабые процессы в замагниченной плазме», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Диссертация «Резонансные электрослабые процессы в замагниченной плазме» выполнена на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Диссертация посвящена исследованию квантовых процессов с участием нейтрино, фотонов и аксионов во внешней активной среде с учётом возможных резонансных эффектов.

Прежде всего, следует отметить несомненную актуальность избранной темы. Детальный анализ электрослабых процессов с участием нейтрино, фотонов и аксионов в экстремальных физических условиях сильного магнитного поля и плотной плазмы, а также исследование их возможных приложений необходимы при расчёте динамики остывания нейтронных звёзд, для решения задач самосогласованного описания процесса генерации радиоизлучения в магнитосферах радиопульсаров и магнитаров, в ряде других задач астрофизики и космологии.

Диссертация Д.А. Румянцева состоит из введения, пяти глав основного текста, заключения, пяти приложений и подробного библиографического списка, включающего 218 наименований.

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, охарактеризовано состояние проблемы, изложена история изучения электрослабых процессов в замагниченной плазме, показана значимость полученных результатов для астрофизических приложений.

Первая глава посвящена исследованию обобщенного комптоноподобного процесса $j f \rightarrow j' f'$, где f и f' – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау, j и j' – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов, в постоянном однородном магнитном поле. Впервые получены наиболее общие выражения для амплитуд данного процесса, представленные в явном калибровочно- и лоренц-инвариантном виде. Рассмотрены частные случаи сверхсильного магнитного поля, когда все фермионы (реальные и виртуальные) занимают основной уровень Ландау, и когерентного рассеяния тока j «вперед» без изменения состояний фермионов. Последний результат позволяет обобщить имеющиеся в литературе выражения для амплитуд перехода $j f \rightarrow j' f'$ в магнитном поле на случай замагниченной плазмы с произвольными соотношениями параметров.

Вторая глава посвящена процессу комптоновского рассеяния в сильно замагниченной плазме, когда начальный и конечный электроны (позитроны) находятся на основном уровне Ландау. Детально проанализированы дисперсионные и поляризационные свойства фотонов, находящихся в равновесии с сильно замагниченной плазмой. Рассмотрены два частных случая зарядово симметричной и зарядово несимметричной плазмы. Показано, что, вследствие наличия в плазме собственных колебаний для фотона моды 2 возможна ситуация, когда в определённой кинематической области этот фотон может иметь положительное значение квадрата эффективной массы. В результате может существенно измениться кинематика различных фотонных процессов. В частности, наличие плазменной частоты приводит к возникновению порога для каналов рассеяния фотона моды 2 на электронах и позитронах плазмы, который отсутствует в чистом магнитном поле. Кроме того, открывается новый канал расщепления фотона, запрещённый в чистом магнитном поле. На основе правил отбора по поляризациям фотонов получены парциальные амплитуды для разрешённых каналов рассеяния в пределе сильного магнитного поля. Получены выражения для коэффициентов поглощения в сильно замагниченной плазме в двух предельных случаях разреженной зарядово-симметричной и вырожденной плазмы с учётом

дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов. Продемонстрировано, что в непосредственной близости от порога рождения пар становится важным учёт дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов, что и определяет в конечном итоге зависимость коэффициентов поглощения от значений энергии, температуры и магнитного поля.

В третьей главе проведён детальный анализ процессов расщепления фотона на два фотона и слияния двух фотонов в сильно замагниченной среде, включая исследование дисперсионных свойств фотона в поле и плазме, а также возможные астрофизические проявления этих процессов. Вычислена амплитуда расщепления фотона в сильном магнитном поле и плазме в общем случае ненулевого химического потенциала и температуры. Проанализирована кинематика процесса, исследованы изменения правил отбора по поляризациям фотонов по сравнению с ситуацией чистого магнитного поля в отсутствие плазмы. Выполнен численный анализ вероятностей изменения состояния фотона для кинематически разрешённых каналов расщепления и слияния с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов в случае, когда начальный фотон распространяется под произвольным углом по отношению к направлению магнитного поля. Получены относительно простые выражения для вероятностей расщепления фотона по каналам $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2 \gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1 \gamma_2$ в предельных случаях низких и относительно высоких энергий начального фотона. Анализ показал, что присутствие плазмы, с одной стороны, существенно образом изменяет правила отбора по поляризациям по сравнению со случаем чистого магнитного поля, а с другой стороны из численных расчетов и полученных асимптотических формул следует, что горячая плазма оказывает подавляющее влияние на каналы $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1 \gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2 \gamma_2$. Тем не менее, как оказалось, холодная зарядово-симметричная плазма в сочетании с сильным магнитным полем способна усилить вероятность расщепления по этим каналам по сравнению с чистым магнитным полем. Вычислена вероятность расщепления фотона по новому каналу, $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1 \gamma_1$, запрещённому в чистом магнитном поле. Обсуждаются возможные астрофизические приложения результатов, продемонстрирована важность учёта дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов в задаче переноса излучения. Показано, что использовавшееся ранее в литературе приближение вообще не применимо к ситуации горячей плазмы.

В четвёртой главе приведены результаты исследования фотон-нейтринных процессов $\gamma e^\pm \rightarrow \gamma e^\pm \nu \bar{\nu}$, $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$ и $\gamma \gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$ в рамках стандартной модели, в приложении к физике магнитаров. Вычислены инвариантные амплитуды указанных реакций в сильно замагниченной плазме и выполнен детальный расчёт энергии, уносимой нейтрино из единицы объёма за единицу времени за счёт этих реакций в рамках условий, реализуемых в наружной части коры замагниченной нейтронной звезды и с учётом возможного изменения дисперсионных и поляризационных свойств фотонов в таких условиях. Получены выражения для светимости фотонейтринного процесса в случаях нерелятивистской и релятивистской плазмы, при произвольном соотношении между плазменной частотой и температурой. Для процесса $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$ в приближении нерелятивистской плазмы получены простые выражения для его вклада в нейтринную излучательную способность в предельных случаях относительно высоких и низких температур. Показано, что в случае холодной плазмы вклад в нейтринную излучательную способность процесса $\gamma \gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$ будет сильно подавлен по сравнению со вкладами фотонейтринного процесса и процесса конверсии фотона, $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$. На основе анализа возможной модификации кривой охлаждения нейтронной звезды за счёт изменения нейтринной светимости в сильном магнитном поле обосновано предположение об ограничении на величину индукции магнитного поля во внешней коре магнитара, $B < 10^{15}$ Гс.

В пятой главе приведены результаты исследования резонансных процессов в замагниченной среде. В рамках квантовой электродинамики рассматриваются два возможных типа резонансов: на виртуальном фотоне и виртуальном электроны, которые могут давать основной вклад в физически наблюдаемые характеристики, такие, как

светимость и число рождаемых частиц. Исследован процесс резонансного фоторождения аксионов на заряженных компонентах среды, когда резонансный эффект реализуется на виртуальном фотоне. Показано, что аксионная светимость в области резонанса за счёт всевозможных реакций с участием частиц среды однозначно выражается через светимость перехода фотон \rightarrow аксион. Найдено число аксионов, рождаемых равновесным реликтовым излучением в единице объёма магнитосферы магнитара за единицу времени. Показано, что, в противоположность сделанным ранее в литературе выводам, рассмотренный резонансный механизм не эффективен для производства холодной скрытой массы. Исследован случай резонанса на виртуальном фермионе в обобщенном комптоноподобном процессе $j f \rightarrow j' f'$. В качестве приложения рассмотрены реакции $\gamma e \rightarrow \gamma e$ и $\gamma e \rightarrow \nu \bar{\nu} e$ с учетом возможного резонанса на виртуальном электроне. Получен коэффициент поглощения фотона в процессе $\gamma e \rightarrow \gamma e$, представленный в простой аналитической форме, удобной для дальнейшего использования при решении задачи переноса излучения. Получено выражение для нейтринной светимости за счет реакции $\gamma e \rightarrow \nu \bar{\nu} e$. Показано, что в случае резонанса на виртуальном электроне нейтринная светимость, обусловленная данным процессом, может быть выражена через нейтринную светимость, обусловленную процессом $e \rightarrow e \nu \bar{\nu}$. Проведено исследование комптоноподобного процесса $\gamma e^{\pm} \rightarrow e^{\pm} e^{+} e^{-}$ рождения электрон-позитронной пары при взаимодействии ультрарелятивистского электрона с мягким рентгеновским фотоном в окрестности полярной шапки магнитара. Показано, что в таком процессе могут реализовываться оба типа рассматриваемых резонансов – на виртуальном фотоне и виртуальном электроне. Получено простое аналитическое выражение для коэффициента поглощения электрона в данном процессе. Получена оценка возможной эффективности процесса рождения пар для генерации электрон-позитронной плазмы в магнитосфере магнитара.

В целом диссертация Д.А. Румянцева, является, по моему убеждению, завершённой научной работой, а совокупность полученных новых результатов представляет существенное достижение в области теории, имеющее значение для задач физики элементарных частиц и астрофизики. Научные положения, сформулированные в диссертации, обоснованы. Результаты и выводы диссертации достоверны.

Основные результаты диссертации докладывались в течение 2006-2017 гг. на 22 международных и Всероссийских конференциях. Результаты своевременно опубликованы, имеется 13 публикаций в высокорейтинговых журналах, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора и кандидата наук», утверждённый ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Являясь руководителем ряда научных проектов, выполнявшихся на кафедре теоретической физики ЯрГУ им. П.Г. Демидова при поддержке Совета по грантам Президента РФ для поддержки молодых российских учёных и ведущих научных школ, Министерства образования и науки РФ и РФФИ, могу подтвердить достоверность личного вклада автора диссертации во все проведённые исследования. Новизна, актуальность и научная значимость диссертационного исследования Д.А. Румянцева не вызывает сомнений. Диссертационная работа Д.А. Румянцева полностью соответствует пункту 3 «Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка математических методов теории поля» паспорта специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Как научный консультант, считаю целесообразным дополнительно охарактеризовать личные качества соискателя. С 1998 по 2002 гг. мною осуществлялось научное руководство по выполнению Д.А. Румянцевым курсовых работ и выпускных квалификационных работ на степени бакалавра (2000 г.) и магистра (2002 г.). С 2002 г. Д.А. Румянцев обучался под моим научным руководством в аспирантуре по кафедре теоретической физики ЯрГУ им. П.Г. Демидова. В течение всего срока обучения Д.А. Румянцев проявлял высокую степень

самостоятельности и инициативности, глубокую заинтересованность и настойчивость в разрешении возникавших научных вопросов. В 2005 г. Д.А. Румянцев защитил в срок в Диссертационном совете ИЯИ РАН диссертацию «Фотон-фотонные и фотон-нейтринные процессы в сильно замагниченной электрон-позитронной плазме» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - Теоретическая физика. С 2013 по 2015 гг. Д.А. Румянцев являлся докторантом кафедры теоретической физики ЯрГУ. Должен отметить, что мое научное консультирование проходило далеко не по схеме «учитель-ученик». Д.А. Румянцев сложился как вполне самодостаточный высококвалифицированный учёный, способный самостоятельно ставить и решать научные задачи, и наше общение фактически являлось сотрудничеством коллег.

Считаю необходимым отметить, что Д.А. Румянцев успешно совмещает активную научную работу с преподавательской деятельностью, работая с 2000 г. в должности ассистента, и с 2007 г. в должности доцента кафедры теоретической физики ЯрГУ, в 2010 г. ему присвоено учёное звание доцента. Д.А. Румянцевым разработаны и читаются специальные лекционные курсы для студентов, обучающихся в бакалавриате и магистратуре по кафедре теоретической физики ЯрГУ, по дисциплинам: «Векторный и тензорный анализ», «Издательская система LaTeX», «Вариационные задачи теоретической физики», «Интегральные преобразования в задачах теоретической физики», «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля», подготовлены и изданы учебные пособия по преподаваемым курсам. Д.А. Румянцев осуществляет руководство курсовыми и выпускными квалификационными работами на степени бакалавра и магистра, руководит аспирантом.

На мой взгляд, Д.А. Румянцев имеет все основания претендовать на присвоение ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Профессор кафедры теоретической физики
ЯрГУ им. П.Г. Демидова
доктор физ.-мат. наук, профессор

25. 09. 2018

_____ Александр Васильевич Кузнецов

Тел.: (4852) 797766,
эл. почта: avkuzn@uniyar.ac.ru