

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м. н. Семикоза Виктора Борисовича о диссертационной работе **Румянцева Дмитрия Александровича** «Резонансные электрослабые процессы в замагниченной плазме», представленной на соискание ученой степени доктора физико - математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Настоящая диссертация посвящена исследованию квантовых процессов с участием нейтрино, фотонов и аксионов во внешней активной среде с учетом возможных резонансных эффектов.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, содержит 46 рисунков, 5 Приложений, в списке литературы 218 ссылок, всего 225 страниц текста. Опубликовано 26 работ, из них 13 в реферируемых журналах, в частности, в ЖЭТФ, Phys. Rev. D, Int. J. Mod. Phys. A и других журналах. Работы докладывались и опубликованы в трудах международных конференций (8).

Во **Введении** дан обзор литературы по нейтринным и аксионным процессам во внешнем поле, в частности, в плазме с магнитным полем. Так как одним из основных астрофизических приложений является описание процесса генерации наблюдаемого радиоизлучения в магнитосферах радиопульсаров, а также рентгеновского и мягкого гамма излучения в сверхсильном поле магнитаров, важным оказывается изучение механизмов генерации электрон-позитронной плазмы в магнитосферах таких звезд. Подчеркивается, что сильное внешнее магнитное поле может существенно повлиять на все рассматриваемые в диссертации фотон-нейтринные микропроцессы и изменить поведение наблюдаемых кривых остывания для магнитаров.

Глава 1 посвящена вычислению обобщенной двухвершинной древесной амплитуды перехода $jf \rightarrow j'f'$ в замагниченной среде для скалярных, псевдоскалярных, векторных и псевдовекторных токов-операторов бозонного типа (аксионов) или фермионного типа (нейтрино). Показано, что все полученные амплитуды имеют явный лоренц-инвариантный вид относительно преобразований вдоль магнитного поля вследствие выбора решений уравнения Дирака как собственных функций ковариантного оператора поляризации, коммутирующего с Гамильтонианом, впервые введенного Терновым, Соколовым (1966), и затем Мелроузом (1983). Автор вычисляет парциальные вклады в амплитуду от различных поляризационных состояний фермионов прямым перемножением матриц Дирака и биспиноров, соответствующих указанным собственным функциям. Это позволило

анализировать электромагнитные, фермион-аксионные и 4-фермионные слабые взаимодействия с участием нейтрино во внешней среде: плазме и магнитном поле, с использованием Лоренц-инвариантных парциальных амплитуд и проводя вычисления альтернативным способом, не прибегая к использованию матриц плотности. **Румянцев** проделал в Дополнении А большую работу по вычислению таких **громоздких** амплитуд, что трудно поддается проверке, за исключением очевидной Лоренц-инвариантности и калибровочной инвариантности полученных результатов.

В **Главе 2** рассматривается процесс комптоновского рассеяния в сильно замагниченной плазме (диаграммы Фейнмана на рис. 2.5), когда начальный и конечный электроны (позитроны) находятся на основном уровне Ландау. Это ситуация сильного магнитного поля, много большего квадратов как всех параметров среды (температуры, хим. потенциала) так и начальных энергий фотонов и частиц плазмы. Такая ситуация может реализоваться в нижней магнитосфере или во внешней части коры магнитара. Для вычисления коэффициентов затухания (вероятности изменения поляризации фотона), сечений комптоновского рассеяния в зарядово-симметричной плазме, или в зарядово-несимметричной, вырожденной плазме, **Румянцев** использует собственные вектора и собственные значения поляризационного оператора фотона во внешних полях, полученные ранее в работах Шабада и Перес-Рохаса. Проверкой проведенных вычислений в случае замагниченной зарядово-симметричной плазмы является, в частности, совпадение полученных сечений с результатами Герольда [47] в пределе низких энергий фотона, $\omega \ll m$.

В **Главе 3** соискатель степени исследует расщепление фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, и процесс слияния двух фотонов, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma$, в сильно замагниченной плазме. Такие процессы запрещены в вакууме КЭД теоремой Фарри, но уже во внешнем электромагнитном поле (с плазмой и без плазмы) они оказываются возможными. Автор приводит обзор ранних работ на эту тему, проводя в собственных вычислениях анализ влияния замагниченной плазмы как на дисперсионные свойства фотона, так и на изменение амплитуды расщепления фотона, что не делалось другими авторами, в частности, в случае сильного магнитного поля, превышающего швингеровское значение, при одновременном учете горячей электрон-позитронной плазмы. Последняя ситуация может осуществляться в «файерболах» - источниках заполнения магнитосферы e^+e^- плазмой вблизи поверхности магнитара. Снова, как и в предыдущей главе 2, **Румянцев** рассматривает случай, когда электроны и позитроны занимают основной уровень Ландау, т.е. напряженность магнитного поля больше квадратов всех термодинамических параметров и квадрата энергии начального фотона. Автору диссертации удалось показать, что расщепление фотона является не только источником фотонов разных мод поляризации со своими дисперсионными соотношениями, полученными во

второй главе, но и влияет на перенос излучения таких мод. В частности, длины свободных пробегов у Румянцева с учетом расщепления фотонов отличаются от результатов Томсона и Дункана, ограничившихся комптоновским рассеянием. **В дальнейшем автору следовало бы продолжить исследование самого переноса излучения, возможно в диффузионном приближении (3.44), что в конечном счете, и определяет наблюдаемый спектр «мягких гамма-повторителей» в излучении магнитаров – нейтронных звезд с сильным магнитным полем.**

Глава 4 посвящена исследованию фотон-нейтринных процессов в плотной замагниченной среде. Автор рассматривает электрослабые процессы нейтринного охлаждения излучением пар нейтрино-антинейтрино: при рассеянии фотона на электроны, при распаде плазмона или слиянии двух фотонов с рождением пар нейтрино. Снова вычисления проводятся в приближении сильного магнитного поля, превышающего характерные параметры среды, когда электроны и позитроны находятся на основном уровне Ландау. То, что расчеты доведены до нейтринной светимости (в единицах эрг/см³сек) для разных каналов фото-нейтринных процессов, несомненно достижение автора. Это сделано для набора температур и величин магнитного поля в порядке их убывания: охлаждения поверхности магнитара (на трех рисунках 4.3, 4.4, 4.5 температура падает на порядок величины) и распада (убывания) магнитного поля на каждом из рисунков. **Следует заметить, что на самом деле динамика такого убывания двух величин – температуры и напряженности магнитного поля, вполне самосогласована: с уменьшением температуры растет электропроводность плазмы (в случае вырожденного электронного газа $\sigma \sim T^{-2}$), т. е. диффузионные (омические) потери магнитного поля замедляются, хотя напряженность поля продолжает уменьшаться. Это, разумеется, выходит за рамки исследований Румянцева в данной главе.**

Важной является **Глава 5**, где рассмотрены резонансные процессы в замагниченной плазме, анонсированные в самом названии диссертации. В **разделе 5.2** рассмотрено резонансное рождение аксионов в магнитосфере магнитара в процессе $i \rightarrow f + a$, в котором начальный фермион излучает виртуальный фотон, а затем фотон в присутствии внешнего магнитного поля излучает аксион. Аксионная светимость в области резонанса за счет всевозможных реакций с участием частиц среды однозначно выражается через светимость перехода фотон – аксион. Подсчитав число аксионов, рождаемых в единицу времени в единице объема реликтовым излучением в окрестности магнитара, оценивая число магнитаров в Галактике $\sim 10^6$, автор приходит к выводу, что плотность аксионов, резонансным образом рожденных вблизи нейтронных звезд с сильным полем, превышающим швингеровское значение, значительно меньше плотности барионов в

Галактике. Это опровергает гипотезу Скобелева [45] о генерации в окрестности магнитаров аксионной составляющей холодной темной материи. В разделе 5.3 автор рассматривает процесс резонансного рассеяния фотона на электронах в замагниченной плазме с учетом всех уровней Ландау для виртуального заряженного фермиона. Полученные коэффициенты поглощения фотона оказываются более удобными в применении к решению задачи переноса излучения в магнитосферах радиопульсаров по сравнению с численными результатами, полученными в работе иностранных коллег [52]. Другим приложением с учетом резонанса на виртуальном электро-не является расчет нейтринной светимости в комптоноподобном процессе рождения нейтрино-антинейтринных пар, когда начальный и конечный электроны находятся на произвольных уровнях Ландау.

У меня есть замечание по цитируемой автором литературе в разделе 5.4 для так называемого процесса рождения светопозитрония [89], препятствующего появлению свободных e^-e^+ пар при распространении фотона, захваченного магнитным полем (изгибное излучение). Расчеты Усова и Шабада [89] были неточными, что исправлено независимо в том же году (1985) Л. Б. Леинсоном и Ораевским (ИЗМИРАН) в *Phys.Lett. B165 (1985) 422* (titled as «Gamma – Positronium in Strong Magnetic Fields»). Следовало бы сослаться на эту статью. Усов и Шабад также ссылаются на статью Леинсона и Ораевского в последующих работах на эту тему (PRD 2008). Напомним, что появление одномерного эффективного потенциала $\sim -\alpha/|z|$ взамен стандартного изотропного $\sim -\alpha/r$ для уравнения Шредингера в сильном магнитном поле, направленном по оси z , приводит к появлению глубокого нижнего уровня в спектре связанных состояний позитрония, значительно ниже стандартного 6.8 эВ для позитрония в отсутствие магнитного поля. Это и определяет дополнительный вклад позитрония в поляризационный оператор фотона, что резко меняет закон дисперсии фотона, приводя к расщеплению спектральной линии фотона, соответствующей вкладу свободной e^-e^+ пары. В результате возникает проблема отсутствия излучения свободных пар фотоном и не заполнения магнитосферы электрон-позитронной плазмой. Это явно мешало интерпретации наблюдений гамма-всплесков или рентгеновского излучения магнитарами. Румянцев в разделе 5.4 рассматривает альтернативный механизм рождения e^-e^+ пар в магнитосфере магнитара – комптоноподобный резонансный процесс $\gamma e \rightarrow e^-e^+$, происходящий мгновенно для начального фотона до его захвата магнитным полем с последующим движением фотона вдоль поля. Матричные элементы 8 фейнмановских диаграмм и вероятность процесса рождения пар подсчитаны в технике, изложенной в 1 главе. Расчеты в области полярной шапки, где первичный электрон на основном уровне Ландау, ускоренный в поле $E \parallel B$, где $E \ll B$, до энергии несколько ГэВ, сталкивается с рентгеновским фотоном, позволяют ограничиться только s -канальными (резонансными) диаграммами. **Надо было дополнительно сослаться в этом важном разделе диссертации на какую-то свою работу,**

по-видимому, в ЯФ [152], подчеркивая приоритет в исследовании этого механизма заполнения плазмы магнитосферы. Подобная ссылка сделана только в конце первой главы, что забывается к концу чтения диссертации.

В **Заключении** автор суммирует полученные им результаты по изучению процессов с участием электронов, фотонов, нейтрино с учетом влияния внешнего магнитного поля и плазмы на амплитуды процессов и на изменение дисперсионных свойств частиц. Из пяти последующих Приложений впечатляет трудоемкостью Приложение А, содержащее 64 формулы на 40 страницах текста диссертации для их последующего использования в обобщенном матричном элементе (1.24) всех процессов jff -взаимодействия вершин скалярного, псевдоскалярного, векторного, псевдовекторного типов в постоянном однородном магнитном поле произвольной величины и плазмы. Полученные с помощью такого матричного элемента наблюдаемые характеристики элементарных процессов содержат как новые результаты, отвечающие неисследованным ранее соотношениям между параметрами внешних полей и энергий частиц, так и приводят к совпадению таких характеристик с имеющимися в литературе в предельных случаях, смотри выше комментарий к главе 2.

Опечаток совсем немного. В частности, на странице 25 после формулы (1.11) : «**Будеи** работать... с использованием калибровки Ландау...».

Подводя итоги следует отметить, что автор диссертации, Дмитрий Александрович Румянцев, проделал большую работу, продолжив исследования группы Ярославского университета в традиционном для нее направлении – расчетами вероятностей микропроцессов физики элементарных частиц с учетом экстремальных астрофизических условий в нейтронных звездах – наличия сильных магнитных полей и плазмы. Сделанные выше замечания в основном касаются цитируемой литературы и нисколько не умаляют достоинств проделанной работы, содержащей новые результаты в расчетах возможных эффектов, вызванных влиянием внешнего магнитного поля и плазмы на амплитуды процессов и на изменение дисперсионных свойств частиц.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени доктора наук, а ее автор, **Румянцев Дмитрий Александрович**, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН,

доктор физ.-мат. наук

В. Б. Семикоз

09 января 2019 года

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)
108840 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН
Тел. 8 (495) 851 -01-20, E-mail: semikoz@yandex.ru

Подпись д.ф.-м.н. Семикоза В.Б. подтверждаю.

Ученый секретарь ИЗМИРАН к.ф м.н.

А. И. Рез

Семикоз Виктор Борисович

доктор физико-математических наук по специальностям: 01.04.02 --
теоретическая физика и 01.04.16 -- физика атомного ядра и
элементарных частиц.

1. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, *Instability of magnetic fields in electro-weak plasma driven by neutrino asymmetries*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP) **05**, 002 (2014).
2. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, *Magnetic field instability in a neutron star driven by the electroweak electron-nucleon interaction versus the chiral magnetic effect*, Physical Review D **91**, 061301 (R) (2015).
3. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, *Generation of the magnetic helicity in a neutron star driven by the electroweak electron -nucleon interaction*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP) **05**, 032 (2015).
4. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, *Energy source for the magnetic field growth in magnetars driven by the electron-nucleon interaction*, Physical Review D **92**, No. 8, 083007 (2015).
5. . V.B. Semikoz, A. Yu. Smirnov, and D.D. Sokoloff, *Generation of hypermagnetic helicity and leptogenesis in the early Universe*, Physical Review D **93**, No. 10, 103003 (2016).
6. M. Dvornikov and V. B. Semikoz, *Influence of the turbulent motion on the chiral magnetic effect in the early Universe*, Physical Review D **95**, No. 4, 043538 (2017).
7. М.С. Дворников, В.Б. Семикоз, *Несохранение лептонного тока и асимметрия реликтовых нейтрино*, Журнал экспериментальной и теоретической физики (ЖЭТФ) **151**, вып. 5, 860 (2017). [M. Dvornikov and V. B. Semikoz , *Nonconservation of lepton current and asymmetry of relic neutrinos*, J.Exp.Theor.Phys. **124**, No. 5, 731 (2017).]
8. V. B. Semikoz and M. Dvornikov, *Generation of the relic neutrino asymmetry in a hot plasma of the early Universe*, International Journal of Modern Physics D **27**, 1841008 (2018).
9. M. Dvornikov and V. B. Semikoz, *Magnetic helicity evolution in a neutron star accounting for the Adler-Bell-Jackiw anomaly*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (JCAP) **08**, 021 (2018).