

УТВЕРЖДАЮ

ВРИО директора ИЗМИРАН

д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ В.Д. Кузнецов

« 04 » сентября 2014 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертационной работе **Шитовой Анастасии Михайловны** «Распространение нейтрино сверхвысокой энергии в горячей плотной плазме и сильном магнитном поле», представленной на соискание ученой степени кандидата физико -математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация посвящена исследованию процессов распространения нейтрино во внешних электромагнитных полях и плотных средах. В частности, таких процессов как нейтринное рождение электрон-позитронных пар в магнитном поле (впервые в пределе умеренно сильного магнитного поля), детальному анализу так называемого «нейтринного спинового света» - процесса радиационного перехода ультрарелятивистского нейтрино, обладающего дираковским магнитным моментом,  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$ , в плотной плазме . Наконец, впервые получены выражения для пропагаторов заряженных векторного  $W$  и скалярного  $\Phi$ - бозонов в произвольной  $\xi$  калибровке в виде разложения по уровням Ландау в магнитном поле

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 7 рисунков и список литературы из 118 наименований. Объем диссертации - 111 страниц. Результаты диссертации опубликованы в 8 статьях (4 из списка ВАК). Работы докладывались на ряде международных конференций и на различных семинарах.

**Во Введении А. Шитова** делает подробный обзор современных проблем физики нейтрино и нейтринных экспериментов, сформулировав в конце введения решаемые ею задачи, связанные с распространением нейтрино высоких энергий во внешней активной среде – магнитном поле и плазме.

В **первой главе**, на базе предварительного вычисления в пределе сверхвысоких энергий собственно энергетического оператора левого (активного) нейтрино в изотропной плазме (без магнитного поля), автор анализирует нейтринный радиационный переход  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$  при наличии у нейтрино дираковского магнитного момента. Исследуется только кинематика излучения поперечного плазмона (фотона в среде) в самых различных астрофизических условиях (Солнце, красные гиганты, нейтронные звезды, сверхновые, и т.д.). Сам магнитный момент  $\mu$  в лагранжиане взаимодействия с электромагнитным полем  $i\sigma_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$  при таком анализе неважен, хотя его наличие подразумевается. Простое кинематическое условие допустимости указанного радиационного перехода, когда дополнительная энергия нейтрино в плазме  $\Delta E$  превышает отношение квадрата плазменной частоты (квадрата массы поперечного плазмона в среде  $m_\gamma^2 = \omega_p^2$ ) к энергии нейтрино,  $\Delta E \geq \omega_p^2/2E \neq 0$ , означает, что процесс может быть разрешен при сверхвысоких энергиях и только в среде с ненулевой плотностью. В вакууме, в отсутствие плотности среды  $n_e = 0$ ,  $\omega_p^2 = 4\pi e^2 n_e / m_e = 0$ , процесс излучения безмассового нейтрино  $\nu \rightarrow \nu + \gamma$  запрещен кинематически по определению.

Вычисления **Шитовой** показывают, что **внутри Солнца** рассматриваемый процесс разрешен только для не наблюдавшихся до сих пор мюонных и тау антинейтрино сверхвысоких энергий  $E > 2 \cdot 10^7$  ГэВ. Для наблюдения такого процесса это еще при дополнительном условии, что соответствующее стерильное дираковское антинейтрино, вылетающее из Солнца, будет как-то зарегистрировано. Такое условие, как и длина пробега активного нейтрино относительно процесса излучения, не изучалось в рассматриваемой работе. Автором показано, что излучение («спиновый свет») нейтрино всех ароматов запрещено в Солнце для любых энергий, а для электронных антинейтрино, прилетающих на Солнце извне, пороговое значение превышает  $E > 6 \cdot 10^6$  ГэВ. В **нейтронных звездах** такой процесс запрещен для электронных нейтрино любых энергий (**прилетающих извне на звезду**), хотя для нейтрино (антинейтрино) других ароматов излучение оказалось бы возможным при  $E > 2 \cdot 10^4$  ГэВ. Примерно такой же порог реакции для электронных антинейтрино. С другой стороны, автор показывает, что доминирующим в плотной звезде является **процесс рождения заряженных W – бозонов** в реакциях захвата электронных антинейтрино (нейтрино) сверхвысоких энергий электронами (позитронами) звезды или термальными нейтрино (антинейтрино) с рождением нейтрального  $Z^0$  бозона. Пробег антинейтрино относительно процесса рождения W бозона на электроны в вырожденном ультрарелятивистском электронном газе, вычисленный в диссертационной работе, ничтожно мал по сравнению с размерами звезды, и такие процессы заведомо доминируют над процессом нейтринного радиационного перехода в нейтронных звездах.

Следует отметить важность учета нелокальных поправок к энергии сдвига  $\Delta E$  за счет учета **точного пропагатора промежуточного векторного бозона. Это сделано автором впервые.** Причем при условии не слишком больших энергий нейтрино, полученные формулы допускают разложение в ряд по энергии нейтрино: первое постоянное слагаемое соответствует локальной поправке (энергии безмассового нейтрино в формуле Вольфенштейна  $E=p + V_{MSW}$ , где  $V_{MSW} = \Delta E$ , полученной в точечном приближении Ферми  $q^2=0$  при разложении пропагатора в ряд по малому параметру  $q^2 / M^2_W \ll 1$ ). Второе слагаемое в разложении по энергии соответствует первой нелокальной поправке в пропагаторе (Нотзольд и Раффельт), т.е. учету в пропагаторе малой поправки  $q^2 / M^2_W$ ) и т.д. И так, **расчеты Шитовой кинематики процесса  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$  закрывают его** практически для всех реальных астрофизических условий, за малым исключением нескольких частных случаев нейтрино сверхвысоких энергий.

Во **второй главе** автор рассматривает процесс нейтринного рождения электрон-позитронных пар  $\nu \rightarrow \nu + e^- + e^+$  в пределе «умеренно» сильного магнитного поля, когда четвертая степень массы электрона много меньше полевого параметра -  $2\beta^2 = e^2(E^2 - B^2)$ , или  $m_e^2 \ll \beta$ , т.е. магнитное поле превышает Швингеровское значение  $B_c = m_e^2/e = 4.41 \times 10^{13}$  Гс,  $B \gg B_c$  и электрическое поле отсутствует,  $E=0$ . С другой стороны, полевой параметр  $\beta$  много меньше квадрата энергии нейтрино  $E_\nu^2 \gg \beta \gg m_e^2$  что позволяет говорить об «умеренно» сильном магнитном поле.

Процесс нейтринного рождения лептонных пар в магнитном поле может оказаться важным при **слиянии нейтронных звезд**, когда неважно влияние плазмы на ход процесса, а также при изучении нейтринного излучения с **сильно замагниченного диска керровской черной дыры.** Конкурирующее фоторождение электрон-позитронных пар в магнитном поле может быть подавлено средой из-за малости пробега фотона в плазме, в то время как нейтринное излучение пар не подвержено ее влиянию на больших расстояниях в том же магнитном поле. Использование предела скрещенного поля  $E=B$  ( $F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}=0$ , Никишов, Ритус) в этих примерах некорректно. Автору **А. Шитовой** удастся получить достаточно общее выражение для вероятности нейтринного рождения пар, согласующееся с пределом скрещенного поля  $\beta=0$ , в том числе возможен переход к соответствующему пределу нулевой электронной массы,  $m_e \rightarrow 0$ . Следует заметить, что главный вклад в вероятность процесса с подинтегральным выражением, содержащим производные от функции Эйри, зависящими от сложного аргумента, был получен ранее Михеевым и Кузнецовым. В работе Шитовой такой вклад удачно аппроксимирован простым аналитическим выражением, содержащим все предельные случаи.

В **третьей главе** соискатель вычисляет пропагаторы заряженных частиц в произвольной  $\xi$  калибровке в виде разложения по уровням Ландау. В

диссертации приводятся различные представления пропагаторов заряженных частиц в постоянном однородном магнитном поле, которые необходимы для анализа электрослабых процессов в сильном внешнем поле. В литературе отсутствуют методически важные выражения для пропагаторов заряженных  $W$  и  $\Phi$  бозонов в виде разложения по уровням Ландау в магнитном поле, что при их учете может оказаться интересным в сверхсильных магнитных полях близким к значению  $B_W = M_W^2/e \sim 10^{24}$  Гс, т.е. к магнитным полям в ранней Вселенной.

Даже для электронов ограничение в расчетах для сильного магнитного поля основным уровнем Ландау может оказаться ошибочным. Интересен также общий результат (3.58) для пропагатора  $W$  бозона, который для основного уровня Ландау не зависит от калибровки  $\xi$ , но содержит полюс в магнитном поле  $(q_{\parallel})^2 = M_W^2 - \beta$ , где  $\beta = eB$ . Следовало бы сослаться в этом месте на работу Поула Олесена (NORDITA), который также как и Скалозуб (Днепропетровск) изучал неустойчивость теории возмущений  $W$  – бозонного вакуума в магнитном поле. Работа самого Скалозуба цитируется в диссертации.

**В заключении А. Шитова** кратко формулирует полученные результаты.

Далее перечислим некоторые замечания, помимо сделанных выше.

Не следует говорить о «черенковском» излучении нейтрино в изотропной плазме (страница 40, параграф после (1.42)). В изотропной плазме показатель преломления  $n = \sqrt{\epsilon}$  меньше единицы, и для пространственно-подобного переданного импульса  $q^2 < 0$  в процессе  $\nu_L \rightarrow \nu_L + \gamma$  следует говорить лишь об излучении продольного плазмона и о поляризационных потерях энергии безмассового нейтрино в плазме (в работах Семикоза и Смородинского в ЖЭТФ, Письма ЖЭТФ, 1986). С другой стороны, черенковское излучение безмассового нейтрино (излучение поперечного плазмона) возможно в магнитоактивной (анизотропной) плазме. Для электрона в плазме с магнитным полем это впервые показано Коломенским (60-е годы).

Есть несколько незначительных стилистических замечаний. Страница 32 «Интеграл по углу  $\theta$  легко снимается», здесь жаргон «снимается» следовало бы заменить на «вычисляется». Пропущена запятая (вторая строка после (1.40)). Последний параграф перед (2.8) содержит опечатку в первом предложении в слове «позитрон», написано «электрон-поозитронную пару» вместо «электрон-позитронную пару». Подобная опечатка на 84 странице в начале раздела 2.2 в слове «бозонв» вместо «бозонов».

Блестяще написано Введение, где на **хорошем литературном языке, что вообще редко встречается в технических текстах, и правильно (!!!)** интерпретируются основные проблемы нейтринной физики.

Соискатель ученой степени проделал большую работу, решая проблемы ранее неизученные в физике нейтрино, продемонстрировав владение методами теоретической физики. Сделанные выше замечания не умаляют многих достоинств проделанной работы, являющейся интересным развитием теории нейтринных процессов в астрофизике звезд и космологии, т.е. в плотной среде с учетом магнитных полей, играющих важную роль в рассматриваемых объектах.

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 кандидата наук, а ее автор, **Шитова Анастасия Михайловна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

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

Отзыв обсуждался и одобрен на общеинститутском теоретическом семинаре 26 мая 2014 г.

Заведующий теоретическим отделом ИЗМИРАН,  
д.ф.-м.н.

В.Б. Семикоз

142190 г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН  
Тел. 8 (495) 851-09-12, E-mail: semikoz@yandex.ru

## Сведения о ведущей организации

- 1) Федеральное государственное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академия наук (ИЗМИРАН)
- 2) Российская Федерация, г. Москва
- 3) 142190, Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН ; тел. +7(495) 851 01 20; [izmiran@izmiran.ru](mailto:izmiran@izmiran.ru); <http://www.izmiran.ru>;
- 4) Список основных публикаций работников ведущей организации по нейтринной астрофизике и магнитным полям в рецензируемых журналах за последние 5 лет:
  1. L.B. Leinson, «Axion mass limit from observations of the neutron star in Cassiopeia A», JCAP 08 (2014) 031.
  2. L.B. Leinson, «Neutrino emissivity of anisotropic neutron superfluids», Phys.Rev. C87 (2013) 025501.
  3. L.B. Leinson, "Neutrino emissivity of 3P2-3F2 superfluid cores in neutron stars», Phys.Rev. C84 (2011) 045501.
  4. L.B. Leinson, "Neutrino emission from spin waves in neutron spin-triplet superfluid", Phys.Lett. B689 (2010) 60.
  5. L.B. Leinson, "Neutrino emission from triplet pairing of neutrons in neutron stars", Phys. Rev. C 81 (2010) 025501.
  6. M. Dvornikov, S. P. Gavrilov, and D. M. Gitman, "Creation of Dirac neutrinos in a dense medium with time-dependent effective potential", Phys. Rev. D 89, 105028 (2014), arXiv:1312.2288 [hep-ph].
  7. M. Dvornikov and V. B. Semikoz, "Instability of magnetic fields in electroweak plasma driven by neutrino asymmetries", JCAP 05 (2014) 002, arXiv:1311.5267 [hep-ph].
  8. M. Dvornikov and V. B. Semikoz, "Lepton asymmetry growth in symmetric phase of an electroweak plasma with hypermagnetic fields versus its washing out by sphalerons", Phys. Rev. D87 (2013) 025023.
  9. M. Dvornikov, "Neutrino spin oscillations in matter under the influence of gravitational and electromagnetic fields", JCAP 06 (2013) 015, arXiv:1306.2659 [hep-ph].

10. M. Dvornikov, “Evolution of a dense neutrino gas in matter and electromagnetic field”, Nuclear Physics B 855, 760 – 773 (2012) arXiv:1108.5043 [hep-ph].
11. M. Dvornikov and J. Maalampi, “Oscillations of Dirac and Majorana neutrinos in matter and magnetic field”, Phys. Rev. D 79, 113015 (2009), arXiv:0809.0963 [hep-ph].
12. M. Dvornikov and C. Dib, “Spin-down of neutron stars by neutrino emission”, Physical Review D 82, 043006 (2010), arXiv:0907.1445 [astro-ph].
13. V.B. Semikoz and J.W.F. Valle, “Chern-Simons anomaly as polarization effect”, JCAP 11 (2011) 048.
14. V.B. Semikoz, D.D. Sokoloff and J.W.F. Valle, “Lepton asymmetries and primordial hypermagnetic helicity evolution”, JCAP 06 (2012) 008
15. M. Dvornikov and V.B. Semikoz, “Leptogenesis via hypermagnetic fields and baryon asymmetry”, (JCAP) 02 (2012) 040; Erratum ibid. in JCAP 08 (2012) E01