

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Добрыниной Александры Алексеевны** «Свойства массивного нейтрино в условиях замагниченной плазмы», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, заключения и трех приложений. В диссертации 126 страниц, включая 9 рисунков. Список литературы содержит 191 ссылку. Автором опубликовано по теме диссертации 5 работ в ведущих журналах из списка ВАК, результаты доложены на международных и российских конференциях, а также на семинарах ведущих российских институтов.

В **первой главе** проведено теоретическое исследование **радиационного распада стерильного нейтрино** в чистой (без магнитного поля) и **сильно замагниченной электронной плазме** (статья соискателя в PRD [69] с Михеевым и Раффельтом).

Мотивировка изучения характеристик стерильного нейтрино, в частности времени его жизни, понятна из-за большого интереса к нему как кандидату в темную материю (ТМ), как это предлагалось, в частности, в расширенной  $\nu$ MSM модели Шапошникова с сотрудниками (автор цитирует одну из работ этой группы [27]). Напомним, что в  $\nu$ MSM – модели, помимо такого стерильного нейтрино (масса  $\sim O(\text{кэВ})$ ) предполагается наличие еще двух тяжелых стерильных нейтрино, посредством которых в механизме seesaw объясняются генерация масс и осцилляции всех трех известных легких (активных) нейтрино. Итак, для кэВ-ного нейтрино надо знать каналы распада и соответствующее время жизни, которое должно превышать возраст Вселенной, если рассматривать его в качестве кандидата в ТМ. Среди возможных каналов распада простейший, рассматриваемый в диссертации, это радиационный распад стерильного нейтрино в активное,  $\nu_s \rightarrow \nu_a + \gamma$ .

Полученные **Добрыниной** результаты этой главы отличаются от ранее представленных в литературе тем, что впервые было последовательно учтено изменение закона дисперсии фотона, обусловленное наличием внешней активной среды — электронной плазмы. Проанализирована вероятность радиационного распада стерильного нейтрино с учетом анизотропии дисперсии фотона в нерелятивистской плазме как в отсутствии магнитного поля, так и в



случае наличия сильного магнитного поля, когда все электроны плазмы находятся на основном уровне Ландау. Показано, что в среде (плазме) и при наличии магнитного поля вероятность распада заметно вырастает по сравнению с вакуумной. Интересным является заметный вклад аксиального слагаемого в электрослабом взаимодействии нейтрино с электронами сильно замагниченной плазмы, что особенно важно в канале радиационного распада стерильного нейтрино в мюонное или тау-нейтрино, для которых векторная константа  $C_V$  мала. Несколько непонятен переход к пределу в формуле (1.54) при несуществующем равенстве аксиальной и векторной констант Стандартной Модели  $C_A=C_V=1$ , в то время как в Стандартной Модели  $C_A=\pm 0.5$  и  $C_V=2\xi \pm 0.5$ . **Чей результат неверен: Добрыниной (1.51), из которой предельным переходом получена (1.54) в диссертации, или Тернова с Эминовым из статьи [100], совпадающая с (1.54) ?**

Во **второй главе** изучаются электромагнитные свойства массивного нейтрино, и глава начинается с введения, где перечисляются известные ограничения на магнитный момент нейтрино, в частности, рекордное лабораторное ограничение группы ИТЭФ на Калининской атомной станции ( $\mu_\nu < 2.9 \cdot 10^{-11} \mu_B$ ), а также более строгие астрофизические ограничения. Среди последних в диссертации **не упомянуты работы группы ИЗМИРАН и университета Валенсии** с ограничением на переходной магнитный момент (ПММ) майорановского нейтрино. Не следует также думать, что интерес к такому ПММ угас в астрофизических приложениях, в частности, в задачах с солнечными нейтрино после решения проблемы дефицита электронных нейтрино в модели Михеева-Смирнова-Вольфенштейна (МСВ). Известные экспериментальные ограничения (SuperKamioKande) на поток солнечных антинейтрино (правополяризованных), с учетом глобального  $\chi^2$  анализа всех нейтринных экспериментов, позволили получить рекордное ограничение на ПММ нейтрино Майорана в каскаде превращений:  $\nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu L}$  за счет общепринятого МСВ механизма в зоне радиационного переноса ( $r < 0.7 R_{\text{sun}}$ ), с последующей сменой аромата и спиральности  $\nu_{\mu L} \rightarrow \nu_{eR}$  механизмом по типу Ахмедова во внешней конвективной зоне ( $0.7 R_{\text{sun}} < r < R_{\text{sun}}$ ). При этом подставлялись вполне разумные величины магнитных полей в этой зоне, согласованные с наблюдениями



магнитных полей на фотосфере Солнца. Такое ограничение ПММ,  $\mu^{(M)} < 3 \cdot 10^{-12} \mu_B$ , полученное в работах Миранды, Рашба, Реза и Валле (a) Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 1304, и (b) Phys. Rev. D 70 (2004) 113002, хотя и совпадает с ранее полученным теоретическим ограничением Раффельта на магнитный момент, но последний использовал менее достоверные астрофизические предположения при анализе распада плазмона в нейтрино-антинейтринную пару в ядрах далеких звезд - красных гигантов. Автору диссертации следовало бы сослаться на такое ограничение ПММ для нейтрино Майорана в данном разделе диссертации.

При вычислении вершинной функции (2.19), сравниваемой с (2.23) с последующим получением известного предела для магнитного момента дираковского нейтрино (2.28) (Ли и Шрок) следовало бы явно подчеркнуть отсутствие вклада анапольного момента нейтрино в рассматриваемом пределе малых переданных импульсов.

В **третьей главе** вычисляется собственно-энергетический оператор массивного нейтрино во внешнем магнитном поле.

Для расчетов фейнмановских диаграмм собственной энергии нейтрино во внешнем поле автор использует пропагаторы заряженного лептона L, W-бозона и скалярного заряженного бозона  $\Phi$  в формализме собственного времени Фока-Швингера для случая внешнего постоянного и однородного магнитного поля. Инвариантные коэффициенты при ковариантных дираковских структурах вычисляются при произвольном соотношении между массами нейтрино, заряженного лептона и W-бозона. Исходя из полученного выражения для массового оператора нейтрино, **Добрыниной** получены дополнительная энергия, приобретаемая нейтрино во внешнем магнитном поле, и магнитный момент нейтрино. Наличие мнимой части у дополнительной энергии нейтрино можно интерпретировать как вероятность распада массивного нейтрино,  $\nu_1 \rightarrow l^- W^+$ . Полученные в работе результаты сравниваются с известными предельными выражениями для слабого магнитного, а также скрещенного



электромагнитных полей. Следует отметить замечание самого автора относительно ошибочного псевдоскалярного вклада в величину магнитного момента в формуле (3.36) при учете скорости частицы, тогда как сам магнитный момент с учетом вектора спина является псевдовектором (автором учтено замечание Тернова с Эминовым).

Интересна вероятность распада движущегося ультрарелятивистского нейтрино с массой покоя меньше суммы масс  $W$ -бозона и лептона во внешнем магнитном поле, когда снимается кинематический запрет в вакууме, но энергия нейтрино превышает сумму масс в конечном состоянии.

В **Заключении** перечислены результаты, полученные в трех главах диссертации.

В **Приложении А** вводится ковариантный формализм пространства Минковского в присутствии магнитного поля, часто и эффективно используемый группой Ярославского университета при анализе нейтринных процессов во внешнем магнитном поле. В **Приложении Б** дано сравнение векторного и аксиального вкладов в амплитуду распада стерильного нейтрино в электронной плазме и показана малость последнего по сравнению с векторным вкладом. Наконец, в **Приложении В** сделан расчет функций (интегралов) в формуле (1.56) первой главы диссертации для вероятности радиационного распада стерильного нейтрино в релятивистской сильно замагниченной плазме, когда вклад аксиального слагаемого может оказаться существенным, и даже определяющим для мюонного или тау-нейтрино в конечных продуктах распада.

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

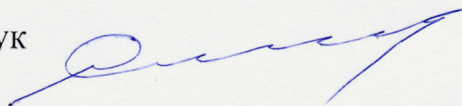


ее автор, **Добрынина Александра Алексеевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

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

Подпись д.ф.-м.н В.Б. Семикоза заверяю:

Ученый секретарь ИЗМИРАН к.ф.-м.н.



А.И. Рез