

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертационной работе **Аникина Романа Анатольевича** «Электромагнитные эффекты нейтрино в активной среде», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертация посвящена исследованию электрослабых процессов с участием дираковского нейтрино, обладающего магнитным моментом, во внешней активной среде – горячей плотной плазме и сильном магнитном поле, и исследованию процесса радиационного распада безмассового нейтрино  $\nu \rightarrow \nu\gamma$  в магнитном поле с учетом вклада позитрония в дисперсию фотона.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, содержит 19 рисунков и список литературы из 134 наименований. Объем диссертации – 113 страниц. Результаты диссертации опубликованы в 5 статьях из списка ВАК. Работы докладывались на ряде международных конференций и на различных семинарах.

После кратких аннотации и **Введения**, где дан обзор некоторых проблем нейтринной астрофизики, **Роман Аникин** формулирует решаемые им задачи, связанные с распространением нейтрино во внешней активной среде – магнитном поле и плазме, с приложением найденных решений к вопросу о подогреве и сбросе оболочки сверхновой при наличии дираковского магнитного момента, возможному наличию пульсирующего нейтринного сигнала при взрыве сверхновой, и, наконец, исследованию радиационного распада нейтрино в магнитном поле с учетом вклада позитрония в дисперсию излучаемого фотона.

В **первой главе** вычисляется индуцированный плазмой магнитный момент дираковского нейтрино на основе общего выражения для собственно-энергетического оператора нейтрино, определяющего дополнительную энергию, приобретаемую нейтрино во внешней активной среде – плазме и магнитном поле. В изотропной среде, в низкоэнергетическом приближении точечного фермиевского взаимодействия нейтрино с частицами среды, это хорошо известный вклад Вольфенштейна в формуле  $E = p + V_{MSW}$ ,  $V_{MSW} = \Delta E$ . В случае, изучаемом **Аникиным**, рассматривается распространение нейтрино любой энергии в среде с магнитным полем (замагниченная плазма). Искомый вклад в собственную энергию определяется слагаемыми в последней строчке (1.6), пропорциональными массе нейтрино и зависящими (линейно) от внешнего магнитного поля. По аналогии со структурой канонического вклада вакуумного аномального магнитного момента нейтрино в дополнительную энергию  $\Delta E$  во внешнем магнитном поле, автор вычисляет плазменные поправки в собственно-энергетический оператор, обусловленные обменом (в амплитуде рассеяния нейтрино вперед) заряженными  $W$  и  $\Phi$  бозонами для электронного нейтрино и нейтральным  $Z^0$



– бозоном для нейтрино всех ароматов. Показано, что в реальных астрофизических условиях нелинейные поправки по магнитному полю, полученные ранее Михеевым и Кузнецовым, несущественны по сравнению с вкладом плазмы в том же магнитном поле. Тогда как результат, полученный при участии **Аникина**, поправляет значение вакуумного магнитного момента в замагниченной плазме дополнительным фактором  $\mu_\nu \times (1 \pm 2\mu/3E)$ , где  $\mu_\nu$  – известный вакуумный магнитный момент, **пропорциональный массе нейтрино**,  $\mu_\nu \sim m_\nu$ , а  $\mu$  – химический потенциал электронов в ультрарелятивистской вырожденной плазме,  $E$  – энергия нейтрино. Знаки  $\pm$  соответствуют электронному нейтрино (верхний знак), нижний мюонному или тау нейтрино. Аналогичный фактор в зарядово-симметричной среде (горячая плазма ранней Вселенной) содержит незначительную поправку к единице для электронных нейтрино в пределе температур  $T \ll M_W$ . Эта работа **Аникина** (ЖЭТФ, 2010 год) устраняет недоразумения в работах предыдущих авторов, когда вклад в магнитный момент, индуцированный плазмой, оказывался неверно зависящим или вообще независимым (группа МГУ) от массы нейтрино.

Во **второй главе** автор рассматривает каскадный процесс двухкратной конверсии спиральности нейтрино в условиях сверхновой  $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$  при наличии в оболочке звезды магнитного поля и наличии у нейтрино магнитного момента. Такой процесс неоднократно рассматривался ранее. В частности, Арноном Даром с целью объяснения подогрева остановившейся в оболочке ударной волны энергичными левыми нейтрино, рожденными из энергичных правых, беспрепятственно покидающими ядро на первом этапе каскада. Сами правые (стерильные) дираковские нейтрино образуются на этом этапе в ядре за счет электромагнитного рассеяния левых нейтрино на электронах и протонах. На втором этапе, в результате нейтринных спиновых осцилляций в магнитном поле оболочки прямо сзади фронта остановившейся ударной волны,  $\nu_R \leftrightarrow \nu_L$ , вновь образующиеся левые нейтрино, разумеется, эффективно взаимодействуют с веществом, плотно сжатым на фронте, разогревая его и подталкивая ударную волну. Другой эффект, ранее рассмотренный Волошиным, это резонансная конверсия левых нейтрино в правые (правых в левые) в плотной материи при наличии магнитного поля. Такой резонанс возможен, когда амплитуда рассеяния нейтрино вперед, и вместе с ней потенциал взаимодействия нейтрино с веществом, пропорциональны множителю  $(Y_e - 1/3)$ , обращаемому в нуль на некотором расстоянии от ядра сверхновой. Это, например, совершенно невозможно на Солнце, где распространенность протонов (и электронов в водороде) значительна,  $Y_e \approx 0.6$ . Поэтому эффект Волошина-Высоцкого-Окуня (ВВО) конверсии дираковских левых нейтрино в стерильные правые подавлен плотностью среды (в конвективной зоне на вылете из Солнца). Что нового сделано в работе **Аникина**? Численно решая уравнение Волошина, было продемонстрировано существенное ослабление начального пика интенсивности нейтринного сигнала при учете магнитного поля порядка



швингеровского и магнитного момента порядка  $10^{-13} \mu_B$ . Предсказывается также, что при несовпадении оси вращения с направлением магнитного момента соответствующая поперечная компонента магнитного поля, влияющая на спиновые нейтринные осцилляции, может исчезать и вновь появляться вблизи полюсов. Тогда нейтрино могут избежать конверсии своей спиральности в узкой области вблизи полюсов. Нейтринный сигнал будет иметь пульсирующий характер при удачной (для наблюдателя) ориентации оси вращения.

В третьей главе изучен радиационный распад безмассового нейтрино  $\nu \rightarrow \nu \gamma$  во внешнем магнитном поле (без плазмы). В локальном пределе слабого взаимодействия такой процесс соответствует однопетлевому приближению, когда учитывается петлевой вклад свободной  $e^+ e^-$  - пары, излучающей непосредственно фотон в магнитном поле. Соответствующий поляризационный оператор фотона давно исследовался в работах Скобелева и независимо Шабада в отсутствие слабого взаимодействия. В настоящей работе **Аникин** сначала вычисляет дополнительный вклад связанного состояния электрон-позитронной пары (позитрония) в поляризационный оператор фотона. 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 значительно ( $\sim$  на порядок) вырастает вероятность радиационного распада безмассового нейтрино в сильном магнитном поле, превышающем швингеровское значение  $B_c = m_e^2/e = 4.41 \times 10^{13}$  Гс. Если на этапе вычисления вклада позитрония в поляризационный оператор фотона в сильном магнитном поле **Аникин** воспроизводит то, что впервые получено Леинсоном и затем повторено Шабадом и Усовым, то применение этого важного шага вычислений в расчете радиационного распада нейтрино несомненно проделано автором диссертации также впервые (ЖЭТФ, 2012 год). В качестве приложения **Аникин** вычисляет «кик»-толчковую скорость остатка сверхновой- пульсара за счет асимметрии радиационного распада нейтрино в магнитном поле. Последняя оказывается, к сожалению, малой порядка  $\sim 50$  км/сек по сравнению с наблюдаемой средней  $\sim 400$  км/сек. Тем не менее, эта глава диссертации представляется наиболее интересной для читателя, ее результаты активно обсуждались на различных семинарах. Возможно, следует поискать других приложений для вероятности распада нейтрино, увеличивающейся за счет вклада позитрония. В свое время подобный эффект в электродинамике магнитосферы пульсара (без слабого взаимодействия) приводил к изменению геометрии изгибающего излучения, когда нарастание



поперечного импульса фотона при отклонении от силовой линии магнитного поля было ограничено более низким связанным состоянием позитрония по сравнению с вкладом свободных электрон-позитронных пар,  $k_{\perp} \sim 2m_e$  (работы Леинсона). Нужно отметить, что автор уместно делает ссылки на работы предшественников, и несомненно вносит свой независимый вклад в развитие нейтринной астрофизики. В качестве пожелания и будущего продолжения данной задачи следовало бы одновременно с магнитным полем в вакууме включить для описания распространения нейтрино саму среду, плазменную оболочку сверхновой, вне которой не существует самого магнитного поля, быстро убывающего с расстоянием в вакууме  $\sim 1/r^3$ .

В заключении **Р. Аникин** кратко формулирует полученные результаты.

Помимо пожелания продолжения исследований, сделанного выше, перечислим некоторые замечания. Есть опечатки. На странице 85 в заголовке раздела 2.6. в слове «средний» следует писать «средние». В ссылке [121] фамилию автора эффекта следует писать с большой буквы.

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, **Аникин Роман Анатольевич**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

д.ф-м.н.



В.Б. Семикоз

Заведующий теоретическим отделом, ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН).

тел.: +7(495) 851-01-20, e-mail: [semikoz@yandex.ru](mailto:semikoz@yandex.ru), адрес: 142190, Россия, г. Москва, г.Троицк, Калужское шоссе, д. 4, ИЗМИРАН

Подпись В.Б. Семикоза заверяю

ученый секретарь ИЗМИРАН, к.ф-м.н.



А.И. Рез