

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

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

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения; она содержит 19 рисунков и список литературы из 134 наименований. Объем диссертации – 113 страниц. Результаты диссертации были представлены в пяти статьях, опубликованных в российских журналах, рекомендованных ВАК. Основные результаты докладывались на двух конференциях и на семинарах ИЗМИРАН, ИЯИ, ОИЯИ и Ярославского Университета.

Во Введении дан краткий обзор некоторых проблем нейтринной астрофизики и сформулированы задачи диссертации, связанные с распространением нейтрино во внешней активной среде, с приложением найденных решений к вопросу о подогреве и сбросе оболочки сверхновой при наличии у нейтрино большого дираковского магнитного момента, возможному наличию пульсирующего нейтринного сигнала при взрыве сверхновой, и к 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 (плазма + магнитное поле). В случае изотропной среды, в низкоэнергетическом приближении точечного 4-фермионного взаимодействия нейтрино с частицами среды, это хорошо известный эффективный потенциал Михеева-Смирнова-Вольфенштейна $\Delta E = V_{\text{MSW}}$. В случае же замагниченной плазмы искомый вклад в собственную энергию определяется выражением

$$-\mu_{\nu} \left(\mathbf{B}_t + \frac{m_{\nu}}{E} \mathbf{B}_l \right)$$

где μ_{ν} – магнитный момент нейтрино в плазме (пропорциональный массе нейтрино m_{ν}), E – энергия нейтрино в вакууме, ξ – направление псевдовектора поляризации нейтрино в с.с.о., $\mathbf{B}_l$ и $\mathbf{B}_t$ – продольная и поперечная относительно направления импульса нейтрино компоненты магнитного поля, соответственно. По аналогии со структурой канонического вклада вакуумного аномального магнитного момента нейтрино в дополнительную энергию ΔE во внешнем магнитном поле, автор вычисляет плазменные поправки в собственно-энергетический оператор, обусловленные обменом (в амплитуде рассеяния вперед) заряженными W - и Φ -бозонами для электронного нейтрино и нейтральным Z -бозоном для нейтрино всех ароматов. Показано, что в реаль-

ных астрофизических условиях нелинейные по магнитному полю поправки, полученные ранее Михеевым и Кузнецовым, несущественны по сравнению с вкладом плазмы в том же магнитном поле. Результат, полученный при участии Аникина, дает следующее значение суммарного магнитного момента в ультрарелятивистской замагниченной зарядово-несимметричной плазме:

$$\mu_\nu = \mu_\nu^0 \left(1 + \frac{2\kappa\tilde{\mu}}{3E} \right).$$

Здесь $\mu_\nu^0 = 3eG_G m_\nu / (8\sqrt{2}\pi^2)$ — вакуумный магнитный момент, $\tilde{\mu}$ — химпотенциал электронов в плазме, $\kappa = -1$ для ν_e и $\kappa = +1$ для ν_μ и ν_τ . Аналогичный фактор в горячей зарядово-симметричной e^+e^- плазме содержит небольшую поправку, пропорциональную T^2/M_W^2 (температура T предполагается малой по сравнению с массой W -бозона, M_W). Важно, что в обоих случаях вклад замагниченной плазмы в магнитный момент нейтрино подавлен его массой.

Во второй главе изучается процесс двухкратной конверсии спиральности нейтрино $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$ в условиях сверхновой с магнитным полем в оболочке при наличии у нейтрино магнитного момента. Такой процесс неоднократно рассматривался в литературе. Впервые он был предложен Арноном Даром (1987) для объяснения подогрева остановившейся в оболочке ударной волны левыми нейтрино, рожденными из правых (стерильных), беспрепятственно покидающими ядро. Правые нейтрино образуются в ядре за счет электромагнитного рассеяния левых нейтрино на электронах и протонах. Левые нейтрино, образующиеся в результате спиновых осцилляций в магнитном поле оболочки позади фронта остановившейся ударной волны вновь её разогревают и подталкивают.

Дополнительный эффект, предложенный Волошиным (1988), это резонансная конверсия $\nu_L \leftrightarrow \nu_R$ в плотном веществе с магнитным полем. Такой резонанс возможен при определенном соотношении концентраций барионов и электронов ($N_B = 3N_e$), т.к. эффективный потенциал взаимодействия нейтрино с веществом пропорционален фактору $(N_e - N_B/3)$ (см., например, (2.26)). Согласно существующим моделям коллапса слой с нужным соотношением концентраций возникает в сверхновой на некотором этапе её эволюции. В результате численного решения уравнение Волошина, Аникин обнаружил существенное ослабление начального пика интенсивности нейтринного сигнала при учете магнитного поля порядка швингеровского и магнитного момента порядка $10^{-13} \mu_B$. Он показал также, что при несовпадении оси вращения звезды с направлением магнитного момента соответствующая поперечная компонента магнитного поля, влияющая на спиновые нейтринные осцилляции, может исчезать и вновь появляться вблизи полюсов. При этом в узкой области вблизи полюсов не возникает конверсии $\nu_L \leftrightarrow \nu_R$. Следовательно, в определенном направлении нейтринный сигнал будет иметь осциллирующий характер, т.е. при удачной для наблюдателя ориентации оси вращения может наблюдаться своеобразный «нейтринный пульсар».

В третьей главе изучен радиационный распад безмассового нейтрино $\nu \rightarrow \nu\gamma$ во внешнем магнитном поле. В локальном пределе слабого взаимодействия такой процесс соответствует приближению, в котором учитывается петлевой вклад e^+e^- -пары, излучающей фотон в магнитном поле. Соответствующий поляризационный оператор фотона исследовался в работах Скобелева (1975) и Шабада (1988) в отсутствие слабого взаимодействия. В своей диссертации Аникин сначала вычисляет вклад связан-

ного состояния e^+e^- -пары (позитрония) в поляризационный оператор фотона. Появление одномерного эффективного потенциала $\sim -\alpha/|z|$ вместо стандартного изотропного $\sim -\alpha/|r|$ для уравнения Шрёдингера в сильном магнитном поле, направленном по оси z , приводит к появлению глубокого нижнего уровня в спектре позитрония, расположенного значительно ниже стандартного вакуумного уровня (6.8 эВ). Это и определяет дополнительный вклад позитрония в поляризационный оператор фотона, резко меняющий закон дисперсии фотона и приводящий к расщеплению спектральной линии, отвечающей вкладу свободной e^+e^- -пары. В результате вероятность радиационного распада безмассового нейтрино с учетом вклада позитрония увеличивается примерно в пять раз по сравнению с вероятностью, рассчитанной с учетом вклада свободной e^+e^- пары, если магнитное поле превышает швингеровское значение $m_e^2/e \approx 4.41 \times 10^{13}$ Гс в 100–1000 раз. Этот результат является новым, существенно дополняющим предыдущие результаты Леинсона и Ораевского (1985) и Шабада-Усова (2003). В качестве приложения Аникин оценил т.н. «толчковую» скорость пульсара (pulsar kick velocity, v_{kick}) за счет асимметрии радиационного распада нейтрино в магнитном поле. Хотя эта скорость оказалась существенно меньше наблюдаемых скоростей ($v_{\text{kick}} = 10^2 - 2 \times 10^3$ км/сек, $\langle v_{\text{kick}} \rangle \sim 400$ км/сек), данный результат интересен с методической точки зрения. Возможно, следует изучить другие потенциально наблюдаемые астрофизические следствия усиленного радиационного распада нейтрино, а так же комбинации данного эффекта с другими независимыми эффектами, например с эффектами аномального гидродинамического переноса нейтрино (преимущественной эмиссией нейтрино вдоль оси вращения и вдоль оси магнитного поля в протонейтронной звезде), с асимметрией (угловой зависимостью) поглощения нейтрино и т.п.¹

Приведу некоторые замечания.

- Основным недостатком работы является, по-моему, неявно используемое «предположение» о том, что нейтрино определенного флейвора обладают определенными массами. Результаты многочисленных современных экспериментов с астрофизическими (в частности, солнечными), атмосферными, ускорительными и реакторными (анти)нейтрино фактически однозначно свидетельствуют о том, что состояния ν_e , ν_μ и ν_τ являются квантовыми суперпозициями состояний с определенными массами ν_1 , ν_2 и ν_3 . Это обстоятельство приводит, как известно, к пространственно-временным осцилляциям нейтринных флейворов. Характер нейтринных осцилляций качественно меняется в плотной среде за счет когерентного рассеяния («МСВ» эффект). МСВ эффект, в свою очередь, изменяет характер воздействия нейтрино на саму среду, если плотности нейтрино достаточно велики (что как раз имеет место при коллапсе). Многие результаты, полученные в диссертации можно с минимальными и более или менее очевидными оговорками применить к состояниям нейтрино с определенной массой. Многие, но, к сожалению, далеко не все... Автор, несомненно, хорошо понимает это и (к сожалению, предельно кратко) обсуждает необходимые обобщения (см. стр. 31) и возможное проявление смешивания ароматов нейтрино (см. стр. 50). Однако, имеются десятки, если не сотни работ, в которых детально изучается влияние нейтринных осцилляций на динамику сверхновой с учетом осцилляций, МСВ-эффекта, воз-

¹ Следует отметить, что в недавней работе Кузнецова и Михеева [Письма в ЖЭТФ 99 (2014) 771-781] была получена гораздо более оптимистичная оценка v_{kick} .

можных аномально больших переходных электромагнитных моментов и многих других родственных эффектов. Понятно, что в одной диссертации невозможно изучить все важные физические эффекты, но было бы желательным хотя бы перечислить уже известные «устоявшиеся» результаты (со ссылками на основные работы) и очертить (пусть даже на качественном уровне) область применимости используемого приближения (по сути отождествляющего флейворные состояния с состояниями с определенными массами) и «степень применимости» полученных в диссертации результатов к реальным сверхновым.

- Некоторые результаты диссертации приведены без вывода. Например, о факторе (2.49), характеризующем степень адиабатичности процесса конверсии сказано лишь, что он получен путем численного моделирования. Не приведены детали расчета вкладов в собственно-энергетический оператор (1.13), (1.14). Было бы полезным для читателя привести подробности вычислений в соответствующем Приложении или указать ссылки на работы, в которых можно найти детали расчета.

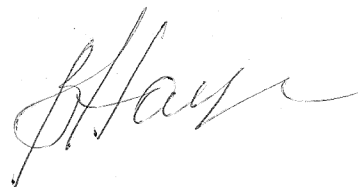
Соискатель проделал большую работу, продемонстрировал профессиональное владение методами теоретической физики и прекрасное знание проблематики. Диссертация написана хорошим литературным языком. Сделанные выше замечания не умаляют многих достоинств работы, являющейся интересным развитием теории нейтринных процессов в астрофизике.

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 её автор, Аникин Роман Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Наумов Вадим Александрович,
кандидат физико-математических наук,
начальник сектора нейтринной физики ЛТФ ОИЯИ, Дубна.
e-mail: vnaumov@theor.jinr.ru
тел.: +7 (496) 216-50-59
адрес: 141980 Дубна, Московская область, ОИЯИ,
ул. Жолио-Кюри 6.



Подпись В. А. Наумова заверяю:
ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ,
к.ф.-м.н. С. Н. Неделько

