

На правах рукописи

Шитова Анастасия Михайловна

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЙТРИНО СВЕРХВЫСОКОЙ  
ЭНЕРГИИ В ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ  
И СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Специальность 01.04.02 — теоретическая физика

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова» (ФГБОУ ВПО «ЯрГУ»).

**Научный руководитель:** доктор физ.-мат. наук, профессор,  
*Кузнецов Александр Васильевич*

**Официальные оппоненты:** *Блинников Сергей Иванович,*  
доктор физ.-мат. наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт Теоретической и Экспериментальной Физики», ведущий научный сотрудник;

*Горбунов Дмитрий Сергеевич,*  
доктор физ.-мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк (г. Москва)

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) по адресу: 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, дом 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН, г. Москва, и на сайте <http://www.inr.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

*С. В. Троицкий*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Интересным примером активного взаимодействия астрофизики, космологии и физики элементарных частиц являются достижения физики нейтрино — слабовзаимодействующей частицы, играющей решающую роль в эволюции сверхновых, а также многих других астрофизических явлениях. Именно исследованию свойств и взаимодействий нейтрино посвящена основная часть диссертации.

Космос предоставляет уникальные возможности для исследования взаимодействий элементарных частиц. Экстремальные физические условия недостижимы в земных лабораториях, однако могут быть типичными для астрофизических объектов. Прежде всего, это относится к звёздам: словосочетание «небесные лаборатории» прочно вошло в русский язык. Колоссальные значения физических параметров, таких как плотность, температура, интенсивность магнитного поля, а также наличие разнообразного компонентного состава приводят к существованию нетривиальных эффектов, помогающих проверять и опровергать существующие теории.

Гигантские потоки и слабый уровень взаимодействия делают нейтрино идеальным инструментом для изучения условий в глубине звёзд. Детектирование нейтрино и гравитационных волн позволит получить информацию о недрах звезды, очень важную для понимания механизма взрыва сверхновых. Нейтрино выходят из звезды гораздо быстрее, чем фотоны, запертые первое время внутри. Следовательно, первым сигналом взрыва станут именно зарегистрированные нейтрино, тогда как оптический сигнал придет несколькими часами позже. Может оказаться, что сверхновая будет оптически непрозрачной, или в результате сформируется черная дыра; в этом случае детектирование нейтринного и гравитационного сигналов окажется единственной наблюдательной возможностью обнаружения этого объекта. Поскольку нейтрино приходят быстрее, чем фотоны, регистрация нейтринного сигнала — прямое предсказание оптических наблюдений. Эта идея лежит в основе действия системы раннего оповещения о взрывах сверхновых (SNEWS — SuperNova Early Warning System) [1]. Для недоступных оптическому наблюдению сверхновых возможно определение

их местонахождения с использованием только нейтринного сигнала. Успехи в развитии физики нейтрино могут привести к осуществлению важных практических приложений, таких как нейтринное зондирование (в частности, зондирование Земли [2]) и нейтринная связь. В 2012 году в Национальной ускорительной лаборатории им. Энрико Ферми был произведен первый успешный эксперимент по передаче информации с помощью нейтрино [3]. Нет сомнения, что это чрезвычайно перспективная технология.

Настоящая диссертация посвящена исследованию процессов с участием нейтрино высоких энергий во внешней активной среде — магнитном поле и плазме. Экстремальные физические условия в астрофизических объектах открывают широкие возможности для реализации экзотических и редких процессов с участием элементарных частиц. Некоторые процессы, запрещенные в вакууме, в плазме становятся возможными.

Наряду с плазмой существенные изменения в процессах взаимодействия элементарных частиц могут наблюдаться в магнитных полях большой интенсивности (по сравнению с естественным масштабом магнитного поля, так называемым швингеровским значением  $B_e = m_e^2/e \simeq 4.41 \cdot 10^{13}$  Гс, где  $e > 0$  — элементарный заряд). Есть ясные указания на существование в природе полей, значительно превышающих критическое. Примером таких полей могут служить поля магнитаров — особого класса нейтронных звезд, эволюция которых определяется магнитным полем. В качестве другой «естественной лаборатории», где могли присутствовать сверхсильные магнитные поля, можно указать раннюю Вселенную.

В связи с недавней регистрацией на IceCube 28 событий высокоэнергетичных нейтрино, 2 из которых обладают рекордно высокими энергиями  $\sim$  ПэВ [4], на передний план выходят исследования процессов с участием нейтрино именно сверхвысокой энергии.

Таким образом, исследование свойств высокоэнергетичных нейтрино во внешней активной среде актуально.

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Цель диссертационной работы состоит в исследовании свойств нейтрино сверхвысокой энергии во внешней активной среде — магнитном поле и плазме — в различных астрофизических и кос-

мологических условиях.

В число основных задач, поставленных в диссертационной работе, входят следующие:

- 1) Исследование собственно энергетического оператора и дополнительной энергии, приобретаемой нейтрино в плазме, в пределе сверхвысоких энергий.
- 2) Анализ вероятности процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар в пределе «умеренно» сильного магнитного поля.
- 3) Получение выражений для пропагаторов заряженных векторного  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов стандартной модели в постоянном однородном магнитном поле в произвольной  $\xi$ -калибровке в виде разложения по уровням Ландау.

### **Научная новизна результатов**

Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

- На основе точных выражений для пропагаторов калибровочных бозонов вычислен собственно энергетический оператор нейтрино в плазме в пределе сверхвысоких энергий.
- Получено выражение для дополнительной энергии нейтрино сверхвысоких энергий в плазме с учетом нелокальности слабого взаимодействия. На основе найденной формулы проведена оценка границ кинематической возможности процесса нейтринного спинового света в условиях, характерных для Солнца и красных гигантов, нейтронных звёзд и ядер сверхновых.
- Получена формула для лидирующего вклада в вероятность процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар в пределе "умеренно" сильного магнитного поля. Результат аппроксимирован аналитической формулой, которая может быть использована для оценки эффективности процесса в различных астрофизических задачах.

- Проведен вывод пропагаторов заряженных векторного  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов стандартной модели в произвольной  $\xi$ -калибровке в виде разложения по уровням Ландау в постоянном однородном магнитном поле через полиномы Чебышёва-Лагерра. В работе также были получены выражения для пропагаторов заряженных векторного  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов стандартной модели в произвольной  $\xi$ -калибровке в скрещенном поле.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Выражения для собственно энергетического оператора нейтрино и дополнительной энергии нейтрино и антинейтрино в пределе сверхвысоких энергий, когда переход к локальному пределу слабого взаимодействия неравномерен.
- 2) Оценка кинематически допустимых областей для процесса нейтринного радиационного перехода с переворотом спиральности.
- 3) Оценка вероятностей процессов нейтринного рождения  $W$  и  $Z$  бозонов в плазме и соответствующих длин свободного пробега нейтрино сверхвысокой энергии.
- 4) Формула для лидирующего вклада в вероятность процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар в пределе умеренно сильного магнитного поля.
- 5) Выражения для пропагаторов заряженных векторного  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов стандартной модели в постоянном однородном магнитном поле в произвольной  $\xi$ -калибровке в виде разложения по уровням Ландау.

### **Практическая ценность работы**

Полученные в диссертации результаты представляют интерес в теоретических исследованиях в области астрофизики и физики элементарных частиц.

Анализ собственно энергетического оператора нейтрино сверхвысокой энергии в плазме позволяет исследовать влияние плазмы

на дисперсионные свойства нейтрино. Его вычисление, в частности, позволяет оценить дополнительную энергию, приобретаемую нейтрино в среде. Поскольку реальная астрофизическая среда (например, электрон-позитронная плазма) несимметрична по лептонным ароматам, нейтрино различных ароматов приобретают разную энергию, что может играть важную роль при исследовании нейтринных осцилляций в среде.

Полученные в диссертационной работе численные значения для границ кинематически допустимой области нейтринного спинового света могут быть использованы для оценки влияния рассматриваемого эффекта на протекание физических процессов в реальных астрофизических задачах. Сужение рамок возможности существования эффекта нейтринного спинового света с переворотом спиральности нейтрино в различных астрофизических ситуациях позволяет исключить вероятную переоценку значимости рассматриваемого эффекта при исследовании процессов с участием нейтрино и его влияния на ход астрофизических процессов.

Вероятность процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар важна для полного понимания нейтринных механизмов, управляющих взрывами сверхновых. В частности, рассматриваемый процесс может вносить вклад в дополнительное нагревание вещества ударной волны при магниторотационном взрыве сверхновой. Вероятность процесса, а также средняя потеря энергии и импульса нейтрино в умеренно сильном магнитном поле важна при исследовании слияний двойных звёздных систем, состоящих из нейтронных звёзд, или нейтронной звезды и чёрной дыры, при изучении излучения нейтрино с сильно замагниченного диска керровской чёрной дыры.

Полученные разложения пропагаторов во внешнем магнитном поле могут иметь важное методологическое значение. Использование произвольной калибровки позволяет сравнивать результаты, полученные в частных случаях выбранных калибровок, что оказывается важным при проверке конечного результата. В литературе известны случаи, когда вероятности процессов, вычисленные в различных калибровках, давали противоречивые данные, что в силу калибровочной инвариантности означало наличие ошибок в вычислениях. Полученные точные выражения для пропагаторов могут быть использованы для исследования вероятности распада

нейтрино на электрон и  $W$ - бозон в сверхсильных магнитных полях в астрофизических объектах и в условиях ранней Вселенной.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

- Научная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 21-25 ноября 2011)
- Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 12-16 ноября 2012)
- Международная научная конференция «Путь в науку» (секция «Теоретическая физика», ЯрГУ) (Ярославль, 2013)

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (Троицк), Института ядерных исследований РАН (Москва) и кафедры теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова (Ярославль).

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в числе которых 3 статьи в ведущих рецензируемых российских и международных журналах, 3 статьи в материалах российских и международных научных конференций и семинаров и 2 статьи — в тематических сборниках научных работ. Список работ приведён в конце автореферата.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, и заключения. Она содержит 7 рисунков. Список цитируемой литературы включает 121 наименование. Общий объём диссертации составляет 112 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обосновывается актуальность исследований дисперсионных свойств нейтрино во внешней активной среде, проводится обзор литературы по рассматриваемой теме, описано краткое содержание глав диссертационной работы. Каждая глава также сопровождается введением.

**Первая глава** посвящена исследованию собственно энергетического оператора нейтрино сверхвысоких энергий во внешнем магнитном поле.

Во введении к первой главе рассматривается влияние внешней активной среды на дисперсионные свойства частиц. Демонстрируется актуальность исследований на данную тематику, приводятся примеры условий задач, в которых важно знать нелокальный вклад в дополнительную энергию нейтрино.

В части 2 первой главы описывается метод получения выражения для собственно энергетического оператора нейтрино в плазме в пределе сверхвысоких энергий на основе точных выражений для пропагаторов  $W$  и  $Z$  бозонов.

Собственно энергетический оператор  $\Sigma(p)$  позволяет определить дополнительную энергию нейтрино в плазме:

$$\Delta E = \frac{1}{2E} \text{Tr}[\Sigma(p)\rho(p)], \quad (1)$$

где  $p^\alpha = (E, \mathbf{p})$  — 4-импульс нейтрино,  $\rho(p) = \nu(p)\bar{\nu}(p)$  — матрица плотности нейтрино.

В наиболее общем случае электронейтральной плазмы дополнительная энергия нейтрино  $\nu_\ell$  и антинейтрино  $\bar{\nu}_\ell$  может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} \Delta E^{\nu_\ell, \bar{\nu}_\ell} = \sqrt{2}G_F \left\{ \mp \frac{1}{2}(N_n - \bar{N}_n) \pm (N_{\nu_e} - \bar{N}_{\nu_e}) \pm \right. \\ \left. \pm (N_{\nu_\mu} - \bar{N}_{\nu_\mu}) \pm (N_{\nu_\tau} - \bar{N}_{\nu_\tau}) + \right. \\ \left. + \delta_{\ell e} [F_1(\pm\mu_e, m_W) - F_2(\mp\mu_e, m_W^*)] + \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} [F_1(\pm\mu_{\nu_e}, m_Z) - F_2(\mp\mu_{\nu_e}, m_Z^*)] \}. \quad (2)$$

В этой формуле  $G_F$  – константа Ферми,  $\mu_e, \mu_\nu$  – химические потенциалы электрона и нейтрино соответственно,  $N_n, N_{\nu_e}$  – концентрации нейтронов и нейтрино, а  $\bar{N}_n, \bar{N}_{\nu_e}$  – концентрации соответствующих античастиц, и введены функции:

$$F_{1,2}(\mu, m) = \frac{2m^2}{(2\pi)^3 E} \int (pk) \frac{d^3k}{\varepsilon} \left( e^{(\varepsilon-\mu)/T} + 1 \right)^{-1} (m^2 \pm 2(pk))^{-1}. \quad (3)$$

В обеих функциях  $F_2$  за счет разности в знаменателе присутствует резонансное поведение, учёт которого производится путём введения комплексных масс  $W$  – и  $Z$  – бозонов,  $m_{W,Z}^* = m_{W,Z} - \frac{1}{2} i \Gamma_{W,Z}$ , где полная ширина распада  $Z$  – бозона  $\Gamma_Z \simeq 2.5$  ГэВ, а  $W$  – бозона  $\Gamma_W \simeq 2.1$  ГэВ. Выражения для функций  $F_{1,2}$  значительно упрощаются в важных частных случаях, соответствующих реальным астрофизическим условиям. К примеру, в случае холодной плазмы (температура  $T \rightarrow 0$ ) электронный газ вырожден, а функция распределения электронов обращается в  $\theta$ -функцию Хевисайда. В диссертации приведены выражения для дополнительной энергии нейтрино сверхвысоких энергий в следующих предельных случаях: а) нерелятивистская холодная плазма, б) релятивистская холодная плазма, в) горячая плазма ядер сверхновых. В последнем случае полученное выражение при условии  $m_W^2 \gg 4ET$  допускает разложение по степеням начальной энергии нейтрино:

$$\begin{aligned} \Delta E^{\nu_e} = & \sqrt{2} G_F \left[ C_V^e \frac{\mu_e}{3\pi^2} (\mu_e^2 + \pi^2 T^2) - \frac{2}{3\pi^2} \frac{E}{m_W^2} \times \right. \\ & \times \left( \mu_e^4 + 2\pi^2 \mu_e^2 T^2 + \frac{7\pi^4}{15} T^4 \right) + \frac{8}{5\pi^2} \frac{E^2 \mu_e}{m_W^4} \times \\ & \times \left( \mu_e^4 + \frac{10\pi^2}{3} \mu_e^2 T^2 + \frac{7\pi^4}{3} T^4 \right) - \frac{64}{15\pi^2} \frac{E^3 \mu_e}{m_W^6} \times \\ & \left. \times \left( \mu_e^6 + 5\pi^2 \mu_e^4 T^2 + 7\mu_e^2 \pi^4 T^4 + \frac{31}{21} \pi^6 T^6 \right) + \dots \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

Для антинейтрино электронного типа можно получить аналогичную формулу; отличие будет только в знаках перед слагаемыми,

стоящими на нечетных местах. На рис. 1 приведены графики зависимости  $\Delta E(E)$  для случаев, когда из всей суммы (4) можно ограничиться лишь нулевым (локальный вклад) и несколькими первыми слагаемыми, а также график точной зависимости, полученный в результате численного интегрирования исходной формулы. Рисунок демонстрирует, что использование только нескольких членов в разложении дополнительной энергии в ряд по степеням начальной энергии приводит при высоких энергиях либо к завышенному, либо к заниженному значению результата.

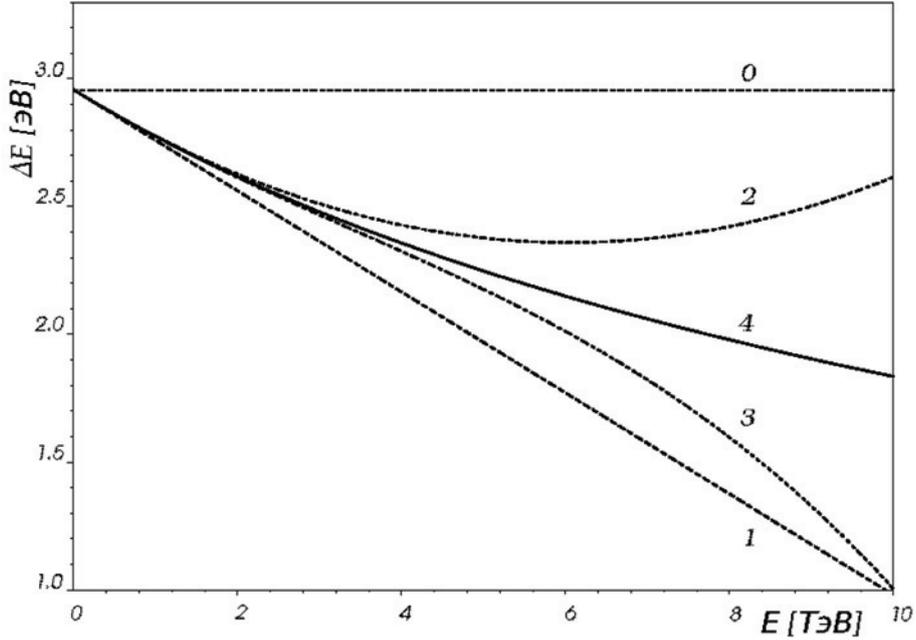


Рис. 1. Дополнительная энергия нейтрино в среде из электронов и позитронов в виде разложения в ряд по начальной энергии нейтрино (0 — локальный вклад, 1, 2, 3 — поправки с последовательным учётом слагаемых, пропорциональных  $\sim E$ ,  $\sim E^2$  и  $\sim E^3$ , 4 — точное значение функции).

Следует отметить важную особенность: мнимая часть дополнительной энергии антинейтрино в общем случае может быть отлична от нуля. Отличие от нуля мнимой части собственной энергии частицы говорит о её нестабильности, то есть электронное антинейтрино нестабильно по отношению к процессу  $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^-$  на электронах плазмы. Ширину этого процесса  $\omega$  можно легко найти, учитывая, что  $\omega = -2\text{Im}\Delta E$ . В пределе высоких энергий  $E \gg m_W \Gamma_W / \mu_e$  в релятивистской холодной плазме:

$$\omega_{\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^-}^{rel} = \frac{G_F m_W^4 \mu_e}{2\sqrt{2}\pi E^2} \left(1 - \frac{m_W^2}{4E\mu_e}\right) \theta\left(E - \frac{m_W^2}{4\mu_e}\right). \quad (5)$$

Соответствующее выражение для случая нерелятивистской холодной плазмы:

$$\omega_{\bar{\nu}_e+e^-\rightarrow W^-}^{non-rel} = \frac{2\sqrt{2}G_F N_e E_0^2 \Gamma_W / m_W}{E_0^2 \Gamma_W^2 / m_W^2 + (E - E_0)^2}, \quad (6)$$

где  $E_0 = m_W^2 / (2m_e)$ . Вероятность процесса в условиях горячей плотной плазмы,  $\mu_e \sim T \gg m_e$ , при больших энергиях нейтрино,  $E \gg m_W \Gamma_W / \mu_e$ , принимает вид:

$$\omega_{\bar{\nu}_e+e^-\rightarrow W^-} = \frac{G_F m_W^4 T}{2\sqrt{2} \pi E^2} \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{4\mu_e E - m_W^2}{4ET} \right) \right]. \quad (7)$$

В пределе  $T \rightarrow 0$  получаем из (7) соответствующее выражение (5) для условий «холодной» плазмы. Вероятность процесса рождения  $W^+$  в результате рассеяния нейтрино электронного типа  $\nu_e$  на позитронах плазмы можно получить из выражения (7), сделав замену  $\mu_e \rightarrow -\mu_e$ . Поскольку в плотной плазме ядер сверхновых присутствуют термальные нейтрино и антинейтрино всех ароматов, следует также рассмотреть процесс рождения  $Z$ -бозонов. Вероятность данного процесса при рассеянии высокоэнергичных антинейтрино аромата  $\ell$  на термальных нейтрино того же аромата  $\nu_\ell$  может быть вычислена по формуле, аналогичной (7), где вместо массы  $W$ -бозона следует подставить массу  $Z$ -бозона, и сделать замену  $\mu_e \rightarrow \mu_{\nu_\ell}$ .

Вторая часть первой главы посвящена оценке кинематических границ нейтринного радиационного перехода  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$  на основе полученных выражений для дополнительной энергии высокоэнергичных нейтрино.

В случае, если нейтрино обладает магнитным моментом, возможен процесс взаимодействия с фотонами, в результате которого происходит переворот спиральности нейтрино. В такой ситуации появление дополнительной энергии только у левых нейтрино открывает новые кинематические возможности для нейтринного радиационного перехода  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$ . Такой эффект, названный «нейтринным спиновым светом» ( $SL\nu$ ), детально исследовался в серии статей (см., например, [5, 7]).

Границы кинематически разрешенной области для процесса нейтринного спинового света определяются неравенством [6] (см. также формулу (10) в статье [7]):  $2E\Delta E > m_\gamma^2$ .

В диссертации приведены оценки границ кинематически допустимой области для процесса в условиях, характерных для Солнца и красных гигантов, нейтронных звёзд и ядер сверхновых. Получены также оценочные значения длин свободного пробега нейтрино по отношению к процессам рождения  $W$  и  $Z$  бозонов, которые следует сопоставить с длиной свободного пробега нейтрино по отношению к процессу нейтринного спинового света [8].

Согласно полученным оценкам, процесс нейтринного спинового света запрещен для нейтрино любых энергий. Для антинейтрино сверхвысоких энергий из кинематически разрешенной области процесс оказывается подавлен по сравнению с процессами рождения  $W$  и  $Z$  бозонов.

**Во второй главе** диссертации исследуется процесс нейтринного рождения электрон-позитронных пар. При энергиях нейтрино ниже порога рождения  $W$ -бозонов этот процесс может рассматриваться как эффективный механизм потери энергии нейтрино. Исследование вероятности процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар может быть разделено на несколько самостоятельных задач, соответствующих различным соотношениям между тремя ключевыми параметрами: энергией начального нейтрино  $E$ , параметром, пропорциональным индукции магнитного поля,  $\beta = eB$ , и массой электрона  $m_e$ . В силу специфической кинематики заряженной частицы в электромагнитном поле электрон-позитронная пара может иметь достаточно большой пространственно-подобный импульс, так что кинематика процесса нейтринного рождения нечувствительна к массе нейтрино. Как показал анализ, в литературе известны решения задачи в предельных случаях сильного и скрещенного поля, тогда как для астрофизических приложений наиболее интересным может оказаться случай «умеренно сильного» поля, когда динамический параметр принимает умеренно большие значения.

В рассматриваемом пределе формула для вероятности процесса

нейтринного рождения электрон-позитронных пар имеет вид:

$$W = \frac{G_F^2(C_V^2 + C_A^2)2^{-1/3}E^{2/3}\beta^{2/3}}{128\pi^5} \left(\frac{\chi}{4}\right)^{2/3} \int_0^{4A} d\kappa \int_{\kappa/A}^{(1+\kappa/(4A))^2} \frac{d\xi^2}{2\xi} \int_0^{2\pi} d\phi \times \\ \times \text{Im} \left[ Y_{VV}^{(1)} \frac{|q\varphi j|^2}{q_{\perp}^2} + Y_{VV}^{(2)} \frac{|q\tilde{\varphi} j|^2}{q_{\parallel}^2} + Y_{VV}^{(3)} \frac{q^2 |q\varphi\varphi j|^2}{q_{\perp}^2 q_{\parallel}^2} \right]. \quad (8)$$

В этом выражении  $q = P - P'$  – изменение 4-вектора импульса нейтрино,  $\varphi_{\alpha\beta}$  – безразмерный тензор внешнего магнитного поля,  $\varphi_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta}/\beta$ ,  $\tilde{\varphi}_{\alpha\beta}$  – дуальный тензор (у 4-векторов и тензоров, стоящих в круглых скобках, тензорные индексы полагаются свёрнутыми последовательно),  $Y^{VV}$ ,  $Y^{VA}$  и  $Y^{AA}$  – функции  $(q\varphi\varphi q) = q_{\perp}^2$  и  $(q\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}q) = q_{\parallel}^2$ , входящие в обобщенные вектор-векторные, вектор-аксиальные и аксиал-аксиальные амплитуды процесса  $j \rightarrow \bar{j}\bar{j} \rightarrow j'$  [9],  $\chi$  – динамический параметр,  $A$  – безразмерная комбинация полевого параметра и энергии  $A = 4^{-1/3}E^{4/3}\beta^{-2/3}$ . Интегрирование производится по следующим лоренц-инвариантным переменным:

$$\kappa = -\frac{q^2}{[4e^2(PFFP)]^{1/3}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{(qFFq)}{(PFFP)}}, \quad \varphi = \text{arctg} \frac{(PFP')}{(P\tilde{F}P')}. \quad (9)$$

Полученная формула для лидирующего логарифмического вклада в вероятность процесса совпадает с известными решениями в пределе скрещенного поля и в пределе, когда энергия начального нейтрино является максимальным параметром задачи, а масса электрона полагается равной нулю.

Логарифмический вклад в вероятность процесса может быть аппроксимирован аналитической формулой вида:

$$W(x_1, x_2) = \frac{2G_F^2(C_V^2 + C_A^2)e^2(PFFP)}{27\pi^3 E} \ln \left( \frac{x_1^{1/2}}{x_2^{3/4} + \alpha x_1^{3/2}} \right), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – численный коэффициент порядка единицы, и введены параметры:  $x_1 = \beta/E^2$ ,  $x_2 = m_e^2/E^2$ .

Полученный результат может иметь важное прикладное значение в астрофизике.

Среди астрофизических процессов, для исследования которых может оказаться важным знание вероятности процесса  $\nu \rightarrow \nu e^+ e^-$ ,

следует назвать, в первую очередь, слияние нейтронных звёзд. В этом случае можно пренебречь эффективным влиянием плазмы на ход процесса.

Другой интересный случай применения полученных результатов — изучение нейтринного излучения с сильно замагниченного диска керровской черной дыры [10, 11]. Использование предела скрещенного поля в этом случае некорректно. Процесс нейтринного рождения электрон-позитронных пар также может вносить вклад в дополнительное нагревание вещества ударной волны при магниторотационном взрыве сверхновой [12, 13].

**Третья глава** посвящена выводу пропагаторов заряженных  $W$ -бозона и скалярного  $\Phi$ -бозона в произвольной  $\xi$ -калибровке в виде разложения по уровням Ландау.

Во введении к третьей главе обосновывается важность знания различных представлений для пропагаторов калибровочных частиц и условий применимости конкретных представлений в различных задачах. В работе используется техника вычислений, соответствующая картине Фарри (метод, предложенный Соколовым и развитый Соколовым и Терновым при исследовании синхротронного излучения). Считается, что в начальном и конечном состояниях частица находится во внешнем поле и описывается точным решением уравнения Дирака в этом поле, а внутренние линии в петлевых квантовых процессах соответствуют точным пропагаторам, построенным на основе данных решений. Пропагаторы описывают распространение частицы между двумя актами элементарного взаимодействия и являются, по своей сути, функциями Грина.

В первом разделе описываются представления пропагаторов заряженных  $W$  и скалярного  $\Phi$  бозонов в произвольной  $\xi$ -калибровке в формализме собственного времени Фока, когда выражение для пропагатора разбивается на произведение двух сомножителей, один из которых калибровочно и трансляционно инвариантен, а второй представляет собой неинвариантную фазу. В литературе также часто используются фурье-образы трансляционно инвариантной части пропагатора. Среди работ, посвященных исследованию пропагаторов частиц во внешнем поле, следует выделить статью [14], где проведено вычисление собственно-энергетического оператора нейтрино в магнитном поле в произвольной  $\xi$ -калибровке.

В диссертации приводятся выражения для пропагаторов в пределах слабого и скрещенного поля. Далее на примере пропагатора электрона подробным образом излагается суть метода получения представления пропагаторов в виде разложения по уровням Ландау. В заключительной части главы излагается непосредственно способ разложения пропагаторов заряженных  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов по уровням Ландау в произвольной  $\xi$ -калибровке.

Пропагатор  $W$ -бозона может быть представлен в виде:

$$\begin{aligned}
G_{\mu\nu}(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{-i}{q_{\parallel}^2 - m_W^2 - \beta(2n-1)} & \left\{ 2(\tilde{\varphi}\tilde{\varphi})_{\mu\nu} \ell_{n-1}(\alpha) - \right. \\
& - (\varphi\varphi)_{\mu\nu} \left( \ell_n(\alpha) + \ell_{n-2}(\alpha) \right) + i\varphi_{\mu\nu} \left( \ell_n(\alpha) - \ell_{n-2}(\alpha) \right) + \\
& + \frac{\xi - 1}{q_{\parallel}^2 - \xi m_W^2 - \beta(2n-1)} \left[ \left( 2q_{\mu}q_{\nu} + i\beta\varphi_{\mu\nu} \right) \ell_{n-1}(\alpha) + \right. \\
& + i \left( 2(\varphi q)_{\mu}q_{\nu} + 2q_{\mu}(q\varphi)_{\nu} - i\beta(\varphi\varphi)_{\mu\nu} \right) \ell'_{n-1}(\alpha) - \\
& \left. \left. - 2(\varphi q)_{\mu}(q\varphi)_{\nu} \ell''_{n-1}(\alpha) \right] \right\}, \tag{11}
\end{aligned}$$

где  $\ell_n(\alpha) = (-1)^n e^{-\alpha} L_n(2\alpha)$ ,  $\alpha = q_{\perp}^2/\beta$ ,  $L_n(x)$  – полиномы Чебышева–Лагерра (предполагается, что  $L_{-1}(x) \equiv 0$ ).

Пропагатор  $\Phi$ -бозона в  $\xi$ -калибровке,  $D(q)$ , восстанавливается из (11) в виде:

$$D(q) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2i \ell_{n-1}(\alpha)}{q_{\parallel}^2 - \xi m_W^2 - \beta(2n-1)}. \tag{12}$$

В **заключении** подводятся итоги работы; кратко сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации представлены следующие результаты:

- 1) Получены формулы для вычисления собственно энергетического оператора нейтрино, а, следовательно, и дополнительной энергии нейтрино и антинейтрино в «холодной» и горячей плазме, основанные на использовании точных выражений

для пропагаторов  $W$ - и  $Z$ -бозонов, при сверхвысоких энергиях нейтрино.

- 2) Проанализированы кинематически допустимые области для процесса нейтринного радиационного перехода с переворотом спиральности. Показано, что для нейтрино и антинейтрино сверхвысоких энергий процессы рождения  $W$ - и  $Z$ -бозонов в плазме являются доминирующими, тогда как процесс «нейтринного спинового света» кинематически запрещён практически во всех реальных астрофизических ситуациях.
- 3) Проведен анализ формулы для вероятности процесса нейтринного рождения электрон-позитронных пар в пределе умеренно сильного магнитного поля. Получена формула для лидирующего вклада в вероятность процесса в рассматриваемом пределе. Выполнено численное интегрирование полученного выражения, результат аппроксимирован аналитической функцией.
- 4) Получены выражения для пропагаторов заряженных векторного  $W$ - и скалярного  $\Phi$ -бозонов стандартной модели в постоянном однородном магнитном поле в произвольной  $\xi$ -калибровке в виде разложения по уровням Ландау. Описаны различные представления пропагаторов заряженных частиц в постоянном однородном магнитном поле, которые следует использовать при анализе электрослабых процессов в сильном внешнем поле.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Shitova A. M. Ultra-high energy neutrino dispersion in plasma and radiative transition  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$  // International Journal of Modern Physics A, 2011. V. 26, № 27, 28, P. 4773 — 4784.
- [2] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Шитова А. М. Собственно энергетический оператор нейтрино в плазме в пределе сверх-

высоких энергий // Ядер. Физика, 2013. Т. 76, Вып. 11, С. 1425 – 1432.

- [3] Шитова А. М. Процесс нейтринного рождения электрон-позитронных пар в пределе «умеренно сильного» магнитного поля // Ярославский педагогический вестник, 2013. Т. 3, № 4, С. 72 – 77.
- [4] Кузнецов А. В., Округин А. А., Шитова А. М. Пропагаторы заряженных частиц во внешнем магнитном поле в разложении по уровням Ландау // Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова, 2012. № 2, С. 40 – 47.
- [5] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Шитова А. М. Собственно-энергетический оператор нейтрино в плазме в пределе сверхвысоких энергий // Вестник Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова, 2011. № 1, С. 22 – 28.
- [6] Шитова А. М. Дополнительная энергия нейтрино в плазме в пределе сверхвысоких энергий и радиационный переход  $\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma$  // Путь в науку. Физика: Материалы Международной молодежной научно-практической конференции/Гл. ред. С. П. Зимин. Ярославль: ЯрГУ, 2013. 115 с. С. 39.
- [7] Шитова А. М. Пропагаторы W-бозона и скалярного  $\Phi$ -бозона в произвольной  $\xi$ -калибровке в разложении по уровням Ландау // Путь в науку. Физика: Материалы Международной молодежной научно-практической конференции/Гл. ред. С. П. Зимин. Ярославль: ЯрГУ. 2013, 115 с., С. 40.
- [8] Кузнецов А. В., Округин А. А., Шитова А. М. Пропагаторы заряженных частиц во внешнем магнитном поле в разложении по уровням Ландау // Тезисы докладов Международной Сессии-Конференции Секции Ядерной Физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» 2012. М.: НИЯУ МИФИ, 2012, 152 с., С. 148.

## Список литературы

- [1] Antoniola P., Fienberg R. T., Fleurot F. *et al.* SNEWS: The Supernova Early Warning System // *New J.Phys.*, 2004. P. 6 – 114.
- [2] Fields B. D., Hochmuth K. A. Imaging the Earth's Interior: the Angular Distribution of Terrestrial neutrinos // *Earth Moon Planets*, 2006. V. 99, P. 155 – 181.
- [3] Stancil D. D., Adamson P., Alania M. *et al.* Demonstration of Communication using neutrinos // *Mod. Phys. Lett. A*, 2012. V. 27, P. 1250077.
- [4] Aartsen M. G., Abbasi R., Abdou Y. *et al.* First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube // *Phys. Rev. Lett.*, 2013. V. 111, P. 021103.
- [5] Studenikin A. Quantum treatment of neutrino in background matter // *J. Phys. A: Math. Gen.*, 2006. V. 39, P. 6769 – 6776.
- [6] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Plasma induced neutrino radiative decay instead of neutrino spin light // *Mod.Phys. Lett. A*, 2006. V. 21, № 23, P. 1769 – 1775.
- [7] Grigoriev A., Lokhov A., Studenikin A., Ternov A. The effect of plasmon mass on spin light of neutrino in dense matter // *Phys.Lett. B*, 2012. V. 718, P. 512 – 515.
- [8] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Plasma induced fermion spin-flip conversion  $f_L \rightarrow f_R + \gamma$  // *Int. J. Mod. Phys. A*, 2007. V. 22, № 19, P. 3211 – 3227.
- [9] Боровков М. Ю., Кузнецов А. В., Михеев Н. В. Однопетлевая амплитуда перехода  $j \rightarrow f\bar{f} \rightarrow j'$  во внешнем электромагнитном поле // *Ядер. физика*, 1999. Т. 62, В. 9, С. 1714 – 1722.
- [10] Гвоздев А. А. Огнев И. С. Эффективность рождения электрон-позитронных пар нейтринным потоком с аккреционного диска керровской черной дыры // *Письма в ЖЭТФ*, 2001. Т. 74, С. 330-334.

- [11] Zalamea I., Beloborodov A. M., Neutrino heating near hyper-accreting black holes // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2011. V. 410, P. 2302 – 2309.
- [12] Bisnovatyi-Kogan G. S. Asymmetric neutrino emission and formation of rapidly moving pulsars // Astron. Astrophys. Trans., 1993. V. 3, № 4. P. 287 – 294.
- [13] Гвоздев А. А., Огнев И. С. Влияет ли сильное магнитное поле на нейтринное нагревание ударной волны сверхновой? // Письма в Астрон. Ж., 2005. Т.31, С. 496 – 499.
- [14] Erdas A., Isola C. Neutrino self-energy in a magnetized medium in arbitrary  $\xi$ -gauge // Phys. Lett. B, 2000. V. 494, № 3 – 4. P. 262 – 272.