

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
**ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН**

На правах рукописи

Округин Александр Александрович

**МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ  
ДИРАКОВСКОГО НЕЙТРИНО  
И ДИНАМИКА ВЗРЫВА СВЕРХНОВОЙ**

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 — 2010

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук А. В. Кузнецов (ЯрГУ, Ярославль)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук С. И. Блинников (ИТЭФ, Москва)

доктор физико-математических наук В. Б. Семикоз (ИЗМИРАН, Троицк)

Ведущая организация:

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Института ядерных исследований РАН по адресу: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ, г. Москва.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01

Б. А. Тулупов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

Астрофизические и космологические наблюдения и предпосылки стали частью основной методологии для получения эмпирической информации по существующим или гипотетическим частицам и их взаимодействиям. «Небесные лаборатории» дополняют ускорительные и неускорительные эксперименты, особенно область физики частиц, которая включает в себя слабо взаимодействующие частицы. Среди них нейтрино — одна из интереснейших частиц. Астрофизика и космология играют фундаментальную роль в физике нейтрино, поскольку свойства звёзд и Вселенной в целом дают некоторые из наиболее сильных ограничений на нестандартные свойства этих трудноуловимых частиц.

Данное исследование проведено на стыке квантовой теории поля, астрофизики и космологии — перспективных тесно связанных друг с другом направлений современной физики. В Стандартной модели нейтрино приписываются самые минимальные свойства, которые согласуются с экспериментальными данными: нулевые масса, электрический заряд, дипольные электрический и магнитный моменты, вероятность распада — почти все физические характеристики считаются равными нулю. Это простая картина, и любое отклонение от неё будет чувствительным инструментом для проверки физики за пределами Стандартной модели. Поэтому столь привлекательны исследования по поискам масс нейтрино и их смешивания (в том числе эксперименты по обнаружению и подтверждению осцилляций нейтрино), по распадам нейтрино, по их электромагнитным свойствам и проч. И даже наделённые «минимальными» характеристиками нейтрино играют важную роль в астрофизике, так как энергетические потери в звёздах по современным представлениям определяются в основном нейтринными потерями благодаря их слабому взаимодействию с веществом. Кроме того, по этой же причине они оказываются основным действующим элементом в термальной и динамической эволюции как сверхновых, так и Вселенной. Это объясняется тем, что слабо взаимодействующие нейтрино достигают термального равновесия в двух возможных физически интересных случаях: в ранней Вселенной незадолго до эпохи нуклеосинтеза и в ядре сверхновой за несколько секунд до коллапса. Таким образом, это причина, по которой задачи изучения квантовых процессов с участием таких слабо взаимодействующих частиц (экспериментально обнаруженных и гипотетических: нейтрино — стандартных и нестандартных; голдстоунов-

ских и псевдоголдстоуновских бозонов: аксионов, майоронов, фамилонов; WIMPs) в астрофизических условиях представляют большой интерес: за счёт их слабого взаимодействия с веществом они могут сильно влиять на энергетику астрофизических процессов, а включение нестандартных свойств может существенно менять ход этих процессов, что может быть обнаружено в наблюдениях.

Одним из подобных «новых» свойств нейтрино, которому посвящена большая часть настоящего диссертационного исследования, может быть магнитный момент нейтрино, значительный интерес к которому возник после знаменательного события — вспышки *SN1987A* — в связи с моделированием взрыва сверхновой, в котором гигантский исходящий поток нейтрино по сути определяет энергетику процесса. Это означает, что такая микроскопическая характеристика нейтрино как магнитный момент может иметь решающее влияние на макроскопические свойства подобного астрофизического события. Нейтрино левой спиральности, запертые внутри ядра сверхновой во время коллапса, могут перейти в правоспиральные. Этот процесс возможен благодаря взаимодействию магнитного момента дираковского нейтрино с виртуальным плазмоном, который может как рождаться, так и поглощаться:

$$\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma^*, \quad \nu_L + \gamma^* \rightarrow \nu_R.$$

Слишком большой поток правых стерильных нейтрино, рождающихся во взаимодействиях с участием магнитного момента, покидая ядро, может не оставить достаточного количества энергии, необходимой для объяснения наблюдаемой нейтринной светимости сверхновой. Таким образом, отсюда может быть установлена верхняя граница на магнитный момент нейтрино.

Процессы с участием нейтрино играют определяющую роль в явлениях такого рода, как взрывы сверхновых или при слиянии нейтронных звёзд. Слабое взаимодействие с веществом (которое определяет большие длины свободного пробега) даже в астрофизических условиях позволяет нейтрино, огромным потоком движущимся сквозь плотную плазму и сильное магнитное поле, быть основной составляющей в процессе, через который сверхновые теряют свою энергию. Здесь большое значение имеет величина магнитного момента нейтрино. Именно процессы с его участием могут оказывать влияние на динамику взрывов сверхновых.

Так, в процессе магнито-индуцированной резонансной конверсии правых нейтрино с их последующим поглощением в ходе обратного бета-процесса вблизи области затухания ударной волны магнитный момент нейтрино при-

нимает непосредственное участие. Данный процесс претендует быть возможным механизмом стимулирования взрыва сверхновой в условиях сильного магнитного поля, способным «оживить» затухающую ударную волну. Это важное направление поиска механизма взрыва коллапсирующих сверхновых с привлечением ненулевого магнитного момента нейтрино, впервые предложенное в работе А. Дара 1987 г.

Все предыдущие ограничения на магнитный момент нейтрино были сделаны на основе очень упрощённых моделей ядра сверхновой в виде однородного шара с усреднёнными величинами физических параметров. Кроме того, величины параметров по современным представлениям выглядят скорее завышенными, чем типичными. В связи с этим возникла необходимость провести более аккуратную оценку магнитного момента нейтрино в рамках современных моделей взрывов сверхновых с учётом распределений физических параметров и их эволюции во времени. Рассматриваются только дираковские нейтрино, поскольку в этом случае взаимодействие магнитного момента с фотонами переводит активные левые нейтрино в правые, которые стерильны по отношению к слабому взаимодействию и могут свободно покинуть центральную область сверхновой.

Таким образом, задача исследования магнитного момента дираковского нейтрино, а также его влияния на динамику взрыва сверхновой актуальна.

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

Цель настоящей диссертации состоит в исследовании свойств нейтрино в астрофизических и космологических условиях и их влияния на процессы в астрофизических объектах.

В число задач, на которые нацелено данное диссертационное исследование, входят:

- 1) Изучение магнитного момента нейтрино дираковского типа и получение ограничения на его величину на основе анализа нейтринной светимости сверхновых.
- 2) Анализ возможного влияния магнитного момента дираковского нейтрино на динамику взрывов сверхновых.
- 3) Получение пропагатора электрона в магнитном поле в виде интеграла по продольным компонентам 4-импульса электрона на основе решений уравнения Дирака в поле.

### **Научная новизна результатов.**

Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

- На основе данных реалистичных моделей сверхновых по вычисленной вероятности рождения правых нейтрино в центральной части сверхновой из условия ограниченности светимости правоспиральных нейтрино величиной светимости нейтрино левой спиральности получены ограничения сверху на величины комбинированного и усреднённого по ароматам магнитного момента дираковского нейтрино.
- Проведён анализ двукратной конверсии спиральности нейтрино в условиях сверхновой. Показано, что при определённых значениях магнитного момента нейтрино светимость правых нейтрино из ядра сверхновой с одной стороны достаточна мала, чтобы не исказить динамику сверхновой, и, с другой, она оказывается достаточной, чтобы при условии их полной конвертации обратно в левые нейтрино в оболочке сверхновой обеспечить требуемый уровень светимости левых нейтрино, который необходим для передачи оболочке сверхновой недостающей кинетической энергии  $\sim 10^{51}$  эрг. Проанализирован процесс резонансной конверсии правоспиральных нейтрино в левоспиральные в магнитном поле оболочки сверхновой и определена величина магнитного поля, обеспечивающего выполнение резонансного условия.
- Проведён вывод стандартными методами квантовой теории поля точных пропагаторов электрона и векторного бозона во внешнем магнитном поле в виде суммы по уровням Ландау из точных решений уравнения Дирака в поле.

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

- 1) Проведение оценки светимости правоспиральных нейтрино в ядре сверхновой и получение ограничения на магнитный момент дираковского нейтрино в реалистичных моделях сверхновых с учётом радиальных распределений и временной эволюции физических параметров.
- 2) Теоретический анализ процесса двукратного переворота спиральности нейтрино в сверхновой как возможного решения вопросов динамики взрыва сверхновой. Выяснение условий резонансной конверсии правоспиральных нейтрино в левые в оболочке сверхновой и возможности

реализации механизма Дара двукратной конверсии спиральности нейтрино, который обеспечивает дополнительную энергию, достаточную для стимулирования ударной волны сверхновой.

- 3) Получение пропагатора заряженного фермиона во внешнем магнитном поле в виде суммы по уровням Ландау на основе точного решения уравнения Дирака в магнитном поле.

**Практическая ценность работы** состоит в определении нового ограничения на величину магнитного момента дираковского нейтрино более надёжным способом, что даёт пределы на вклад нестандартных свойств нейтрино в «новую» физику и может быть использовано в тестах расширений Стандартной модели. Кроме того, результат важен для дальнейшего поиска механизмов взрыва сверхновых, при исследовании слияния нейтронных звёзд, включая численное моделирование подобных астрофизических явлений, в которых реализуются подходящие условия, где величина магнитного момента может иметь большое значение.

Проведённый анализ двукратной конверсии спиральности дираковского нейтрино в условиях сверхновой возобновляет интерес к данному процессу как к возможному механизму стимулирования останавливающейся ударной волны, подтверждающий его состоятельность при не слишком жёстких условиях: магнитный момент нейтрино должен находиться в интервале  $10^{-13} \mu_B < \mu_\nu < 10^{-12} \mu_B$ , и в области между нейтриносферой и зоной стагнации ударной волны должно существовать магнитное поле  $\sim 10^{13}$  Гс.

Разложения пропагаторов электрона и векторного бозона во внешнем магнитном поле интересны с методологической точки зрения, поскольку в литературе, насколько нам известно, отсутствует их прямой вывод стандартными методами квантовой теории поля. Данный вопрос может быть полезен при вычислениях процессов в сильных магнитных полях в астрофизических объектах и в условиях ранней Вселенной.

### **Апробация результатов.**

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

- Конференция «Физика нейтронных звёзд» (С.-Петербург, 2008);
- XIV Международная Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц (Москва, 2009);

- Сессия-конференция секции ядерной физики Отделения физических наук РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 2009);
- Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2009);
- 16-ый Международный семинар по физике высоких энергий «Кварки» (Коломна, 2010).

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах Института ядерных исследований РАН (Москва), Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ и кафедры теоретической физики Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в числе которых 3 статьи в ведущих рецензируемых российских и международных журналах, 2 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 17 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы включает 127 наименований. Общий объём диссертации составляет 115 страниц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, проведён обзор литературы по данной тематике, охарактеризованы методы исследований. Сформулирована цель работы и дан краткий обзор содержания глав диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена исследованию процесса переворота спиральности нейтрино в ядре сверхновой. и нахождению ограничения сверху на магнитный момент дираковского нейтрино из нейтринной светимости сверхновой. Здесь представлены расчёты светимости правых нейтрино в реалистичных моделях ядра сверхновой и на основе этих вычислений определяется ограничение сверху на магнитный момент нейтрино.



В первом разделе рассматриваются возможные наблюдательные проявления магнитного момента нейтрино и перечислены основные прямые и косвенные экспериментальные ограничения на его величину. Значительный интерес к магнитному моменту нейтрино возник после знаменательного события — вспышки *SN1987A* — в связи с моделированием взрыва сверхновой, в котором гигантский исходящий поток нейтрино фактически определяет энергетику процесса. Такая микроскопическая характеристика нейтрино как магнитный момент может иметь решающее влияние на макроскопические свойства подобного астрофизического события. Исследуется процесс переворота спиральности нейтрино внутри ядра сверхновой во время коллапса за счёт взаимодействия магнитного момента дираковского нейтрино с виртуальным плазмоном, который может как рождаться, так и поглощаться:

$$\nu_L \rightarrow \nu_R + \gamma^*, \quad \nu_L + \gamma^* \rightarrow \nu_R. \quad (1)$$

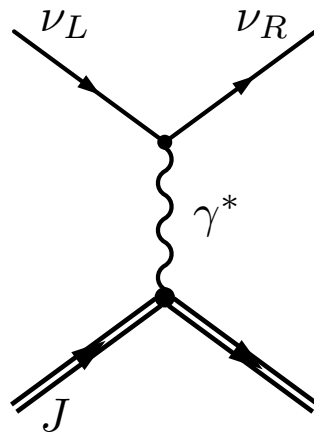


Рис. 1. Диаграмма Фейнмана для переворота спиральности нейтрино при рассеянии через промежуточный плазмон  $\gamma^*$  на электромагнитном токе плазмы  $J$ .

Рассматриваются только дираковские нейтрино, поскольку в этом случае взаимодействие магнитного момента нейтрино (и диагональных, и недиагональных составляющих) с фотонами переводит активные левые нейтрино в правые, которые стерильны по отношению к слабому взаимодействию и могут покинуть ядро сверхновой.

Данный процесс изучался многими авторами [8–15]. В работе [15] было обнаружено сильное доминирование рассеяния на протонах. Однако, все предыдущие исследования [8–15] были основаны на очень упрощённых моделях ядра сверхновой как однородного статического шара с несколькими усреднёнными величинами физических параметров. Более того, величины

параметров выглядят, по современным представлениям, скорее завышенными, чем типичными. Таким образом, возникла необходимость провести оценку магнитного момента нейтрино более надёжным способом на основе реалистичных моделей взрыва сверхновой.

Во втором разделе данной главы проведено вычисление амплитуды процесса переворота спиральности за счёт рассеяния на компонентах плазмы. Представлены собственные значения тензора поляризации  $\Pi_{\alpha\beta}$  фотона в плазме для протонных, электронных и ионных вкладов протонов, электронов и ионов. Получено общее выражение для вероятности рождения правых нейтрино с фиксированной энергией. Рассматриваются вклады различных компонент плазмы в собственные значения тензора поляризации фотона в плазме.

В третьем разделе оценивается светимость ядра по отношению к излучению правоспиральных нейтрино, и получено ограничение сверху на магнитный момент нейтрино, с учётом радиальных распределений и временной эволюции физических параметров. Полученные формулы для вероятности рождения правых нейтрино и их светимости могут быть использованы для установления ограничения сверху на магнитный момент нейтрино путём сравнения светимости ядра сверхновой, вычисленной из спектра энергии правых нейтрино, со светимостью левых нейтрино  $L_{\nu_L} \sim 10^{52} - 10^{53}$  эрг/сек [16, 17].

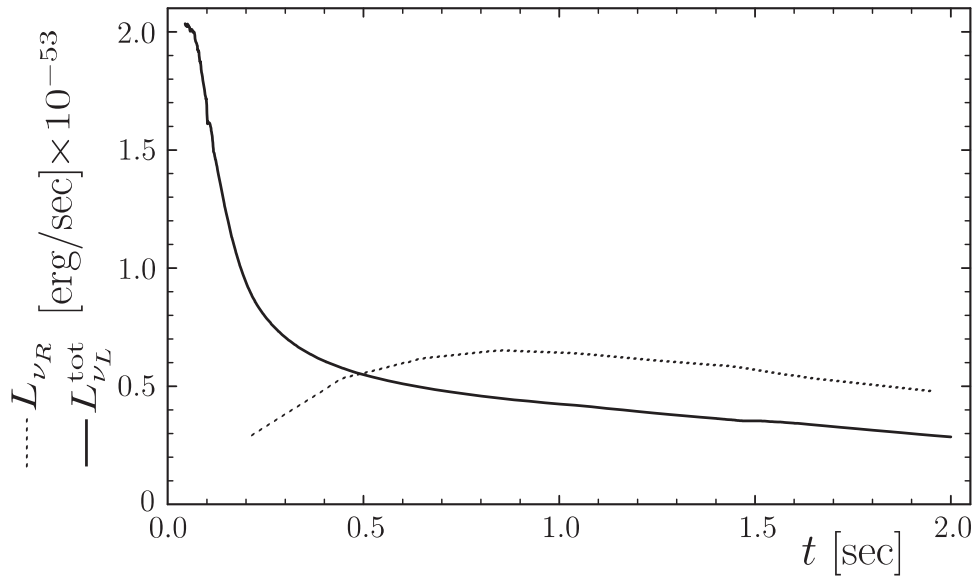


Рис. 2. Временная эволюция полной светимости нейтрино всех активных типов левых нейтрино  $L_{\nu_L}^{\text{tot}}$  [18] (сплошная линия) и светимости правых нейтрино  $L_{\nu_R}$  при  $\mu_\nu = 3 \cdot 10^{-12} \mu_B$  (пунктирная линия).

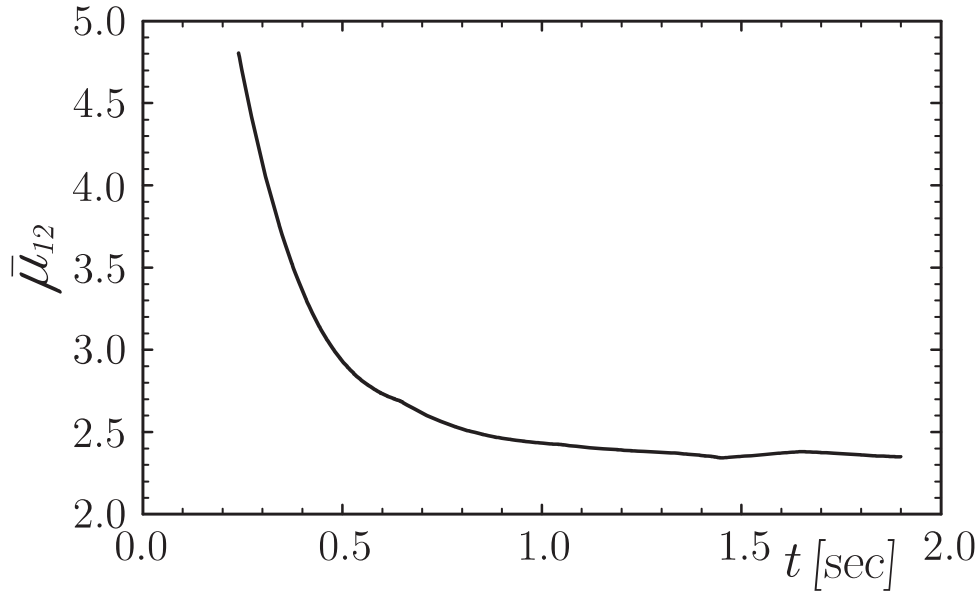


Рис. 3. Временная эволюция верхнего предела на магнитный момент нейтрино в интервале времени до 2 сек после коллапса с использованием данных модели [18] (в предположении, что эффективные магнитные моменты электронного, мюонного и тау-нейтрино равны).

На основе реалистичной модели коллапса ядра с O-Ne-Mg-ядром с радиальными распределениями параметров и их изменением во времени внутри ядра получено более надёжное ограничение на магнитный момент нейтрино. Из временной эволюции светимости правых нейтрино и данной в модели светимости левых нейтрино найдено изменение со временем верхнего предела на магнитный момент нейтрино, что определило комбинированный предел на эффективные магнитные моменты электронного, мюонного и тау-нейтрино в виде

$$\left[ \mu_{\nu_e}^2 + 0,71 \left( \mu_{\nu_\mu}^2 + \mu_{\nu_\tau}^2 \right) \right]^{1/2} < 3,7 \cdot 10^{-12} \mu_B. \quad (2)$$

Подобным же образом найдены ограничения на магнитный момент нейтрино из более ранних моделей сверхновой [19–21], и в общем случае усреднённые по ароматам верхние пределы на магнитный момент нейтрино по всем моделям [18–21] с радиальным распределением параметров отличаются не сильно и находятся в диапазоне

$$\bar{\mu}_\nu < (1,1 - 2,7) \cdot 10^{-12} \mu_B. \quad (3)$$

Во **второй главе** диссертации исследуется связь магнитного момента дираковского нейтрино и динамики взрыва сверхновой. Проводится анализ процесса двукратной конверсии спиральности нейтрино,  $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$ ,

в условиях сверхновой, где первая стадия реализуется за счет взаимодействия магнитного момента нейтрино с электронами и протонами плазмы в ядре сверхновой, а вторая стадия возникает за счёт резонансного переворота спина нейтрино в магнитном поле оболочки. Кроме того, рассматривается вопрос о возможности стимулирования затухающей ударной волны за счет данного процесса, что может оказаться полезным в задачах моделирования взрывающихся сверхновых.

Первый раздел главы посвящён описанию проблем, которые возникают при описании динамики взрыва сверхновой: возникают трудности при численном моделировании взрыва сверхновой, когда взрыв не происходит в связи с недостаточной развитостью механизма стимулирования останавливающейся ударной волны, а при «успешном» теоретическом взрыве сверхновой не удаётся передать оболочке звезды наблюдаемую кинетическую энергию  $\sim 10^{51}$  эрг. В качестве возможного решения предлагается механизм Дара [22] двукратной конверсии спиральности нейтрино.

Во втором разделе описывается процесс двукратного переворота спиральности нейтрино  $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$  при участии магнитного момента нейтрино, который играет здесь основную роль. Показано, что за счёт обсуждаемого механизма светимость правых нейтрино, вычисленная на основе функции  $\Gamma_{\nu_R}(E)$  [15], может быть достаточной для передачи оболочке дополнительной энергии  $\sim 10^{51}$  эрг. Также в этом разделе иллюстрируется доминирование рассеяния на протонах на основе анализа упрощённого случая полностью вырожденной плазмы,  $T = 0$ .

В третьем разделе главы обсуждается резонансный переход  $\nu_R \rightarrow \nu_L$  — переворот спиральности нейтрино в оболочке сверхновой и условия его осуществления. На основе анализа уравнения эволюции спина нейтрино [23–27] показано, что механизм Дара двукратной конверсии спиральности нейтрино,  $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$ , реализуется, если в области  $R_\nu < R < R_s$  величина магнитного момента нейтрино находится в интервале

$$10^{-13} \mu_B < \mu_\nu < 10^{-12} \mu_B, \quad (4)$$

и при условии, что существует магнитное поле масштаба  $10^{13}$  Гс. За время стагнации ударной волны  $\Delta t \sim 0,2 - 0,4$  сек в эту область инжектируется дополнительная энергия порядка

$$\Delta E \simeq L_{\nu_R} \Delta t \sim 10^{51} \text{ эрг}, \quad (5)$$

которая как раз достаточна для решения проблемы.

**Третья глава** посвящена выводу точного пропагатора электрона в магнитном поле в виде суммы по уровням Ландау на основе точных решений уравнения Дирака.

В первом разделе главы проводится обоснование актуальности и важности расчётов процессов с участием лёгких заряженных фермионов в квантовой теории поля в астрофизических условиях в силу, с одной стороны, особенной роли квантовых процессов в динамике астрофизических объектов и ранней Вселенной и, с другой, сильного влияния экстремальных условий внутри таких объектов на происходящие в них квантовые процессы за счёт открытия или усилению таких квантовых переходов, которые запрещены или сильно подавлены в вакууме.

Расчёт конкретных физических явлений основан на использовании диаграммной техники со следующим обобщением: в начальном и конечном состояниях электрон находится во внешнем поле и описывается точным решением уравнения Дирака в этом поле, внутренние линии электронов в петлевых квантовых процессах соответствуют точным пропагаторам, построенным на основе данных решений. Знание различных представлений пропагатора электрона во внешнем магнитном поле и условий их применимости является весьма важным.

Во втором разделе рассмотрено получение решение уравнения Дирака для электрона в магнитном поле и приводятся решения с положительной и с отрицательной энергиями.

Третий раздел главы посвящён подробному выводу пропагатора электрона в магнитном поле на основе решений уравнения Дирака. Для вычисления пропагатора электрона применяется стандартный метод, в котором используются полевые операторы, включающие решения уравнения Дирака в магнитном поле. В результате получен вклад  $n$ -ого уровня Ландау в пропагатор электрона в виде произведения трансляционно и калибровочно инвариантной части на калибровочно и трансляционно неинвариантный фазовый множитель. Дополнительными вычислениями показано, что выражение для пропагатора электрона в виде разложения по уровням Ландау согласуется с полученным ранее в других работах, представленное в формализме собственного времени Фока.

В четвёртом разделе выводится пропагатор векторного бозона в магнитном поле в виде суммы по уровням Ландау из представления в собственном времени Фока.

**В заключении** подведены итоги работы и кратко сформулированы ос-

новые результаты диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

- 1) Вычислены вероятность рождения правых дираковских нейтрино с фиксированной энергией, спектр энергий и светимость. Вместо модели однородного шара для ядра сверхновой с некоторыми усреднёнными величинами физических параметров, которая использовалась в предыдущих исследованиях, рассмотрены реалистичные модели с радиальными распределениями и временной эволюцией физических параметров в ядре сверхновой. Из условия, что влияние излучения правых нейтрино на масштаб полного времени охлаждения должно быть ограниченным, на основе этих моделей получены верхние пределы на усреднённый по ароматам и времени магнитный момент нейтрино дираковского типа.
- 2) Из условия, что правые нейтрино как новый охлаждающий агент, конкурирующий с потерями энергии через активные типы нейтрино, не должны значительно повлиять на темп охлаждения звёздного ядра, а следовательно, дополнительные потери энергии через правые нейтрино должны быть ограничены сверху, по меньшей мере, значением потерь через левые нейтрино,  $L_{\nu_R} < L_{\nu_L}$ , получены ограничения сверху на магнитный момент нейтрино дираковского типа. Комбинированный предел на эффективные магнитные моменты электронного, мюонного и тау-нейтрино получен в виде

$$\left[ \mu_{\nu_e}^2 + 0,71 \left( \mu_{\nu_\mu}^2 + \mu_{\nu_\tau}^2 \right) \right]^{1/2} < 3,7 \cdot 10^{-12} \mu_B.$$

Усреднённый по ароматам и времени предел на магнитный момент нейтрино дираковского типа получен в виде

$$\bar{\mu}_\nu < 2,4 \cdot 10^{-12} \mu_B.$$

- 3) Проанализирован процесс двукратной конверсии спиральности нейтрино,  $\nu_L \rightarrow \nu_R \rightarrow \nu_L$ , в условиях сверхновой, где первая стадия реализуется за счет взаимодействия магнитного момента нейтрино с электронами и протонами плазмы в ядре сверхновой, а вторая стадия возникает за счет резонансного переворота спина нейтрино в магнитном поле оболочки. Показано, что при наличии у нейтрино магнитного момента масштаба  $(10^{-13} \div 10^{-12}) \mu_B$  и при условии, что в области между

нейтриносферой и зоной стагнации ударной волны существует магнитное поле масштаба  $10^{13}$  Гс, за характерное время стагнации ударной волны в эту область может инжектироваться дополнительная энергия порядка  $10^{51}$  эрг, достаточная для стимулирования затухающей ударной волны.

- 4) На основе точного решения уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле на  $n$ -м уровне Ландау проведён прямой вывод стандартными методами квантовой теории поля точного пропагатора электрона во внешнем магнитном поле. В результате пропагатор записан в  $x$ -представлении в виде суммы по уровням Ландау. Продемонстрирована тождественность полученного выражения для пропагатора известному результату (A. Chodos et al., 1990).

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [1] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Округин А. А. Магнитный момент дираковского нейтрино и динамика взрыва сверхновой // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 89, вып. 3. С. 115 – 120.
- [2] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Okrugin A. A. Reexamination Of A Bound On The Dirac Neutrino Magnetic Moment From The Supernova Neutrino Luminosity // International Journal Of Modern Physics A. 2009. V. 24. No. 31. P. 5977 – 5989.
- [3] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Округин А. А. Индуцированный плазмой перевернут спиральности нейтрино в ядре сверхновой и ограничение на магнитный момент дираковского нейтрино // ЖЭТФ. 2010. Т. 138, вып. 1 (7). С. 80 – 92.
- [4] Кузнецов А. В., Округин А. А. Точный пропагатор электрона в магнитном поле в виде суммы по уровням Ландау на основе решений уравнения Дирака // Эффекты сильного поля. Сб. статей, посв. 65-летию Н. В. Михеева. Под ред. А. В. Кузнецова и др. Ярославль: Изд-во ЯрГУ. 2007. С. 65 – 75.
- [5] Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Okrugin A. A. Neutrino magnetic moment and the shock wave revival in a supernova explosion // Russian

Conference on Physics of Neutron Stars. Abstracts. June 24 – 27, 2008. Saint-Petersburg: Ioffe Physical-Technical Institute. P.63.

- [6] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Округин А. А. Ограничение на магнитный момент дираковского нейтрино из нейтринной светимости сверхновой. // Вестник ЯрГУ. Серия “Естественные и технические науки”. 2009. № 1. Ярославль: Изд-во ЯрГУ, 2009. С. 4.
- [7] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Округин А. А. Ограничение на магнитный момент дираковского нейтрино из нейтринной светимости сверхновой // Конференция “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (НЕА-2009). 21 – 24 декабря 2009 г. ИКИ РАН, Москва.

## Список литературы

- [8] Goldman I., Aharonov Y., Alexander G. et al. Implications of the supernova SN1987A neutrino signals // Phys. Rev. Lett. 1988. V.60. P.1789.
- [9] Lattimer J. M., Cooperstein J. Limits on the neutrino magnetic moment from SN1987A // Phys. Rev. Lett. 1988. V.61. P. 23.
- [10] Barbieri R., Mohapatra R.N. Limit on the magnetic moment of the neutrino from Supernova 1987 observations // Phys. Rev. Lett. 1988. V.61, P. 27.
- [11] Nötzold D. New bounds on neutrino magnetic moments from stellar collapse // Phys. Rev. 1988. V.D38. P. 1658.
- [12] Goyal A., Dutta S., Choudhury S.R. Bounds on the neutrino magnetic moment from SN 1987 A // Phys. Lett. 1995. V.B346. P. 312.
- [13] Ayala A., D’Olivo J.C., Torres M. Bound on the neutrino magnetic moment from the chirality flip in supernovae // Phys. Rev. 1999. V.D59. P. 111901.
- [14] Ayala A., D’Olivo J. C., Torres M. Right-handed neutrino production in dense and hot plasmas // Nucl. Phys. 2000. V.B564. P. 204.
- [15] Kuznetsov A. V., Mikheev N.V. A new bound on the Dirac neutrino magnetic moment from the plasma induced neutrino chirality flip in a supernova // Journ. Cosmol. Astropart. Phys. 2007. V. 11. P.031.



- [16] Raffelt G.G. Stars as laboratories for fundamental physics. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- [17] Janka H.-Th., Langanke K., Marek A. et al. Theory of core-collapse supernovae // Phys. Rept. 2007. V.442. P. 38.
- [18] Janka H.-Th., Hüdepohl L., Müller. B. Unpublished results (private communication).
- [19] Buras R., Rampp M., Janka H.-Th. et al. Two-dimensional hydrodynamic core-collapse supernova simulations with spectral neutrino transport. I. Numerical method and results for a  $15 M_{\odot}$  star // Astron. Astrophys. 2006. V.447. P. 1049.
- [20] Pons J. A., Reddy S., Prakash M. Evolution of proto-neutron stars // Astrophys. J. 1999. V.513. P. 780.
- [21] Keil W., Janka H.-Th. Hadronic phase transitions at supranuclear densities and the delayed collapse of newly formed neutron stars // Astron. Astrophys. 1995. V.296. P. 145.
- [22] Dar A. Neutrino magnetic moment may solve the supernovae problem. Princeton: Inst. Advanced Study Preprint-87-0178, 1987.
- [23] Волошин М. Б., Высоцкий М. И., Окунь Л. Б. Электромагнитные свойства нейтрино и возможные полугодовые вариации цикла потока солнечных нейтрино // ЯФ. 1986. Т. 44. С. 677.
- [24] Волошин М. Б., Высоцкий М. И., Окунь Л. Б. Электродинамика нейтрино и возможные эффекты для солнечных нейтрино. // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. С. 754; Erratum: ЖЭТФ. 1987. ibid. 92. С. 368.
- [25] Окунь Л. Б. On the  $\nu_e - \nu_e$  scattering and possibility of resonant flip of neutrino spirality in the magnetic field of supernova // ЯФ. 1988. Т. 48. С. 1519.
- [26] Окунь Л. Б., Волошин М. Б., Высоцкий М. И. 1986. Препринт ИТЭФ 86-82.
- [27] Волошин М. Б., Высоцкий М. И., Окунь Л. Б. Электродинамика нейтрино и возможные следствия для солнечных нейтрино // ЖЭТФ. 1986. Т. 91. С. 754; Erratum: ibid. 1987. Т. 92. С. 368.