

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

Чистяков Михаил Валерьевич

**ФОТОН-НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ
ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ПЛАЗМЕ**

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 – 2003

УДК 539.12.01

Работа выполнена в Ярославском государственном университете
им. П.Г. Демидова.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Н.В.Михеев
(ЯрГУ, Ярославль)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член корреспондент РАН М.И.Высоцкий
(ИТЭФ, Москва)

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

Ведущая организация:

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий

Защита состоится "_____" _____ 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 в Институте ядерных исследований РАН по адресу: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия октября, 7а, Институт ядерных исследований РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ г. Москва.

Автореферат разослан "_____" _____ 2003 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

А.В. Невструева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Реакции с участием фотонов и нейтрино играют важную роль в астрофизических процессах слияний нейтронных звезд и взрывов сверхновых, где в ходе звездного коллапса рождается большое число нейтрино, плотность достигает значений ядерной плотности, и генерируется сильное магнитное поле, превышающее критическое значение $B_e = m_e^2/e \simeq 4.41 \cdot 10^{13}$ Гс, что определяющим образом влияет на динамику нейтринного охлаждения звезды.

Естественно ожидать, что такие интенсивные поля активно влияют на квантовые процессы, делая возможными переходы, кинематически запрещённые в вакууме, генерируя новые эффективные взаимодействия, например, нейтрино с фотонами, и принципиально изменяя протекание электромагнитных и нейтринных процессов, которые возможны, но сильно подавлены в вакууме.

Принципиальной особенностью указанных экстремально сильных магнитных полей является их воздействие на электрически нейтральные частицы. Сюда относится прежде всего влияние поля на дисперсионные свойства фотонов, а значит, и на их кинематику, которое делает разрешенными процессы, кинематически запрещенные в вакууме, такие, как расщепление фотона на два фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$. Другим эффектом указанного воздействия является генерация новых эффективных взаимодействий, например, взаимодействия нейтрино с фотонами, обуславливающего, например, процесс “радиационного распада” безмассового нейтрино $\nu \rightarrow \nu\gamma$. Изменение дисперсионных свойств фотонов в магнитном поле приводит также к принципиальным изменениям в протекании нейтринных процессов, которые возможны, но сильно подавлены в вакууме, например, $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ и т.д.

Детальный анализ таких процессов в экстремальных физических условиях сильного магнитного поля и горячей плотной плазмы, а также исследование их астрофизических приложений необходимо при расчете, например, динамики остывания нейтронных звезд, при анализе образования радиоизлучения пульсаров и т.д.

Таким образом, проблема исследования фотон-нейтринных процессов во внешней активной среде, лежащая на стыке физики элементарных частиц и астрофизики, является актуальной.

Цель диссертационной работы состоит в теоретическом исследовании нейтринных и электродинамических процессов в сильном внешнем магнит-

ном поле при учете влияния горячей плотной плазмы, а также возможных проявлений этих процессов в астрофизике.

Научная новизна результатов. Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

- Вычислен эффективный лагранжиан $\gamma\gamma\nu\nu$ -взаимодействия в сильном магнитном поле. С помощью него найден вклад в нейтринную светимость процессов $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ и $\gamma \rightarrow \gamma\nu\bar{\nu}$ в случае холодного, $T \ll m_e$, и горячего, $T \gg m_e$, фотонного газа с учетом дисперсии и перенормировки волновой функции фотонов. Обнаружено сильное катализирующее влияние интенсивного внешнего магнитного поля на рассматриваемый процесс. Показано, что процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ является одним из доминирующих фотон-нейтринных процессов в сильном магнитном поле.

- Процесс расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильном магнитном поле проанализирован выше порога рождения электрон - позитронной пары, с учетом дисперсии фотона в поле. Показано, что предел коллинеарной кинематики является неудовлетворительным приближением в этом случае. В частности, существенный вклад в вероятность расщепления реального фотона дает конфигурация поляризаций фотонов, запрещенная в коллинеарном пределе. В пределе больших энергий начального фотона получены аналитические выражения для вероятности и спектра запрещенного в коллинеарном пределе канала расщепления.

- Показано, что в области порога неэкспоненциальный характер затухания электромагнитного поля в результате рождения электрон-позитронной пары усилен. Обнаружено, что эффективная ширина распада фотона, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, в этой области существенно меньше, чем известные в литературе результаты.

- Вычислены амплитуда и вероятность процесса $\nu \rightarrow \nu\gamma$ в сильно замагниченной электрон-позитронной плазме. Показано, что присутствие плазмы уменьшает вероятность процесса $\nu \rightarrow \nu\gamma$ по сравнению с вероятностью этого перехода в чистом магнитном поле. Таким образом, комплексная среда - сильное магнитное поле + плазма - является более прозрачной для нейтрино в процессе $\nu \rightarrow \nu\gamma$, чем чистое магнитное поле. Обнаружено, что вероятность перехода $\gamma\nu \rightarrow \nu$ не зависит от энергии начального нейтрино и пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью процесса $\nu \rightarrow \nu\gamma$ в пределе низких температур. Получены величины средних потерь энергии и импульса нейтрино, которые могут быть использованы при анализе нейтринных процессов в астрофизических условиях.

Основные положения выносимые на защиту:

1. Теоретический анализ и расчеты вкладов в нейтринную светимость фотонного газа процессов двухфотонного излучения нейтрино-антинейтринной пары в присутствии интенсивного магнитного поля.
2. Теоретическое рассмотрение и вычисление вероятности процесса расщепления фотона на два фотона в сильном магнитном поле.
3. Исследование процесса затухания электромагнитной волны за счет рождения электрон-позитронной пары.
4. Изучение влияние сильно замагниченной электрон-позитронной плазмы на процессы $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и $\nu\gamma \rightarrow \nu$. Расчеты вероятности этих переходов и скорости нейтринных потерь энергии и импульса при рассматриваемых процессах.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные в ней результаты детального анализа влияния внешней активной среды – сильного магнитного поля и замагниченной плотной электрон-позитронной плазмы – на квантовые процессы с участием фотонов и нейтрино должны быть учтены в системах численного моделирования астрофизических катаклизмов, таких, как взрывы сверхновых и слияния нейтронных звезд, где могут реализоваться рассматриваемые физические условия.

Наиболее интересными с точки зрения возможного практического приложения представляют результаты полученные для процессов расщепления фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, и процесса рождения электрон-позитронной пары, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, в сильном магнитном поле, так как эти реакции в основном определяют процессы формирования радиоизлучения пульсаров и могли бы в принципе объяснить актуальную на сегодняшний день проблему отсутствия радиоизлучения у некоторых нейтронных звезд с сильным магнитным полем, $B \simeq 10^{14} \div 10^{16}$ Гс.

Результаты исследования процессов двухфотонного рождения нейтрино-антинейтринной пары в сильном магнитном поле и реакций $\nu \rightarrow \nu\gamma$, $\nu\gamma \rightarrow \nu$ в сильно замагниченной плазме представляют интерес для анализа излучения и поглощения нейтрино в астрофизических явлениях, подобных взрыву сверхновой или гамма-всплескам, в которых возможно формирование областей занятых горячей электрон-позитронной плазмой с малой барионной составляющей.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались лично автором на следующих Российских и международных конференциях, школах и семинарах:

- Научные конференции Отделения ядерной физики РАН “Физика фундаментальных взаимодействий” (Москва, 1998, 2000, 2002)
- Международная конференция “News from the Univers” (Гамбург, Германия, 1999)
- Конференции “Физика нейтронных звезд” (С.-Петербург, 2001)
- 3, 4, 5 и 6 Московская Международная Физическая Школа (Москва, 1999, 2000, 2002, 2003)
- Международный симпозиум “Сильные магнитные поля в нейтринной астрофизике” (Ярославль, 1999)
- 10, 11 и 12 Международные семинары “Кварки” (Суздаль, 1998; Пушкин, 2000; Новгород, 2002)
- Всероссийская Конференция Астрофизика Высоких Энергий Сегодня и Завтра (Москва 2002)
- 12 Международная школа “Частицы и космология” (Баксанская Долина, Кабардино - Балкария, 2003)

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах в Институте ядерных исследований РАН (Москва), Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва), в Отделе теоретической астрофизики Физико-технического института РАН им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), в Отделе теоретической физики Института физики высоких энергий (Протвино), на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в числе которых 5 статей - в ведущих рецензируемых российских и международных журналах и 9 статей в материалах российских и международных научных конференций, школ и семинаров. Список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит пять приложений, 18 рисунков. Список цитируемой литературы включает 120 наименований. Общий объем диссертации составляет 111 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность проблемы учета влияния внешней активной среды, электромагнитного поля и плазмы, на нейтринные процессы, сделан обзор литературы по данной тематике, охарактеризованы методы исследований. Сформулирована цель работы и кратко изложено содержание глав диссертации.

Первая глава посвящена исследованию процессов двухфотонного рождения нейтрино-антинейтринной пары в присутствии сильного внешнего магнитного поля.

В первом параграфе дается обзор работ, в которых рассматривались фотон-нейтринные процессы.

Во втором параграфе анализируется вершина $\nu\nu\gamma\gamma$, индуцированная магнитным полем. Подробно описан метод вычисления амплитуды процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ с использованием асимптотического пропагатора электрона в сильном магнитном поле. Получено выражение для эффективного лагранжиана $\nu\nu\gamma\gamma$ -взаимодействия для энергий частиц, ограниченных только величиной магнитного поля в рамках используемого приближения. Отмечается, что данный эффективный лагранжиан может быть использован для получения амплитуды процесса расщепления фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильном магнитном поле, а также для вычисления эффективного лагранжиана аксион-фотонного взаимодействия.

В третьем параграфе вычисляются вклады процессов $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ и $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ в нейтринную светимость фотонного газа. Исследовались два предельных случая холодного, $T \ll m_e$, и горячего, $T \gg m_e$, фотонного газа. В случае, не слишком сильного поля, $m_e \ll eB \ll m_e^2/\alpha$, для вклада в нейтринную светимость процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ получены следующие оценки:

$$Q_{\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}}^{LT} \simeq 1.1 \cdot 10^9 \left(\frac{T}{10^9 K} \right)^{13} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^3}, \quad T \ll m_e,$$

$$Q_{\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}}^{HT} \simeq 2.7 \cdot 10^{18} \left(\frac{T}{m_e} \right)^9 \frac{\text{эрг}}{\text{с} \cdot \text{см}^3}, \quad T \gg m_e.$$

Здесь T - температура фотонного газа, m_e - масса электрона, α - постоянная тонкой структуры. В случае более сильных магнитных полей показано, что не смотря на то, что эффективный лагранжиан $\nu\nu\gamma\gamma$ -взаимодействия не зависит от величины магнитного поля в рассматриваемом приближении, вклад в нейтринную светимость исследуемых процессов существенно зависит от этой величины. Приводятся численные зависимости нейтринных светимостей процессов $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ и $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ от напряженности магнитного поля. При вычислениях учитывались закон дисперсии и перенормировка волновой функции фотона в магнитном поле. Обнаружено, что в пределе низких температур вклад в нейтринную светимость реакции $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$ пренебрежимо мал по сравнению с аналогичным вкладом процесса $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$. Анализ полученных оценок для нейтринных светимостей рассматриваемых процессов показал, что индуцированный магнитным полем механизм реакций двухфотонного рождения нейтрино-антинейтринной пары доминирует над всеми другими механизмами, такими, например, как учет массы нейтрино или нелокальности слабого взаимодействия. Так же из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что рассмотренные реакции являются одними из основных фотон-нейтринных процессов в сильном магнитном поле и могут оказывать существенное влияние на скорость остывания областей в астрофизических объектах, занятых горячей плазмой с малой барионной составляющей.

Вторая глава посвящена широко обсуждаемому в настоящее время в литературе процессу расщепления фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, в сильном магнитном поле.

В первом параграфе дан обзор работ, в которых был рассмотрен данный процесс.

Во втором параграфе на основе решений уравнений дисперсии для фотонных мод с определенными поляризациями проведен кинематический анализ процесса расщепления фотона на два фотона. Показано, что вследствие существенного отклонения закона дисперсии от вакуумного для одной из фотонных мод предел коллинеарной кинематики в сильном магнитном поле, используемый до этого в литературе, является неудовлетворительным приближением. Вследствие этого становится возможным новый канал расщепления фотона $1 \rightarrow 1\ 2$, запрещенный в коллинеарном пределе. Здесь цифры 1 и 2 обозначают фотонные моды - стационарные состояния фотона в магнитном поле. Вектор поляризации фотона моды 1 перпендикулярен плоскости, образуемой векторами импульса фотона и напряженностью магнитного поля, а вектор поляризации фотона моды 2 лежит в этой плоскости. Проведенный

анализ показал, что физический интерес с точки зрения возможных астрофизических приложений представляет вычисление вероятностей расщепления фотона по каналам $1 \rightarrow 22$ (разрешенный в коллинеарном пределе) и $1 \rightarrow 12$ (запрещенный в коллинеарном пределе).

В третьем параграфе, используя результаты полученные в первой главе, вычисляются парциальные амплитуды, связанные с фотонами, имеющими определенные поляризации.

Четвертый параграф посвящен вычислению вероятности процесса расщепления фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$. Найдены численные зависимости вероятности расщепления каналов $1 \rightarrow 22$ и $1 \rightarrow 12$ от энергии начального фотона при различных величинах напряженности магнитного поля. Обнаружено, что при высоких энергия начального фотона оба канала расщепления дают существенный вклад в вероятность, причем “запрещенный” в коллинеарном пределе канал $1 \rightarrow 12$ доминирует (см. Рис.1). В пределе больших энергий рас-

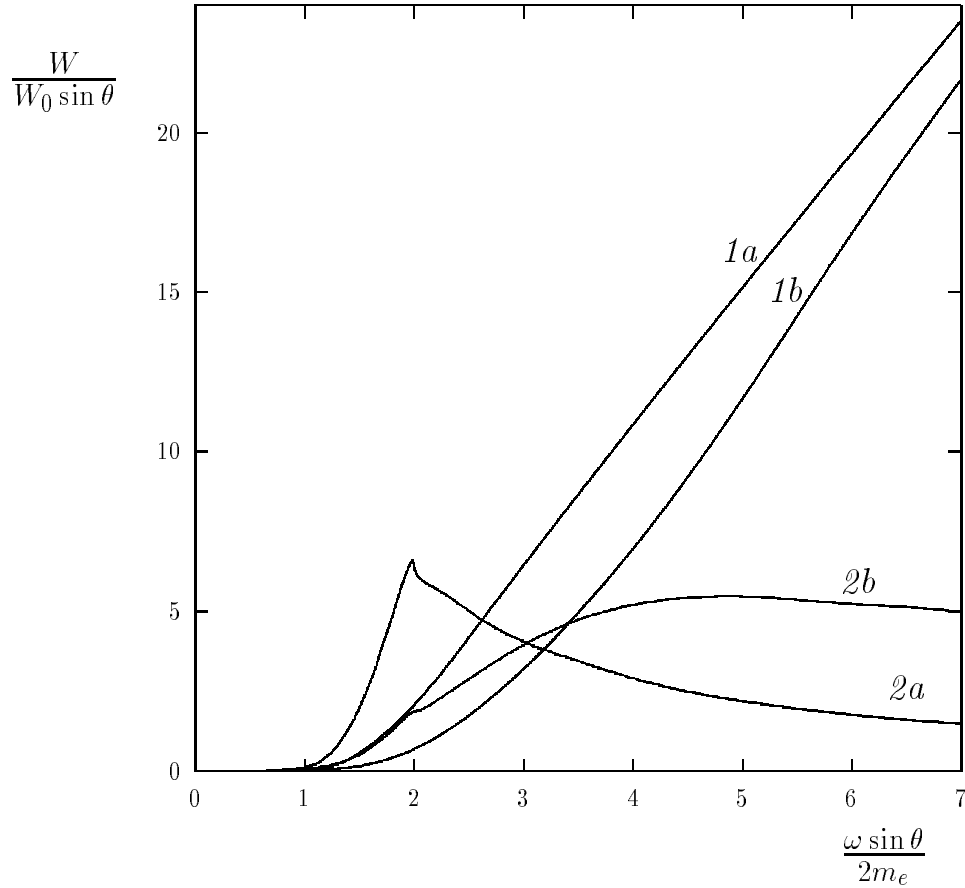


Рис. 1: Зависимость вероятности расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ от его энергии выше порога рождения пары: $1a, 1b$ – для “запрещенного” канала $1 \rightarrow 12$ при напряженности магнитного поля $B = 10^2 B_e$ и $10^3 B_e$ соответственно; $2a, 2b$ – для “разрешенного” канала $1 \rightarrow 22$ при напряженности магнитного поля $B = 10^2 B_e$ и $10^3 B_e$ соответственно.

щепляющегося фотона удалось получить простые аналитические выражения

для спектра и вероятности распада в канале $1 \rightarrow 12$.

В пятом параграфе обсуждаются возможные приложения данного процесса в физике пульсаров для объяснения отсутствия радиоизлучения у сильно замагниченных нейтронных звезд. Показано, что предложенный ранее механизм подавления рождения e^+e^- -плазмы в магнитосфере пульсара за счет процесса расщепления фотона является неудовлетворительным, так как основан на предположении о том, что расщепления фотона возможно по трем каналам $1 \rightarrow 22$, $1 \rightarrow 11$, $2 \rightarrow 12$, в то время как разрешенными являются только два из них из них $1 \rightarrow 22$ и $1 \rightarrow 12$. Кроме того, в данном механизме не учитывалась неколлинеарность процесса расщепления, дисперсия и перенормировка волновой функции фотона. Как показал анализ, все эти явления становятся существенными в присутствии сильного магнитного поля. Таким образом влияние процесса расщепления фотона на формирование радио излучения магнетаров требует дальнейшего более детального изучения.

В **третьей главе** исследуется затухание фотона в результате рождения электрон-позитронной пары в сильном магнитном поле. Это явление вместе с процессом расщепления фотона, рассмотренного во второй главе, имеет важное значение при формировании радиоизлучения в пульсарах.

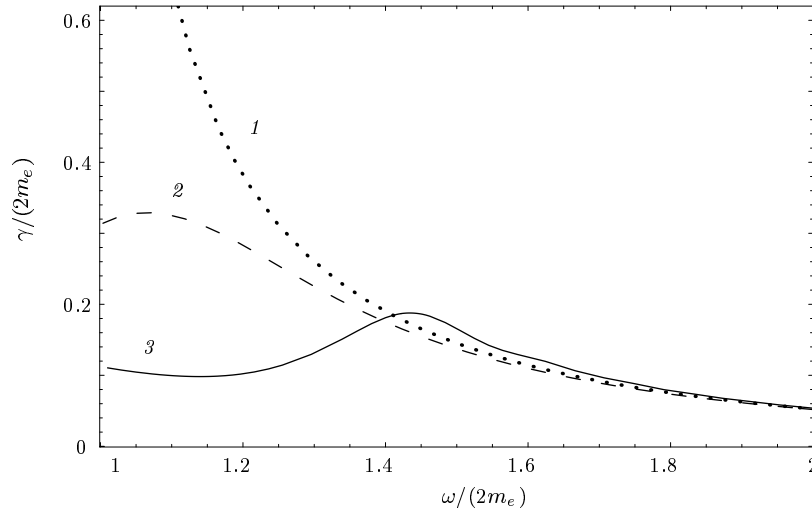


Рис. 2: Зависимость ширины распада от частоты в околопороговой области для значений магнитного поля $B = 200B_e$. Линия 1 - ширина распада $\gamma \rightarrow e^+e^-$, вычисленная в древо-весном приближении и содержащая корневую сингулярность; линия 2 - ширина распада полученная из комплексного решения дисперсионного уравнения на втором римановом листе; линия 3 соответствует ширине γ_{eff} , вычисленной с учетом неэкспоненциальности распада.

В первом параграфе дан обзор работ, в которых рассматривался данный процесс, обсуждаются проблемы, возникающие при вычислении данной реак-

ции вблизи порога рождения электрон-позитронной пары методами, используемыми ранее в литературе.

Во втором параграфе описывается метод, позволяющий корректно описать процесс затухания фотона в сильном магнитном поле во всей разрешенной кинематической области, включая также и окрестность порога рождения e^+e^- -пары. Данный метод состоит в нахождении запаздывающего решения уравнения электромагнитного поля в присутствии внешнего источника с учетом поляризации вакуума в магнитном поле. Анализ полученного решения показал, что вследствие сингулярного поведения поляризационного оператора вблизи порога рождения электрон-позитронной пары неэкспоненциальный характер затухания фотона оказывается усилен в этой области, что приводит к существенному уменьшению эффективной ширины распада фотона, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, в околороговой области по сравнению с известными в литературе результатами (см. линия 3 на Рис. 2).

Четвертая глава посвящена исследованию влияния сильно замагниченной электрон-позитронной плазмы на процессы $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и $\nu\gamma \rightarrow \nu$.

В первом параграфе сделан обзор литературы, в которых изучались рассматриваемые процессы.

Во втором параграфе детально описывается метод вычисления амплитуды процесса $\nu \rightarrow \nu\gamma$ в присутствии сильного магнитного поля и e^+e^- -плазмы. Приведены аналитические выражения для амплитуды в пределе вырожденной электрон-позитронной плазмы, а также вблизи порога рождения e^+e^- -пары.

В третьем параграфе вычислены вероятности процессов $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и $\nu\gamma \rightarrow \nu$ с учетом дисперсии и перенормировки волновой функции фотона в сильном магнитном поле и плазме. Получены аналитические выражения для вероятностей в двух предельных случаях холодной, $T \ll \mu$, и горячей, $T \gg \mu$, плазмы. Обнаружено, что вероятность перехода $\nu\gamma \rightarrow \nu$ сильно подавлена при низких температурах. В параграфе приводятся также выражения для величины средней потери энергии и импульса нейтрино в двух упомянутых предельных случаях. Анализ полученных выражений показал, что влияние электрон-позитронного газа приводит к уменьшению как вероятности процесса, так и величины средней потери энергии и импульса нейтрино по сравнению с аналогичными величинами в чистом магнитном поле.

В приложении А приводится выражение для пропагатора электрона в магнитном поле.

В приложении Б даны некоторые свойства проекционных операторов $\Pi_{\pm}$, входящих в выражение для пропагатора электрона в магнитном поле.

В приложении В приведено выражение для асимптотического пропагатора электрона в сильном магнитном поле и описаны свойства амплитуд петлевых процессов, вычисленных с помощью этого пропагатора.

В приложении Г обсуждается учет трансляционно неинвариантных множителей пропагаторов фермионов в n -точечной диаграмме.

В приложении Д вычисляются обобщенные Гауссовы интегралы скалярного, векторного и тензорного типов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Исследованы процессы двухфотонного рождения нейтрино-антинейтринной пары в сильном магнитном поле, которые сильно подавлены в вакууме. Получено выражение для эффективного лагранжиана $\nu\nu\gamma\gamma$ -взаимодействия. Найдены оценки для вкладов данных процессов в нейтринную светимость фотонного газа. Показано, процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ является одним из доминирующих фотон-нейтринных процессов в сильном магнитном поле и может существенно влиять на динамику остывания областей, занятых горячей плазмой в астрофизических объектах.
2. Проведено исследование процесса расщепления фотона на два фотона в сильном магнитном поле. Получены правила отбора по поляризациям фотонов, из которых в частности следует, что в кинематической области ниже порога рождения электрон-позитронной пары разрешенными являются два канала расщепления $1 \rightarrow 22$ и $1 \rightarrow 12$. Для этих каналов численно получены зависимости вероятности расщепления от энергии начального фотона, как выше, так и ниже порога рождения e^+e^- -пары. Показано, что при больших энергиях начального фотона канал расщепления $1 \rightarrow 12$, “запрещенный” в коллинеарном пределе становится доминирующим. Найдены простые аналитические формулы для спектра и вероятности расщепления в канале $1 \rightarrow 12$ при высоких энергиях фотонов.

3. Проанализирован процесс затухания электромагнитной волны в сильном магнитном поле в результате рождения электрон-позитронной пары. Обнаружено существенное усиление неэкспоненциальности распада вблизи порога рождения e^+e^- -пары, что приводит к существенному уменьшению эффективной ширины распада фотона, $\gamma \rightarrow e^+e^-$, в околопороговой области по сравнению с известными в литературе результатами.
4. Исследовано влияние сильно замагниченной электрон-позитронной плазмы на процессы $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и $\nu\gamma \rightarrow \nu$. Вычислены вероятности данных процессов и величины средних потерь энергии и импульса нейтрино. Обнаружено, что присутствие плазмы приводит к уменьшению этих величин по сравнению с аналогичными результатами в чистом магнитном поле. Таким образом, комплексная среда - сильное магнитное поле + плазма - является более прозрачной для нейтрино в процессах $\nu \rightarrow \nu\gamma$ и $\nu\gamma \rightarrow \nu$, чем чистое магнитное поле.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Chistyakov M. V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. The transitions $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ and $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ in a strong magnetic field //In Proceedings of Ringberg Euroconference "New Trends in Neutrino Physics", Tegernsee, Germany, 1998, Ed. by B. Kniehl et al. World Sci., Singapore. 1999. P. 245 Chistyakov M.V., Mikheev N.V., Photon neutrino interactions in strong magnetic field // Mod.Phys.Lett. 2002. V.A17. № 39. P.2553-2562.
2. Михеев Н. В., Чистяков М. В., Процесс $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ в сильном магнитном поле. // Исследования по теории элементарных частиц и твердого тела. Выпуск 4: Юбилейный сборник статей преподавателей, аспирантов и выпускников кафедры теоретической физики ЯрГУ. Ярослав. гос. ун-т. Ярославль, 2003. с. 64-72.
3. Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Чистяков М. В. Расщепление виртуального фотона на два фотона в сильном магнитном поле// Актуальные проблемы физики. Сб. научн. трудов. Ярославль: Яросл. гос. ун-т. 1997. С. 22-28.

4. Chistyakov M.V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Photon splitting above the pair creation threshold in a strong magnetic field. //Phys.Lett. 1998. V. B434. P.67
5. Chistyakov M .V., Kuznetsov A. V.,Mikheev N. V., Photon Splitting in a Strong Magnetic Field// In Proceedings of the 10th International Seminar "Quarks-98", edited by F.L. Bezrukov, V.A. Matveev, V.A. Rubakov, A.N. Tavkhelidze, S. V.Troitsky, Moscow: Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, 1999. V. I. P. 299-308
6. Кузнецов А.В., Михеев Н.В., Чистяков М.В. Расщепление фотона на два фотона в сильном магнитном поле. //ЯФ. 1999. Т. 62. С.1638
7. Chistyakov M.V., Kuznetsov A.V., Mikheev N.V. Photon splitting in a strong magnetic field. //Surveys in High Energy Physics. 2001. V. 15. P.291
8. Chistyakov M. V., Kuznetsov A. V., Mikheev N. V., Neutrino-photon and photon-photon processes as manifestation of the three-vertex loop in strong magneic field// In proceedings of the XI-th international school "Particles and Cosmology"edited by E. N. Alexeev, V. A. Matveev, Kh. S. Nirov, V. A. Rubakov, Moscow:Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, 2003. P.277-286.
9. Михеев Н.В., Чистяков М.В. Затухание фотона в результате рождения электрон-позитронной пары в сильном магнитном поле // Письма ЖЭТФ. 2001. Т. 73. вып. 12. с. 726-730
10. Михеев Н. В.,Чистяков М. В. Радиационный переход нейтрино $\nu \rightarrow \nu\gamma$ в магнитном поле и плазме// Сборник Актуальные проблемы физики. Выпуск 2: Сборник научных трудов молодых ученых, аспирантов и студентов Яросл. гос. ун-т. Ярославль. 1999. С. 32-38.
11. Chistyakov. M.V., Mikheev N.V. Radiative neutrino transition $\nu \rightarrow \nu\gamma$ in strongly magnetized plasma. // Phys.Lett. 1999. V. B467. p. 232-237
12. Chistyakov. M.V., Mikheev N.V. Radiative neutrino transition $\nu \rightarrow \nu\gamma$ in strongly magnetized plasma// Surveys in High Energy Physics. 2000. V. 15, P. 239-246.
13. Chistyakov. M. V., Mikheev N. V. Photon-neutrino interaction in strongly magnetized plasma//In proceedings of the international workshop "Strong Magnetic Fields in Neutrino Astrophysics", edited by A. V. Kuznetsov, N. V. Mikheev, A. Ya. Parkhomenko. Yaroslavl. 2000. P. 94-104.

14. Chistyakov. M. V., Mikheev N. V. Photon-neutrino Interactions in Strongly Magnetized Plasma.// Proceedings of the 11th International Seminar "Quarks'2000", edited by G. B. Pivovarov, V.A. Matveev, A.A. Penin, V.A. Rubakov and A.N. Tavkhelidze. Moscow: Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, 2002, P. 105-115