

На правах рукописи

**Румянцев Дмитрий Александрович**

**Резонансные электрослабые процессы  
в замагниченной плазме**

Специальность: 01.04.02 — Теоретическая физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва — 2018

Работа выполнена на кафедре теоретической физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова» (ЯрГУ)

**Научный консультант:**

**Кузнецов Александр Васильевич,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики ЯрГУ, г. Ярославль.

**Официальные оппоненты:**

**Высоцкий Михаил Иосифович,**

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А. И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», заведующий лабораторией теории элементарных частиц ИТЭФ;

**Семикоз Виктор Борисович,**

доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИ-РАН)», заведующий отделом теоретической физики;

**Теряев Олег Валерианович,**

доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической физики, «Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)», начальник сектора лаборатории теоретической физики.

**Ведущая организация:**

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ», г. Москва.**

Защита состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН), расположенном по адресу: проспект 60-летия Октября, д. 7а, 117312, Москва.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН, а также на сайте института <http://www.inr.ru/rus/referat/dis-zasch.html>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_

Учёный секретарь диссертационного совета Д002.119.01,

д. ф.-м. н., чл.-корр. РАН

С. В. Троицкий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время является установленным фактом, что наличие магнитного поля в широком классе астрофизических объектов представляет типичную ситуацию для наблюдаемой Вселенной. При этом масштаб индукции магнитного поля может варьироваться в очень широких пределах: от крупномасштабных ( $\sim 100$  килопарсек) межгалактических магнитных полей  $B \sim 10^{-21}$  Гс [1], до полей, реализующихся в сценарии ротационного взрыва сверхновой  $B \sim 10^{17}$  Гс [2, 3]. При этом, особый интерес представляют объекты с полями масштаба так называемого критического значения  $B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13}$  Гс<sup>1</sup>. К ним, в частности, относятся изолированные нейтронные звезды, включающие в себя радиопульсары и так называемые магнитары, обладающими магнитными полями с индукцией от  $10^{12}$  Гс (радиопульсары) до  $4 \times 10^{14}$  Гс (магнитары). Недавние наблюдения позволяют, в частности, отождествить некоторые астрофизические объекты, такие как источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR) и аномальные рентгеновские пульсары (АХР), с магнитарами (для обзора см., например, [4]). Согласно наиболее известной в настоящее время модели [5–7] в окрестности таких объектов возможно существование сильного магнитного поля, достигающего величины  $10^{15} - 10^{16}$  Гс.

Анализ спектров излучения как радиопульсаров, так и магнитаров свидетельствует также о наличии электрон-позитронной плазмы в их магнитосферах с концентрацией порядка значения концентрации Голдрайха-Джулиана [8]:

$$n_{GJ} \simeq 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3} \left( \frac{B}{100 B_e} \right) \left( \frac{10 \text{ сек}}{P} \right), \quad (1)$$

где  $P$  – период обращения нейтронной звезды.

---

<sup>1</sup>Используется естественная система единиц, где  $c = \hbar = k_B = 1$ ,  $m$  – масса электрона,  $m_f$  – масса фермиона,  $e_f$  – заряд фермиона,  $e > 0$  – элементарный заряд.

Естественно ожидать, что такие экстремальные условия будут оказывать существенное влияние на квантовые процессы, где в конечном или начальном состоянии могут присутствовать как электрически заряженные, так и электрически нейтральные частицы, например, электроны, нейтрино и фотоны. Кроме того, внешняя активная среда может катализировать реакции с участием таких экзотических частиц, как аксионы, фамилонны и т.п., что представляет интерес для поиска новой физики за пределами стандартной модели.

Среди квантовых процессов, свойства которых существенно, а иногда принципиально меняются под воздействием замагниченной среды, особый интерес для астрофизики представляют одно-, и двух- и трехвершинные процессы. Это обусловлено тем, что с точки зрения влияния микрофизических процессов на макроскопические характеристики астрофизических объектов (например, скорость потери энергии, число рождаемых частиц, коэффициент диффузии и т.п.) существенными будут лишь те реакции, которые дают лидирующие по константам связи вклады. При этом, особый интерес представляют древесные двухвершинные процессы вида  $jf \rightarrow j'f'$  взаимодействия обобщенных токов  $j$  и  $j'$  с замагниченной плазмой, состоящей из заряженных фермионов  $f$  и  $f'$  с различными комбинациями вершин скалярного, псевдоскалярного, векторного и аксиально-векторного типов, поскольку в таких реакциях существует возможность проявления резонанса на виртуальном фермионе. Отметим, что резонанс подобного типа для электродинамического процесса с двумя векторными вершинами,  $\gamma e \rightarrow \gamma e$ , в настоящее время представляет огромный интерес для астрофизических приложений к задаче формирования спектров излучения в магнитосферах нейтронных звезд [9, 10].

Самым ярким, по нашему мнению, трехвершинным петлевым процессом, в течение многих лет находящимся в поле внимания теоретиков, является расщепление фотона на два фотона в магнитном поле и/или плазме,  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ , который в вакууме запрещен кинематически. Этому процессу посвящен обзор [11], где можно найти подробный список ранних статей, среди относительно недавних работ укажем [12–15]. В работах [16, 17] было показано, что учет дисперсионных свойств фотонов в сильном магнитном поле существенно меняет кинематику процесса, и, как следствие, соотношение вероятностей различных поляризационных каналов.

Детальный анализ таких процессов в экстремальных физических условиях сильного магнитного поля и плотной плазмы, а также исследование их астрофизических приложений необходимо, например, при расчете динами-

ки остывания нейтронных звезд, при анализе образования радиоизлучения пульсаров и т.д.

Настоящая диссертация посвящена исследованию квантовых процессов с участием нейтрино и фотонов во внешней активной среде с учетом возможных резонансных эффектов.

### **Цель и задачи диссертационного исследования**

Основными задачами, рассмотренными в данной диссертации, являются:

- Исследование обобщенного комптоноподобного процесса  $jf \rightarrow j'f'$ , где  $f$  и  $f'$  – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау,  $j$  и  $j'$  – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов.
- Исследование процесса комптоновского рассеяния  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  в замагниченной плазме с учетом модификации поляризационных и дисперсионных свойств фотонов в замагниченной среде как в области энергий частиц вне резонанса, так и в случае возможного резонанса на виртуальном электроне.
- Исследование процесса расщепления фотона на два фотона,  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и обратного процесса слияния двух фотонов,  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma$  в горячей замагниченной среде включая анализ дисперсионных свойств фотонов в поле и плазме с возможными астрофизическими приложениями.
- Исследование фотон - нейтринных процессов  $\gamma e \rightarrow \gamma e \nu \bar{\nu}$ ,  $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  в плотной замагниченной среде, в рамках стандартной модели и в приложении к физике магнитаров.
- Исследование влияния замагниченной плазмы на процесс резонансного фоторождения аксионов на заряженных компонентах среды,  $i \rightarrow f + a$ . Исследование комптоноподобного процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  рождения электрон-позитронной пары при взаимодействии ультрарелятивистского электрона с мягким рентгеновским фотоном в окрестности полярной шапки магнитара.

### **Научная новизна результатов**

Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

Впервые получены наиболее общие выражения для амплитуд процесса  $jf \rightarrow j'f'$ , представленные в явном калибровочно- и лоренц-инвариантном виде. Рассмотрены частные случаи относительно сильного магнитного поля, когда реальные фермионы занимают основной уровень Ландау, а виртуальный фермион может находиться на произвольном уровне Ландау, и когерентного рассеяния тока  $j$  «вперед» без изменения состояний фермионов. Последний результат позволяет обобщить имеющиеся в литературе выражения для амплитуд перехода  $j \rightarrow f\bar{f} \rightarrow j'$  в магнитном поле на случай замагниченной плазмы.

Впервые получены простые выражения для коэффициентов поглощения фотона в процессе комптоновского рассеяния  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  на электронах сильно замагниченной плазмы в двух предельных случаях зарядово-симметричной и вырожденной плазмы с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов.

Впервые получены коэффициенты поглощения в процессах расщепления  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и слияния  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma$  фотонов в сильно замагниченной зарядово-симметричной плазме с учетом изменения дисперсионных свойств и правил отбора по поляризациям фотонов в такой среде в общем случае, когда распадающийся фотон распространяется под произвольным углом по отношению к направлению магнитного поля.

В замагниченной плотной плазме впервые получены аппроксимационные формулы для светимости за счет фотонейтринного процесса,  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ , в двух случаях релятивистской и нерелятивистской плазмы.

Впервые показано, что в случае холодной, сильно замагниченной плазмы вклад в нейтринную излучательную способность процесса  $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ , несмотря на фактор  $(B/B_e)^2$ , будет сильно подавлен по сравнению с вкладами фотонейтринного процесса,  $e\gamma \rightarrow e\nu\bar{\nu}$  и процесса конверсии фотона,  $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ .

Впервые найдено число аксионов, рождаемых равновесным реликтовым излучением в магнитосфере магнитара. Показано, что в противовес ранее сделанным в литературе выводам, рассмотренный резонансный механизм не эффективен для производства холодной скрытой массы.

Для процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  впервые получено простое аналитическое выражение для коэффициента поглощения электрона и сделана оценка возможной эффективности процесса рождения пар для генерации в магнитосфере электрон-позитронной плазмы.

## Практическая ценность работы

Полученные в диссертации 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 явлений, таких, как гигантские вспышки SGR, остывание нейтронных звезд, генерация плазмы в магнитосферах радиопульсаров и магнитаров, где могут реализоваться рассматриваемые физические условия.

## Методология и методы исследования

При проведении исследований квантовых процессов в магнитном поле и плазме используется аппарат квантовой теории поля во внешней активной среде с учётом возможной модификации поляризационных и дисперсионных свойств частиц в такой среде. Кроме того, при расчёте амплитуд рассеяния в условиях умеренно сильного магнитного поля в диссертации используется метод, когда парциальные вклады в амплитуду от каналов с различными значениями поляризационных состояний фермионов вычисляются отдельно, путём непосредственного перемножения биспиноров в виде собственных функций ковариантного оператора обобщённого магнитного момента.

## Личный вклад автора

Автором вычислены: амплитуды обобщенного комптоноподобного процесса  $jf \rightarrow j'f'$  в постоянном однородном магнитном поле с произвольной величиной напряженности и когерентного рассеяния тока  $j$  «вперед» без изменения состояний фермионов, где  $f$  и  $f'$  – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау,  $j$  и  $j'$  – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов, коэффициенты поглощения фотона, коэффициенты поглощения фотона в процессе комптоновского рассеяния  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  на электронах сильно замагниченной плазмы в двух предельных случаях зарядово-симметричной и вырожденной плазмы, коэффициенты поглощения в процессах расщепления  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и слияния  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma$  фотонов в сильно замагниченной зарядово симметричной плазме; получены аппроксимационные формулы для светимости за счет фотонейтринного процесса,  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ , в двух случаях релятивистской и нерелятивистской плазмы; найдено число аксионов, рождаемых равновесным реликтовым излучением в магнитосфере магнитара; получена оценка

возможной эффективности процесса рождения электрон-позитронных пар в полярной шапке магнитара.

## Результаты, выносимые на защиту

1. Впервые вычислены амплитуды обобщенного комптоноподобного процесса  $jf \rightarrow j'f'$  в постоянном однородном магнитном поле с произвольной величиной напряженности, где  $f$  и  $f'$  – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау,  $j$  и  $j'$  – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов. Амплитуды представлены в явном калибровочно- и лоренц-инвариантном виде. Рассмотрены частные случаи сильного магнитного поля, когда реальные фермионы занимают основной уровень Ландау, и когерентного рассеяния тока  $j$  «вперед» без изменения состояний фермионов. Последний результат позволил обобщить имеющиеся в литературе выражения для амплитуд перехода  $j \rightarrow f\bar{f} \rightarrow j'$  в магнитном поле на случай произвольно замагниченной плазмы.
2. Впервые получены простые выражения для коэффициентов поглощения фотона, обусловленные процессом  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  в сильно замагниченной плазме в двух предельных случаях зарядово-симметричной и холодной почти вырожденной плазмы с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов. Проведено сравнение коэффициентов поглощения фотонов в процессе расщепления фотона и в процессе комптоновского рассеяния.
3. Вычислена амплитуда процесса расщепления фотона  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ , проанализирована кинематика и найдены правила отбора по поляризациям. Для разрешенных каналов расщепления впервые получены соответствующие вероятности с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов в общем случае, когда распадающийся фотон распространяется под произвольным углом по отношению к направлению магнитного поля. Полученные результаты показывают, что присутствие плазмы, с одной стороны, существенным образом изменяет правила отбора по поляризациям по сравнению со случаем чистого магнитного поля. Обнаружен новый канал расщепления  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ , запрещенный в отсутствие плазмы. С другой стороны, из численных расчетов и полученных асимптотических формул следует, что горячая плазма оказывает подавляющее влияние на каналы  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ . Тем не

менее, холодная зарядово-симметричная плазма в сочетании с сильным магнитным полем способна усилить вероятность расщепления по этим каналам по сравнению с чистым магнитным полем.

4. Рассмотрено влияние сильно замагниченной плотной плазмы на фотон-нейтринные процессы  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ ,  $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$  и впервые получены инвариантные амплитуды реакций  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ . В частном случае холодной плазмы впервые вычислены вклады рассматриваемых процессов в нейтринную светимость с учетом изменения дисперсионных свойств фотонов в замагниченной среде. Предложен методический прием вычисления светимости фотонейтринного процесса,  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ , через ширину поглощения фотона. На основе изложенной методики показано, что в случае релятивистской плазмы выражение для нейтринной светимости за счет процесса  $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$  существенно модифицируется по сравнению с имеющимися в литературе результатами. Показано, что в случае холодной плазмы вклад в нейтринную излучательную способность процесса  $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$  будет сильно подавлен по сравнению со вкладом фотонейтринного процесса и процесса конверсии фотона. Исходя из возможной модификации кривой охлаждения нейтринной звезды за счет изменения нейтринной светимости в сильном магнитном поле, делается предположение об ограничении на величину индукции магнитного поля во внешней коре магнитара.
5. Впервые рассмотрено влияние замагниченной плазмы на процесс резонансного фоторождения аксионов на заряженных компонентах среды,  $i \rightarrow f + a$ . Показано, что аксионная светимость в области резонанса за счет всевозможных реакций с участием частиц среды однозначно выражается через светимость перехода фотон  $\rightarrow$  аксион. Найдено число аксионов, рождаемых равновесным реликтовым излучением в магнитосфере магнитара. Показано, что в противовес ранее сделанным в литературе выводам, рассмотренный резонансный механизм не эффективен для производства холодной скрытой массы.
6. Проведено исследование комптоноподобного процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  рождения электрон-позитронной пары при взаимодействии ультрарелятивистского электрона с мягким рентгеновским фотоном в окрестности полярной шапки магнитара. Для процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  впервые получено простое аналитическое выражение для коэффициента поглощения электрона. Получена оценка возможной эффективности процес-

са рождения пар для генерации в магнитосфере электрон-позитронной плазмы.

Представленные в диссертационном исследовании результаты являются оригинальными и новыми.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Научные конференции Отделения ядерной физики РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (Москва, 2007, 2009, 2011, 2012, 2014)
- 14, 15, 16, 17, 18 и 19 Международные семинары «Кварки» (Репино, 2006; Сергиев Посад, 2008; Коломна, 2010; Ярославль, 2012; Суздаль, 2014; Пушкин, 2016)
- 15 Международная школа «Частицы и космология» (г. Троицк, Московской обл, 2011)
- Конференции «Физика нейтронных звезд» (С.-Петербург, 2008, 2011, 2014, 2017)
- Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2006, 2008, 2009, 2011)
- «Всероссийская астрономическая конференция» (ВАК) (Санкт-Петербург, 2013).
- 23 Международная конференция «Физика высоких энергий и квантовая теория поля» (Ярославль, 2017).

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах в Институте ядерных исследований РАН, Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, в Отделе теоретической астрофизики Физико-технического института РАН им. А.Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), на кафедре теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова.

## Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 26 печатных работах, из них 13 статей в рецензируемых журналах [1–13], 8 статей в сборниках трудов конференций [14–21] и 5 статей в журналах не из списка ВАК [22–26]. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения и пяти приложений. Список цитируемой литературы включает 218 наименований. Общий объем диссертации составляет 225 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, приведены общие характеристики диссертации, дан краткий обзор диссертационной работы. Каждая глава также сопровождается введением.

**В первой главе**, посвященной исследованию обобщенного комптоноподобного процесса в постоянном однородном магнитном поле, впервые получены амплитуды процесса  $jf \rightarrow j'f'$ , где  $f$  и  $f'$  – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау,  $j$  и  $j'$  – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов.

Во введении к первой главе обсуждается актуальность рассматриваемой задачи и сделан обзор литературы по двухвершинным процессам.

Во втором параграфе приводится детальная методика расчета амплитуды перехода  $jf \rightarrow j'f'$ , основанная на использовании решений уравнения Дирака для начального и конечного фермионов во внешнем постоянном однородном магнитном поле, находящихся на уровнях Ландау  $\ell$  и  $\ell'$  соответственно и являющихся собственными функциями оператора поляризации, а также пропагатора фермиона во внешнем магнитном поле, взятого в виде суммы по уровням Ландау  $n$ . Анализ полученной амплитуды позволяет выделить две возможные ситуации.

*а)* Если  $\ell, \ell' < n$ , реальная часть знаменателя в пропагаторе фермиона может обращаться в ноль, т.е. виртуальный фермион становится реальным с определенным законом дисперсии и имеет место резонанс на виртуальном фермионе.

б) При  $\ell, \ell' \geq n$  реальная часть знаменателя в пропагаторе фермиона не обращается в ноль, что говорит о невозможности реализации резонанса на виртуальном фермионе.

Амплитуды представлены в явном калибровочно- и лоренц-инвариантном виде.

В третьем параграфе рассматривается предел относительно сильного поля,  $B \gtrsim B_e$ , когда начальный и конечный фермионы находятся на основном уровне Ландау,  $\ell = \ell' = 0$ , тогда как виртуальный фермион может занимать произвольный уровень Ландау,  $n \geq 0$ .

В четвертом параграфе, используя методику расчета для процесса когерентного рассеяния обобщенного тока  $j$  на реальных фермионах среды без изменения их состояний (рассеяние «вперед»), сделано обобщение результатов, полученных в работе [18], на случай замагниченной плазмы.

В пятом параграфе обсуждаются возможные приложения результатов, полученных в данной главе.

**Вторая глава** посвящена исследованию процесса комптоновского рассеяния в сильно замагниченной плазме, когда начальный и конечный электроны (позитроны) находятся на основном уровне Ландау, включая анализ дисперсионных свойств фотонов в поле и плазме.

Во введении обсуждается актуальность рассматриваемой задачи и сделан обзор литературы в которой изучался процесс рассеяния фотонов на электронах замагниченной среды.

Во втором параграфе детально анализируются дисперсионные и поляризационные свойства фотонов, находящихся в равновесии с сильно замагниченной плазмой. Рассмотрены два частных случая зарядово симметричной плазмы, когда химический потенциал  $\mu = 0$  и зарядово несимметричной плазмы, когда  $\mu \neq 0$ .

Показано, что, вследствие наличия в плазме собственных колебаний с плазменной частотой  $\omega_p \neq 0$ , для фотона моды 2 возможна ситуация, когда в кинематической области  $q_{\parallel}^2 = \omega^2 - q_z^2 \leq 4m^2$  этот фотон может иметь положительное значение  $q^2$ . В результате может существенно измениться кинематика различных фотонных процессов. В частности, наличие плазменной частоты приводит к возникновению порога для каналов рассеяния фотона моды 2 на электронах и позитронах плазмы,  $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_1 e$ ,  $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_2 e$ , который отсутствует в чистом магнитном поле. Кроме того, открывается новый канал расщепления фотона,  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1 \gamma_1$ , запрещенный в чистом магнитном поле.

Установлено, что в сильно замагниченной ( $B \gg B_e$ ), зарядово симметрич-

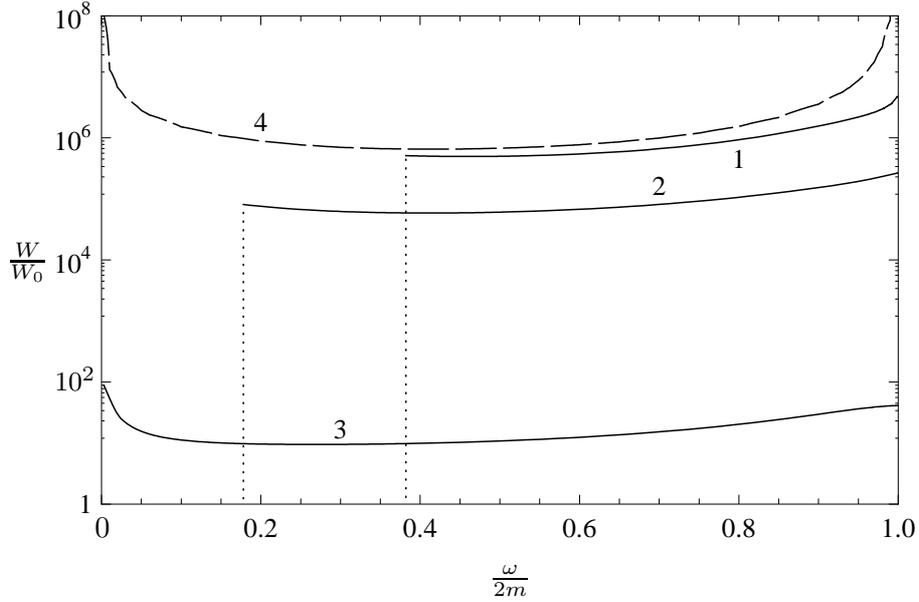


Рис. 1: Зависимость коэффициента поглощения  $W_{2 \rightarrow 2}$  для канала  $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_2 e$ , от энергии начального фотона в сильном магнитном поле  $B/B_e = 200$  при  $T = 1$  МэВ – 1,  $T = 250$  кэВ – 2 и  $T = 50$  кэВ – 3. Длинная штриховая линия – 4 соответствует коэффициенту поглощения фотона без учета изменения дисперсионных свойств и перенормировки волновой функции фотона при  $T = 1$  МэВ. Здесь  $\theta = \pi/2$ ,  $W_0 = (\alpha/\pi)^3 m \simeq 3.25 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$ .

ной плазме ( $\mu = 0$ ) и в холодной, почти вырожденной, умеренно релятивистской плазме ( $T \ll \mu - m$ ,  $\alpha p_F / (\pi m \sin \theta) \ll 1$ ,  $T$  – температура электронного газа,  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры,  $p_F = \sqrt{\mu^2 - m^2}$  – импульс Ферми,  $\theta$  – угол между импульсом фотона и направлением магнитного поля) векторы поляризации фотонов остаются такими же, как и в чистом магнитном поле. Отмечено, что в холодной, почти вырожденной плазме имеет место эффект смещения первого циклотронного резонанса с величины  $q_{\parallel}^2 = 4m^2$  до

$$q_{\parallel}^2 = 2 \left( \mu^2 - p_F |q_z| + \mu \sqrt{(p_F - |q_z|)^2 + m^2} \right). \quad (2)$$

В третьем параграфе на основе правил отбора по поляризациям фотонов, полученным в предыдущем параграфе, и результатов главы 1 вычислены парциальные амплитуды для каналов рассеяния  $\gamma_1 e \rightarrow \gamma_1 e$ ,  $\gamma_1 e \rightarrow \gamma_2 e$ ,  $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_1 e$  и  $\gamma_2 e \rightarrow \gamma_2 e$  в пределе сильного магнитного поля.

В четвертом параграфе получены выражения для коэффициентов поглощения фотона в сильно замагниченной плазме в двух предельных случаях разреженной зарядово-симметричной и вырожденной плазмы с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов.

Отмечено (см. рис. 1 и 2), что в непосредственной близости от порога рождения пар становится очень важным учет дисперсии и перенормиров-

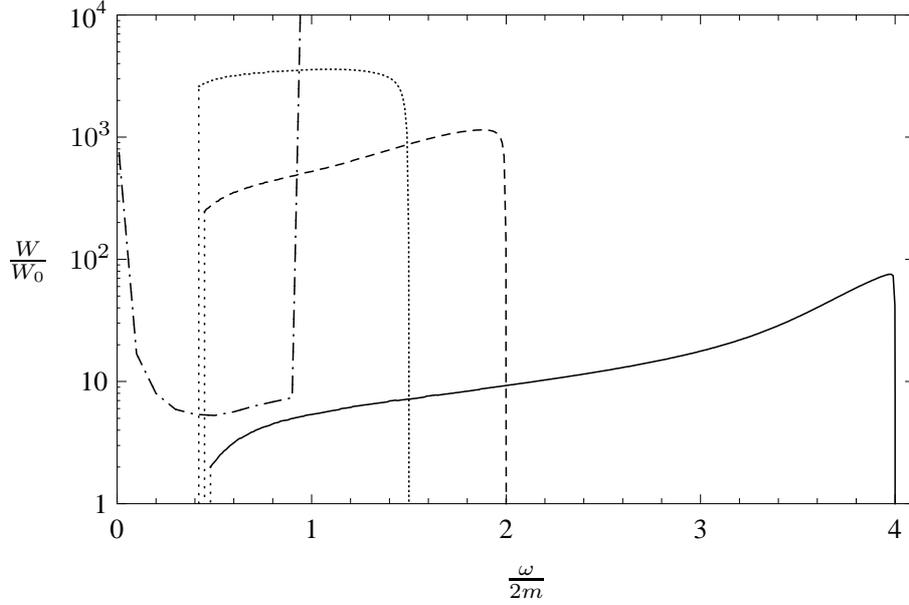


Рис. 2: Зависимость коэффициента поглощения  $W_{2 \rightarrow 2}$  для канала  $\gamma_{2e} \rightarrow \gamma_{2e}$  от энергии начального фотона в сильном магнитном поле  $B/B_e = 200$  и  $T = 50$  кэВ при  $\mu = 2$  МэВ – сплошная линия,  $\mu = 1$  МэВ – штриховая линия,  $\mu = 750$  кэВ – пунктирная линия. Штрихпунктирная линия соответствует коэффициенту поглощения без учета дисперсии и перенормировки волновой функции фотона при  $\mu = 2$  МэВ. Здесь  $\theta = \pi/2$ .

ки волновых функций фотонов, что и определяет, в конечном итоге, зависимость коэффициентов поглощения от значений энергии, температуры и магнитного поля. Это можно непосредственно видеть на рис. 1 из сравнения сплошной линии 1, соответствующей каналу рассеяния  $\gamma_{2e} \rightarrow \gamma_{2e}$  при  $\mu = 0$ ,  $T = 1$  МэВ,  $B = 200B_e$ , и пунктирной линии 4, представляющей коэффициент поглощения без учета дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов, а также сплошной и штрихпунктирной линий на рис. 2 для канала рассеяния  $\gamma_{2e} \rightarrow \gamma_{2e}$  при  $\mu = 2$  МэВ,  $T = 50$  кэВ,  $B = 200B_e$ .

**В третьей главе** проведен детальный анализ процессов расщепления фотона на два фотона,  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и слияния двух фотонов,  $\gamma\gamma \rightarrow \gamma$  в сильно замагниченной среде включая возможные астрофизические приложения.

Во введении обосновывается актуальность задачи и сделан обзор литературы по процессу расщепления фотона.

Во втором параграфе вычисляется амплитуда расщепления фотона в сильном магнитном поле и плазме в общем случае ненулевого химического потенциала и температуры.

В третьем параграфе на основе результатов, полученных в главе 2, анализируется кинематика процесса  $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$  и рассматриваются изменения правил отбора по поляризациям фотонов. Например, в области, где квадрат четы-

рехмерного импульса фотона положителен, становится возможным новый канал расщепления  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ , запрещенный в магнитном поле в отсутствие плазмы. В то же время каналы расщепления  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ , разрешенные в магнитном поле, в этой области кинематически закрыты.

В четвертом параграфе проводится численный анализ вероятностей изменения состояния фотона для кинематически разрешенных каналов расщепления и слияния с учетом дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов в случае, когда начальный фотон распространяется под произвольным углом по отношению к направлению магнитного поля.

Получены относительно простые выражения для вероятностей расщепления фотона по каналам  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ :

**а)** в случае низких энергий начального фотона,  $\omega \ll m$ :

$$W_{1 \rightarrow 12} \simeq \frac{\alpha^3 \xi^2 m}{288 \pi^2} \left( \frac{T}{m} \right)^5 \mathcal{F}_1 \left( \frac{\omega}{T}, \sin \theta \right), \quad (3)$$

$$W_{1 \rightarrow 22} \simeq \frac{\alpha^3 m}{72 \pi^2} \left( \frac{T}{m} \right)^5 \mathcal{F}_2 \left( \frac{\omega}{T}, \sin \theta \right), \quad (4)$$

где  $\mathcal{F}_1(y, z)$  и  $\mathcal{F}_2(y, z)$  обозначают интегралы:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1(y, z) &= \frac{1}{y^2 z} \int_{\delta}^{yz} \frac{dx}{x^2} \frac{[x^2 - \delta^2]^4}{[1 - \exp(-x)]} \times \\ &\times \frac{1}{[1 - \exp(x - y)(1 - \frac{\xi}{2y}(x^2 - \delta^2))]}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_2(y, z) &= z \Theta(yz - 2\delta) \int_{\delta}^{\lambda(y,z)} dx \frac{[x(yz - x) - \delta^2]^2}{[1 - \exp(-x)]} \times \\ &\times \frac{1}{[1 - \exp(x - y)(1 - \frac{\xi}{2y}(x^2 - \delta^2))]}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda(y, z) = \frac{yz}{2} + \sqrt{\frac{y^2 z^2}{4} - \delta^2}, \quad \delta \equiv \frac{\omega_p}{T \xi^{1/2}},$$

$\xi = \frac{\alpha}{3\pi} \frac{B}{B_e}$ ,  $\Theta(x)$  – тэта-функция;

**б)** в случае относительно высоких энергий начального фотона  $m \ll \omega \sin \theta \ll \sqrt{eB}$ :

$$W_{1 \rightarrow 12} \simeq \frac{\alpha^3 T^2}{4\omega \sin^2 \theta} \times \left[ (1 - \cos \theta)^2 \mathcal{F}_3 \left( \frac{\omega(1 + \cos \theta)}{2T} \right) + (\cos \theta \rightarrow -\cos \theta) \right], \quad (7)$$

$$W_{1 \rightarrow 22} \simeq \frac{\alpha^3 m^2}{4\omega} \frac{1}{1 - \exp \left[ -\frac{\omega}{T}(1 - \cos \theta) \right]} \times \frac{1}{1 - \exp \left[ -\frac{\omega}{T}(1 + \cos \theta) \right]} \times \left\{ \text{th}^2 \left[ \frac{\omega}{8T}(1 - \cos \theta) \right] + (\cos \theta \rightarrow -\cos \theta) \right\}, \quad (8)$$

где

$$\mathcal{F}_3(z) = \int_0^z \frac{x \text{th}^2(x/4) dx}{[1 - \exp(-x)][1 - \exp(x - \omega/T)]}. \quad (9)$$

Полученные результаты показывают, что присутствие плазмы, с одной стороны, существенным образом изменяет правила отбора по поляризациям по сравнению со случаем чистого магнитного поля. С другой стороны, из численных расчетов и полученных асимптотических формул следует, что горячая плазма оказывает подавляющее влияние на каналы  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ . Тем не менее, как оказалось, холодная зарядово-симметричная плазма в сочетании с сильным магнитным полем способна усилить вероятность расщепления по этим каналам по сравнению с чистым магнитным полем.

Проведено сравнение полной вероятности расщепления по каналам  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$  с суммарным коэффициентом поглощения в комптоновском процессе  $W_{1 \rightarrow 1} + W_{1 \rightarrow 2}$ . Показано (см. рис. 3), что процесс расщепления фотона (штрихпунктирная линия) сильно доминирует над реакцией комптоновского рассеяния при  $T = 50$  кэВ.

Получена вероятность расщепления фотона по «новому» каналу,  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ , запрещенному в чистом магнитном поле. В частности, на рис. 4 вероятность поглощения фотона для канала  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$  как функция энергии начального фотона представлена для случая, когда фотон распространяется поперек направления магнитного поля при температурах 1 МэВ и 500 кэВ.

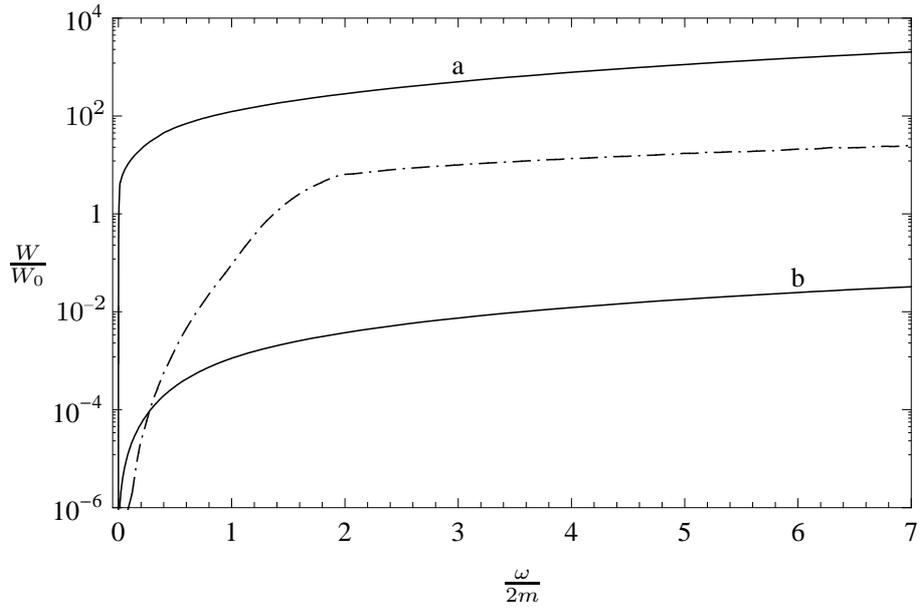


Рис. 3: Зависимость полной вероятности поглощения фотона  $W_{1 \rightarrow 1} + W_{1 \rightarrow 2}$  от энергии начального фотона в сильном магнитном поле  $B/B_e = 200$  при  $T = 1$  МэВ (a) и  $T = 50$  кэВ (b). Штрихпунктирная линия соответствует полной вероятности расщепления фотона  $W_{1 \rightarrow 12} + W_{1 \rightarrow 22}$  при  $T = 50$  кэВ. Здесь  $\theta = \pi/2$ .

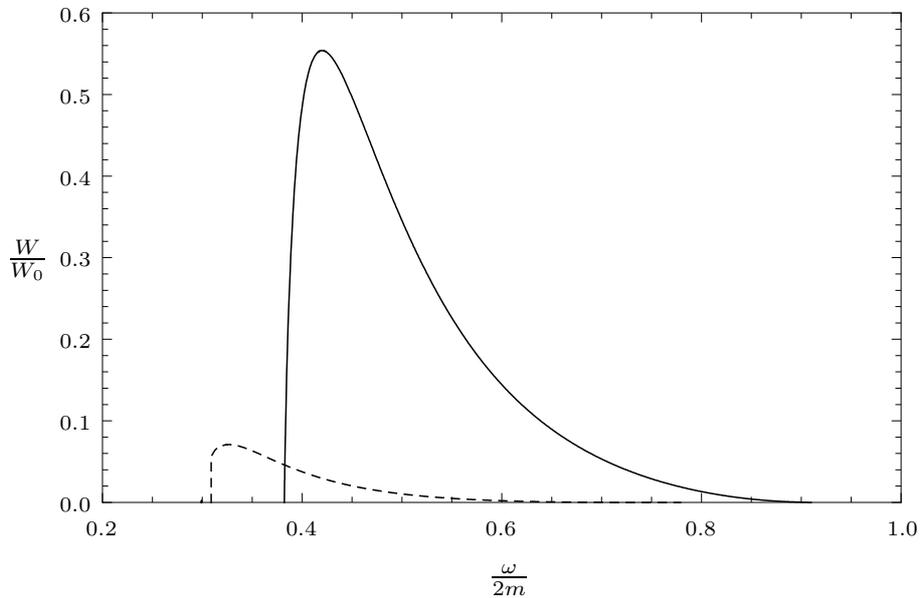


Рис. 4: Вероятность расщепления фотона по каналу  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1 \gamma_1$  в сильном магнитном поле ( $B/B_e = 200$ ) при температуре 1 МэВ (сплошная линия) и 500 кэВ (штриховая линия). Здесь  $\theta = \pi/2$ .

Видно, что, в противоположность каналам  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$  и  $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ , вероятность «нового» канала расщепления  $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$  быстро падает с понижением температуры. Это обусловлено уменьшением кинематически разрешенной области ( $q^2 > 0$ ) для рассматриваемого канала, что приводит к уменьшению фазового объема реакции с уменьшением температуры.

В пятом параграфе обсуждаются возможные приложения результатов, полученных в данной главе. В частности, продемонстрирована важность учета дисперсии и перенормировки волновых функций фотонов в задаче переноса излучения. Показано, что используемое в литературе приближение (см. [5, 19]) вообще не применимо к горячей плазме.

**В четвертой главе** приведен результат исследования фотон - нейтринных процессов  $\gamma e^\pm \rightarrow \gamma e^\pm \nu \bar{\nu}$ ,  $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  в рамках стандартной модели и в приложении к физике магнитаров.

В первом параграфе дан обзор работ, в которых изучались фотон - нейтринные процессы во внешнем магнитном поле и холодной, плотной плазме.

Во втором параграфе проводится вычисление инвариантных амплитуд реакций  $\gamma e^\pm \rightarrow e^\pm \nu \bar{\nu}$ ,  $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  в сильно замагниченной плазме.

В третьем параграфе проводится детальный расчет для энергии, уносимой нейтрино из единицы объема за единицу времени за счет реакций  $\gamma e \rightarrow e \nu \bar{\nu}$ ,  $\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  и  $\gamma\gamma \rightarrow \nu \bar{\nu}$  в рамках условий, реализуемых в наружной части коры замагниченной нейтронной звезды и с учетом возможного изменения дисперсионных и поляризационных свойств фотонов в таких условиях. В частности, при вычислении светимости обусловленной фотонейтринным процессом,  $\gamma e \rightarrow e \nu \bar{\nu}$ , оказалось возможным применить полезный методический прием факторизации амплитуды фоторождения нейтрино,  $\mathcal{M}_{\gamma e \rightarrow e \nu \bar{\nu}}$ , амплитудой комптоновского рассеяния фотона моды 2,  $\mathcal{M}_{2 \rightarrow 2}$ , полученной в главе 2.

Получены следующие выражения для светимости фотонейтринного процесса:

**а)** в случае нерелятивистской плазмы,  $\mu \sim m$ , при произвольном соотношении между плазменной частотой и температурой имеем:

$$Q_{\gamma e \rightarrow e \nu \bar{\nu}} \simeq Q_s F\left(\frac{\omega_p}{T}\right), \quad (10)$$

где

$$Q_s = \frac{8\pi^2 \alpha G_F^2 e B T^9}{4725 m p_F} \left[ \overline{C_V^2} + \overline{C_A^2} \right] \simeq 1.3 \cdot 10^6 B_{15}^2 \rho_6^{-1} T_8^9 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3 \text{с}} \quad (11)$$

– светимость в пределе  $\omega_p \ll T$  [20]. Здесь:  $G_F$  – постоянная Ферми, векторная и аксиальная константы  $\overline{C_V^2} = 0.93$  и  $\overline{C_A^2} = 0.75$  – результат суммирования по всем каналам рождения нейтрино типов  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ , а также использованы обозначения  $B_{15} = B/(10^{15} \text{ Гс})$ ,  $\rho_6 = \rho/(10^6 \text{ г/см}^3)$ ,  $T_8 = T/(10^8 \text{ К})$ .

Функция  $F(\omega_p/T)$ , зависящая от отношения плазменной частоты к температуре может быть приближена следующей аппроксимационной формулой, дающей расхождение с точным выражением не превышающее 14% для  $\omega_p \lesssim 10T$ :

$$F(y) \simeq \frac{45e^{-y}}{128\pi^8} (3y^7 + 31y^6 + 212y^5 + 1108y^4 + 4480y^3 + 13440y^2 + 26880y + 26880). \quad (12)$$

**б)** в случае релятивистской плазмы,  $\mu \gg m$ , при произвольном соотношении между плазменной частотой и температурой получим:

$$Q_{\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}} \simeq Q_b R\left(\frac{\omega_p}{2T}\right) \quad (13)$$

где

$$Q_b = \frac{G_F^2 \alpha (\overline{C_V^2} + \overline{C_A^2}) B}{576(2\pi)^{11/2} B_e} \left(\frac{m}{\mu}\right)^6 \omega_p^{15/2} T^{3/2} e^{-\omega_p/T} \quad (14)$$

$$\simeq 10^{11} B_{16}^{43/4} \rho_9^{-6} T_9^{3/2} \exp\left(-6B_{16}^{1/2} T_9^{-1}\right) \frac{\text{ЭрГ}}{\text{см}^3 \text{ с}}$$

– светимость в пределе  $\omega_p \gg T$  [21].

Здесь  $B_{16} = B/(10^{16} \text{ Гс})$ ,  $\rho_9 = \rho/(10^9 \text{ г/см}^3)$ ,  $T_9 = T/(10^9 \text{ К})$ .

Фактор  $R(z)$  с точностью 0.8% описывается следующей аппроксимационной формулой:

$$R(z) \simeq 1 + \frac{0.7627}{z^{1/2}} + \frac{66.875}{z^{3/2}} + \frac{271.654}{z^{5/2}} + \frac{2509.36}{z^{7/2}} + \frac{6754.62}{z^{9/2}} + \frac{16612.9}{z^{11/2}} + \frac{19843.8}{z^{13/2}} + \frac{10188.5}{z^{15/2}}. \quad (15)$$

Для процесса  $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$  в предельном случае нерелятивистской плазмы,  $\mu \sim m$ , получены простые выражения для его вклада в нейтринную излучательную способность:

**а)** в пределе  $\omega_p \ll T$ :

$$Q_{\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}} \simeq \frac{G_F^2}{105\pi^4 \alpha} \omega_p^4 T^5 \left[ \overline{C_V^2} \zeta(3) \left(\frac{\omega_p}{T}\right)^2 + 12 \overline{C_A^2} \zeta(5) \right], \quad (16)$$

где  $\zeta(x)$  – дзета-функция Римана.

б) в противоположном пределе,  $\omega_p \gg T$ :

$$Q_{\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}} \simeq \frac{G_F^2}{384\pi^{7/2}\alpha} \omega_p^9 \left[ \overline{C}_V^2 \left( \frac{2T}{\omega_p} \right)^{3/2} + \overline{C}_A^2 \left( \frac{2T}{\omega_p} \right)^{5/2} \right] \exp\left(-\frac{\omega_p}{T}\right). \quad (17)$$

Показано, что в случае холодной плазмы вклад в нейтринную излучательную способность процесса  $\gamma\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$  будет сильно подавлен по сравнению с вкладами фотонейтринного процесса и процесса конверсии фотона,  $\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}$ .

В четвертом параграфе исходя из возможной модификации кривой охлаждения нейтронной звезды за счет изменения нейтринной светимости в сильном магнитном поле, выдвинута гипотеза об ограничении на величину индукции магнитного поля во внешней коре магнитара,  $B \lesssim 10^{15}$  Гс.

**В пятой главе** приведены результаты исследования резонансных процессов в замагниченной среде. В частности, в рамках квантовой электродинамики рассматриваются два возможных типа резонансов: на виртуальном фотоне и виртуальном электроде, которые могут давать основной вклад в физически наблюдаемые характеристики, такие как светимость и число рождаемых частиц, что обосновывается во введении к данной главе.

Во втором параграфе обсуждается процесс резонансного фоторождения аксионов на заряженных компонентах среды,  $i \rightarrow f + a$ , когда резонансный эффект реализуется на виртуальном фотоне. Показано, что аксионная светимость в области резонанса за счет всевозможных реакций с участием частиц среды однозначно выражается через светимость перехода фотон  $\rightarrow$  аксион. Найдено число аксионов, рождаемых равновесным реликтовым излучением в единице объема магнитосферы магнитара за единицу времени:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt dV} &\simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} \omega_p^2 \frac{1 + \xi}{\xi^2} \times \\ &\times \left( \exp \left[ \frac{\omega_p}{T} \sqrt{1 + \frac{1}{\xi}} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad \omega_p, T \gg m_a, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{dN}{dt dV} \simeq \frac{g_{a\gamma}^2 (eB)^2}{16\pi^2 \alpha} \frac{T m_a^2}{\omega_p} e^{-\omega_p/T}, \quad \omega_p \gg T \sim m_a, \quad (19)$$

где  $g_{a\gamma}$  – константа связи аксиона с фотоном,  $m_a$  – масса аксиона.

Показано, что в противовес ранее сделанным в литературе выводам, рассмотренный резонансный механизм не эффективен для производства холодной скрытой массы.

В третьем параграфе рассматривается случай резонанса на виртуальном электро-не в процессе вида  $jf \rightarrow j'f'$ , рассмотренного в главе 1 настоящей диссертации. Показано, что в случае  $\delta$ -функциональной аппроксимации резонансных пиков, квадрат амплитуды процесса  $jf \rightarrow j'f'$  может быть факторизован квадратами одновершинных амплитуд подпроцессов перехода некоторого начального состояния  $jf$  в фермион, находящийся на  $n$ -м уровне Ландау, и перехода фермиона с уровня  $n$  в некоторое конечное состояние  $j'f'$ . В качестве приложения полученных результатов рассмотрены реакции  $\gamma e \rightarrow \gamma e$  и  $\gamma e \rightarrow \nu \bar{\nu} e$  с учетом возможного резонанса на виртуальном электро-не. Получен коэффициент поглощения фотона в процессе  $\gamma e \rightarrow \gamma e$ , представленный в простой аналитической форме, удобной для дальнейшего использования при решении задачи переноса излучения.

Получено выражение для нейтринной светимости за счет реакции  $\gamma e \rightarrow \nu \bar{\nu} e$ . Показано, что в случае резонанса на виртуальном электро-не, нейтринная светимость, обусловленная процессом  $\gamma e \rightarrow \nu \bar{\nu} e$  может быть выражена через нейтринную светимость, обусловленную процессом  $e \rightarrow e \nu \bar{\nu}$ .

В четвертом параграфе проведено исследование комптоноподобного процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  рождения электрон-позитронной пары при взаимодействии ультрарелятивистского электрона с мягким рентгеновским фотоном в окрестности полярной шапки магнитара. Оказывается, в таком процессе могут реализовываться оба типа рассматриваемых резонансов – на виртуальном фотоне и виртуальном электро-не. Для процесса  $\gamma e^- \rightarrow e^- e^+ e^-$  получено простое аналитическое выражение для коэффициента поглощения электрона:

$$W \simeq \frac{\alpha}{2} T \frac{B}{B_e} \left( \frac{m}{E} \right)^2 \ln \left( 1 - e^{-\frac{eB}{2ET}} \right)^{-1}. \quad (20)$$

Получена оценка возможной эффективности процесса рождения пар для генерации в магнитосфере электрон-позитронной плазмы.

**В Заключение** сформулированы основные результаты диссертации.

**В Приложении А** приведены факторы  $\mathcal{R}_{k'k}^{s's}$ , входящие в выражения для обобщенных амплитуд процесса  $jf \rightarrow j'f'$  с токами  $j$  и  $j'$  скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов.

**В Приложении Б** приводится выражение для пропагатора фермиона в магнитном поле с учетом радиационных поправок в виде суммы по уровням Ландау.

**В Приложении В** приведены факторы  $\mathcal{T}_k^{s''s}$  входящие в выражения для одновершинных амплитуд процесса  $f \rightarrow jf'$

В **Приложении Г** приводится вычисление амплитуды рассеяния фотона на электронах замагниченной плазмы с излучением двух фотонов.

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

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Д. А. Румянцев, М. В. Чистяков. Влияние сильно замагниченной плазмы на процесс расщепления фотона. // ЖЭТФ. 2005. Т. 128, № 4. С. 740-751.
2. Д. А. Румянцев, М. В. Чистяков. Влияние фотон-нейтринных процессов на остывание магнитара. // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, № 4. С. 627-636.
3. Д. А. Румянцев, М. В. Чистяков. Процессы с участием фотонов в сильно замагниченной плазме. // Ядерная физика. 2009. Т. 72, № 2. С. 334-339.
4. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev. Compton effect in strongly magnetized plasma. // Int. J. Mod. Phys. A. 2009. V. 24, No. 20-21. P. 3995-4008.
5. Н. В. Михеев, Д. А. Румянцев, Ю. Е. Школьникова. О резонансном рождении аксионов в магнитосфере магнитара. // Письма в журн. эксперим. и теор. физ. 2009. Т. 90, № 9. С. 668-671.
6. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev, N. S. Stus'. Photon splitting and Compton scattering in strongly magnetized hot plasma. // Phys. Rev. D. 2012. V. 86, P. 043007 (1-17).
7. Д. А. Румянцев. Резонансный механизм рождения  $e^+e^-$  пар в сильном магнитном поле. // Ядерная физика. 2013. Т. 76, № 12. С. 1605-1609.
8. Н. В. Михеев, Д. А. Румянцев, М. В. Чистяков. Фоторождение нейтрино на электроде в плотной замагниченной среде. // ЖЭТФ. 2014. Т. 146, № 2. С. 289-296.
9. A. V. Kuznetsov, D. A. Romyantsev, V. N. Savin. Creation of electron-positron pairs at excited Landau levels by a neutrino in a strong magnetic field. // Int. J. Mod. Phys. A. 2014. V. 29, No. 26. P. 1450136 (1-16).
10. A. V. Kuznetsov, D. A. Romyantsev, D. M. Shlencev. Generalized two-point tree-level amplitude  $jf \rightarrow j'f'$  in a magnetized medium. // Int. J. Mod. Phys. A. 2015. V. 30, No. 11. P. 1550049 (1-23).

11. A. V. Kuznetsov, D. A. Romyantsev, V. N. Savin. Neutrino processes  $\nu\bar{\nu} \rightarrow e^+e^-$  and  $\nu \rightarrow \nu e^+e^-$  in a strong magnetic field. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 675, P. 032019 (1-4).
12. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev, D. M. Shlenev. Photon splitting in a strongly magnetized, charge-asymmetric plasma. // EPJ Web Conf. 2016 V. 125, P. 04017 (1-11).
13. Д. А. Румянцев, Д. М. Шленев, А. А. Ярков. Резонансы в комптоноподобных процессах рассеяния во внешней замагниченной среде. // ЖЭТФ. 2017. Т. 152, № 3. С. 483-494.
14. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev. The Compton effect in strongly magnetized plasma. // Quarks'2006. Proc. 14-th Int. Sem. St.-Petersburg, Repino, Russia, 2006. Eds. S.V. Demidov et al. Inst. Nucl. Res. RAS. Moscow. 2007. V. 2, P. 255-263.
15. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev. Influence of the photon - neutrino processes on magnetar cooling. // Quarks'2008. Proc. of 15-th Int. Sem. «Quarks'2008», Sergiev Posad, Russia, 2008. Eds. by V. A. Duk, e.a. Inst. Nucl. Res. RAS. Moscow. 2010. P. 382-389.
16. M. V. Chistyakov, D. A. Romyantsev. Electromagnetic process in strongly magnetized plasma. // Quarks'2008. Proc. of 15-th Int. Sem. «Quarks'2008», Sergiev Posad, Russia, 2008. Eds. by V. A. Duk, e.a. Inst. Nucl. Res. RAS. Moscow. 2010. P. 75-84.
17. N. V. Mikheev, D. A. Romyantsev, Yu. E. Shkol'nikova. Resonant  $\gamma \rightarrow a$  transition in magnetar magnetosphere. // Quarks'2010. Proc. of 16-th Int. Sem. «Quarks'2010», Kolomna, Russia, 2010. Ed. by V. A. Matveev, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow, 2010, P. 364-369.
18. D. A. Romyantsev. Resonant electron-positron pairs production in magnetar polar cap. // Quarks'2012. Proc. of 17-th Int. Seminar «Quarks'2012», Yaroslavl, Russia, 2012. Ed. by V.A. Khlebnikov, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow, 2013. V. 2. P. 222-228.
19. M. V. Chistyakov, A. V. Kuznetsov, N. V. Mikheev, D. A. Romyantsev, D. M. Shlenev. Neutrino photoproduction on electron in dense magnetized medium. // Quarks'2014. Proc. of 18-th Int. Sem. «Quarks'2014», Suzdal, Russia, 2014. Ed. by P. S. Satunin, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow, 2015, P. 322-329.

20. A. V. Kuznetsov, D. A. Romyantsev, V. N. Savin. Neutrino production of electron-positron pairs at excited Landau levels in a strong magnetic field. // Quarks'2014. Proc. of 18-th Int. Sem. «Quarks'2014», Suzdal, Russia, 2014. Ed. by P. S. Satunin, e.a. Inst. Nucl. Res., Moscow, 2015, P. 315-321.
21. A. V. Kuznetsov, D. A. Romyantsev, V. N. Savin. Neutrino production of  $e^+e^-$  pairs in a strong magnetic field. // Proceeding of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. Particle Physics at the Year of Light. Moscow, Russia, August 20-26, 2015. 2015. P. 525-527.
22. Н. В. Михеев, Д. А. Румянцев, Ю. Е. Школьников. Резонансный  $\gamma \rightarrow a$  переход в магнитосфере магнитара. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2009. № 1. С. 25-28.
23. Н. В. Михеев, Д. А. Румянцев, Ю. Е. Школьников. Резонансный механизм рождения аксионов в магнитосфере магнитара. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2011. № 1. С. 43-47.
24. Д. А. Румянцев, Н. С. Стусь. Резонансное рождение электрон-позитронных пар в полярной шапке магнитара. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2011. № 2. С. 32-37.
25. А. В. Кузнецов, Д. А. Румянцев, В. Н. Савин. Нейтринное рождение электрон-позитронных пар в магнитном поле произвольной интенсивности. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2014. № 1. С. 7-13.
26. А. В. Кузнецов, Д. А. Румянцев, Д. М. Шленев. Обобщённая древесная амплитуда рассеяния в замагниченной среде. // Вестник Ярославского государственного университета им. П.Г.Демидова. Серия Естественные и технические науки. 2015. № 1. С. 16-26.

## Список литературы

- [1] Ryu D., Schleicher D. R. G., Treumann R. A. et al. Magnetic fields in the large-scale structure of the universe // Space Science Reviews. 2012. Vol. 166, no. 1-4. P. 1-35.

- [2] Бисноватый-Коган Г. Взрыв вращающейся звезды как механизм сверхновой // *Астрон. журн.* 1970. Т. 47. С. 813–816.
- [3] Бисноватый-Коган Г. С. Физические вопросы теории звездной эволюции. Москва: Наука, 1989. 487 с.
- [4] Olausen S. A., Kaspi V. M. The McGill magnetar catalog // *Astrophys. J. Suppl.* 2014. Vol. 212, no. 1. P. 6.
- [5] Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars - I. Radiative mechanism for outbursts // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 1995. Vol. 275. P. 255–300.
- [6] Thompson C., Duncan R. C. The soft gamma repeaters as very strongly magnetized neutron stars. II. Quiescent neutrino, X-Ray, and Alfvén wave emission // *Astrophys. J.* 1996. Vol. 473. P. 322–342.
- [7] Thompson C., Lyutikov M., Kulkarni S. R. Electrodynamics of magnetars: implications for the persistent x-ray emission and spindown of the soft gamma repeaters and anomalous x-ray pulsars // *Astrophys. J.* 2002. Vol. 574, no. 1. P. 332–355.
- [8] Goldreich P., Julian W. H. Pulsar electrodynamics // *Astrophys. J.* 1969. Vol. 157. P. 869–880.
- [9] Gonthier P. L., Baring M. G., Eiles M. T. et al. Compton scattering in strong magnetic fields: Spin-dependent influences at the cyclotron resonance // *Phys. Rev.* 2014. Vol. D90, no. 4. P. 043014.
- [10] Mushtukov A. A., Nagirner D. I., Poutanen J. Compton scattering S-matrix and cross section in strong magnetic field // *Phys. Rev.* 2016. Vol. D93, no. 10. P. 105003.
- [11] Папанян В. О., Ритус В. И. Трехфотонное взаимодействие в интенсивном поле // *Тр. ФИАН СССР “Проблемы квантовой электродинамики интенсивного поля”*. 1986. Т. 168. С. 120–140.
- [12] Adler S. L., Schubert C. Photon splitting in a strong magnetic field: recalculation and comparison with previous calculations // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 77. P. 1695 – 1698.
- [13] Baier V. N., Milstein A. I., Shaisultanov R. Z. Photon splitting in a very strong magnetic field // *Phys. Rev. Lett.* 1996. Vol. 77. P. 1691 – 1695.

- [14] Байер В. Н., Мильштейн А. И., Шайсултанов Р. Ж. Расщепление фотона в сверхсильном магнитном поле // ЖЭТФ. 1997. Т. 111, № 1. С. 52–62.
- [15] Wilke C., Wunner G. Photon splitting in strong magnetic fields: asymptotic approximation formulae vs. accurate numerical results // Phys. Rev. 1997. Vol. D55, no. 2. P. 997–1000.
- [16] Chistyakov M. V., Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Photon splitting above the pair creation threshold in a strong magnetic field // Phys. Lett. 1998. Vol. B434, no. 1. P. 67–73.
- [17] Кузнецов А. В., Михеев Н. В., Чистяков М. В. Расщепление фотона на два фотона в сильном магнитном поле // Ядерная физика. 1999. Т. 62, № 9. С. 1638–1646.
- [18] Боровков М. Ю., Кузнецов А. В., Михеев Н. В. Однопетлевая амплитуда перехода  $j \rightarrow f \bar{f} \rightarrow j'$  во внешнем электромагнитном поле // Ядерная физика. 1999. Т. 62, № 9. С. 1714–1722.
- [19] Thompson C., Duncan R. C. The giant flare of 1998 august 27 from SGR 1900+14. II. Radiative mechanism and physical constraints on the source // Astrophys. J. 2001. Vol. 561, no. 2. P. 980–1005.
- [20] Скобелев В. В. Комптоновский механизм генерации нейтрино и аксионов на эффективно-двумерном замагниченном ферми-газе // ЖЭТФ. 2000. Т. 117, № 6. С. 1059–1066.
- [21] Борисов А. В., Керимов Б. К., Сизин П. Е. Слабый и электромагнитный механизмы фоторождения нейтринных пар в сильно замагниченном электронном газе // Ядерная физика. 2012. Т. 75, № 11. С. 1379–1386.

Подписано в печать . Формат 60×84/16.  
Тираж 100 экз. Заказ  
Отдел оперативной полиграфии ЯрГУ  
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.