

На правах рукописи

Шленев Денис Михайлович

**КОМПТОНОПОДОБНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ПРИСУТСТВИИ
ВНЕШНЕЙ АКТИВНОЙ СРЕДЫ**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

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

Научный руководитель:

Румянцев Дмитрий Александрович,

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

Официальные оппоненты:

Дворников Максим Сергеевич, д. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, г. Москва, г. Троицк, заведующий теоретическим отделом.

Шабад Анатолий Ефимович, д. ф.-м. н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, г. Москва, главный научный сотрудник лаборатории квантовой теории поля.

Ведущая организация:

Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна.

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 _____

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.119.01

к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. ИЯИ РАН

С.В. Демидов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

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 B может варьироваться в очень широких пределах: от крупномасштабных (~ 100 килопарсек) межгалактических магнитных полей $\sim 10^{-21}$ Гс [1], до полей, реализующихся в сценарии ротационного взрыва сверхновой $\sim 10^{17}$ Гс [2, 3].

Особый интерес представляют объекты с полями масштаба так называемого критического значения $B_e = m^2/e \simeq 4.41 \times 10^{13}$ Гс¹. 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 4×10^{14} Гс (магнитары). Недавние наблюдения позволяют, в частности, отождествить некоторые астрофизические объекты, такие как источники мягких повторяющихся гамма-всплесков (SGR) и аномальные рентгеновские пульсары (AXP), 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 $P = 2\pi/\Omega$ - период обращения нейтронной звезды.

¹ В работе используется естественная система единиц, где $c = \hbar = k_B = 1$, m - масса электрона, $e > 0$ - 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, такие как электроны, фотоны и нейтрино. Воздействие внешнего поля на такие процессы обусловлено как чувствительностью заряженных фермионов (в первую очередь электронов, как частиц с наибольшим удельным зарядом) к влиянию поля, так и тем фактом, что сильно замагниченная плазма существенно меняет дисперсионные свойства частиц, а значит, и их кинематику.

Кроме того, присутствие плотной горячей плазмы у нейтронных звёзд может приводить к тому, что магнитное поле перестаёт быть максимальным параметром задачи, или, если точнее, перестаёт выполняться условие [9]:

$$\frac{B^2}{8\pi} \gg \frac{\pi^2(n_{e^-} - n_{e^+})^2}{eB} + \frac{eBT^2}{12}. \quad (2)$$

При значениях плотности плазмы $\rho \geq 10^8$ г/см³ начинают возбуждаться высшие уровни Ландау виртуальных фермионов, в результате чего они становятся нестабильными. Это явление приводит к возникновению возможности резонансных переходов, которые способны значительно повлиять на скорость протекания реакций в астрофизических объектах.

Среди квантовых процессов, свойства которых существенно, а иногда принципиально меняются под воздействием замагниченной среды, особый интерес для астрофизики представляют одно-, двух- и трёхвершинные 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.

Резонанс на виртуальном электроне 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 [10, 11].

Замагниченная среда с не слишком высокими значениями плотности и температуры ($T \lesssim 2$ МэВ, $\rho \lesssim 10^{11}$ г/см³, такие условия могут существовать во внешней коре нейтронной звезды после двадцати секунд после её рождения [12]) является прозрачной для нейтрино. По этой причине квантовые процессы, содержащие нейтрино в конечном состоянии, играют определяющую роль при остывании нейтронных звёзд на начальной стадии их эволюции [13–16].

Другим интересным примером электродинамического процесса является расщепление фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$. Эта реакция запрещена в вакууме, но становится разрешённой в присутствии внешнего магнитного поля. Процесс расщепления фотона исследовался в течение длительного времени. Тем не менее, интерес к нему не угасает из-за астрофизических приложений, ведущих к наблюдаемым результатам. Сюда входят объяснение особенностей гамма-спектров некоторых радиопульсаров, особенностей радио-излучения у источников мягких повторяющихся гамма-всплесков и аномальных рентгеновских пульсаров, объяснение механизмов вспышек источников мягких повторяющихся гамма-всплесков. Детальный обзор литературы был проведён в работе [17].

Настоящая диссертация посвящена исследованию квантовых процессов с участием нейтрино и фотонов во внешней активной среде с учётом возможного резонанса на виртуальном электро-не.

Цели и задачи диссертационной работы:

1. Вычислить амплитуды обобщённого комптоноподобного процесса в области резонанса $jf \rightarrow j'f'$ в постоянном однородном магнитном поле и замагниченной плазме, где f и f' – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау, j и j' – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов для случая возможного резонанса на виртуальном фермионе.

2. Вычислить нейтринную излучательную способность, обусловленную комптоподобным процессом фоторождения нейтрино, $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$, в холодной замагниченной плазме с учетом резонанса на виртуальном электро-не, занимающем произвольный уровень Ландау n .
3. Получить коэффициент поглощения фотона в процессе $\gamma e \rightarrow \gamma e$ с учётом резонанса на виртуальном электро-не в приближении δ -образного пика.
4. Для процесса расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, в присутствии холодной почти вырожденной плазмы и в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония в дисперсию фотона определить правила отбора по поляризациям фотонов и вычислить соответствующие парциальные вероятности для разрешённых каналов.

Научная новизна.

Следующие результаты, представленные в диссертации, являются новыми:

1. Впервые получены амплитуды процесса $jf \rightarrow j'f'$ в замагниченной плазме в области резонанса.
2. Впервые получена нейтринная излучательная способность, обусловленная процессом фоторождения нейтрино, $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$, в холодной замагниченной плазме с учетом резонанса на виртуальном электро-не, занимающем произвольный уровень Ландау n .
3. Впервые получены коэффициент поглощения фотона в процессе $\gamma e \rightarrow \gamma e$ с учётом резонанса на виртуальном электро-не в приближении δ -образного пика.
4. Впервые получены правила отбора по поляризациям и вероятности в разрешённых каналах для процесса расщепления фотона в холодной почти вырожденной плазме и в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония.

Теоретическая и практическая значимость.

Результаты представляют интерес для дальнейших теоретических исследований в области астрофизики и физики элементарных частиц, когда изучаемые частицы находятся под воздействием внешних экстремальных условий. Также результаты исследования могут быть использованы в образовательных целях как материал для учебной и методической литературы в помощь студентам соответствующих направлений подготовки.

Методология и методы исследования.

При проведении исследований использовались известные методы квантовой теории поля и теоретические разработки физики элементарных частиц, развитые как для вакуума, так и для внешней активной среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые исследованы возможные резонансные эффекты в древесных двухвершинных амплитудах для переходов $jf \rightarrow j'f'$ в постоянном однородном магнитном поле и в присутствии замагниченной плазмы, где f и f' – начальный и конечный фермионы, находящиеся на произвольных уровнях Ландау, j и j' – обобщенные токи скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов. Показано, что в области резонанса амплитуды реакции $jf \rightarrow j'f'$ однозначно выражаются через амплитуды процессов $jf \rightarrow \tilde{f}$ и $\tilde{f} \rightarrow j'f'$, содержащих промежуточное состояние \tilde{f} .
2. Впервые вычислена нейтринная излучательная способность, обусловленная процессом $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ в холодной замагниченной плазме с учетом резонанса на виртуальном электроде, занимающем произвольный уровень Ландау n . Впервые получен коэффициент поглощения фотона в процессе резонансного рассеяния $\gamma e \rightarrow \gamma e$ в присутствии замагниченной плазмы, результат представлен в простой аналитической форме, удобной для дальнейшего использования при решении задачи переноса излучения. Показано, что использование δ -функциональной аппроксимации резонансных

пиков в области резонансов хорошо согласуется с соответствующими в литературе результатами, полученными громоздкими численными расчетами.

3. Найдены правила отбора по поляризациям для процесса расщепления фотона $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в холодной почти вырожденной плазме и в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония. Для разрешённых каналов расщепления фотона вычислены парциальные вероятности процесса с учётом влияния замагниченной холодной плазмы и позитрония в дисперсию и перенормировку волновых функций фотонов. Полученные результаты показывают, что вклады плазмы и позитрония, с одной стороны, существенным образом изменяют правила отбора по поляризациям по сравнению со случаем чистого магнитного поля. В частности, становится возможным новый канал расщепления $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$. С другой стороны, вероятность расщепления по каналам $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ оказалась подавлена по сравнению со случаем замагниченного вакуума.

Представленные результаты являются оригинальными и новыми.

Степень достоверности и апробация результатов.

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

1. Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» (г. Дубна, 2016)
2. XIV Конференция молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (г. Москва, 2017)
3. The XXIII International Workshop «High Energy Physics and Quantum Field Theory» (г. Ярославль, 2017)
4. XXth International Seminar on High Energy Physics «Quarks-2018» (г. Валдай, 2018)

Автор докладывал результаты исследований на научных семинарах Института ядерных исследований РАН и кафедры теоретической физики ЯрГУ им. П. Г. Демидова.

Публикации.

Всего по теме диссертации опубликовано 8 работ [1–8], из них 3 [1–3] – в рецензируемых журналах, 3 [4–6] – в сборниках трудов конференций и 2 [7–8] – не из списка ВАК. Список публикаций приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора.

1. Автором вычислены амплитуды обобщенного комптоноподобного процесса $jf \rightarrow j'f'$ в постоянном однородном магнитном поле в резонансном случае.
2. Автором вычислена нейтринная излучательная способность, обусловленная комптоноподобным процессом фоторождения нейтрино, $\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}$, в холодной замагниченной плазме с учетом резонанса на виртуальном электроде, занимающем произвольный уровень Ландау n .
3. Автором получены коэффициент поглощения фотона в процессе $\gamma e \rightarrow \gamma e$ при резонансе на виртуальном электроде в приближении δ -образного пика.
4. Автором определены правила отбора по поляризациям и вычислены вероятности процесса $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в разрешённых каналах в присутствии холодной почти вырожденной плазмы и в сильном магнитном поле с учётом влияния позитрония.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Объем диссертации – 131 страница. Список литературы включает 180 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведено исследование комптоноподобного процесса в постоянном однородном магнитном поле и в присутствии замагниченной плазмы, получены амплитуды переходов $jf \rightarrow j'f'$, 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 проводится обзор литературы по двухвершинным процессам в активной среде.

В разделе 1.2 приводится методика расчёта амплитуды процесса $jf \rightarrow j'f'$, основанная на использовании точных решений уравнения Дирака для начального и конечного фермионов во внешнем постоянном однородном магнитном поле, находящихся на произвольных уровнях Ландау, и пропагатора фермионов в виде суммы по уровням Ландау. Анализ полученной амплитуды позволяет выделить два возможных случая:

1) Если уровень Ландау, который занимает виртуальный фермион, меньше, чем уровни Ландау начального и конечного фермиона, реальная часть знаменателя пропагатора фермиона может обращаться в ноль, т.е. виртуальный фермион становится реальным с определённым законом дисперсии и имеет место резонанс на виртуальном фермионе

2) Если уровень Ландау, который занимает виртуальный фермион, больше или равен уровням Ландау начального и конечного фермиона, реальная часть знаменателя пропагатора фермиона в ноль не обращается, что говорит о невоз-

возможности реализации резонанса на виртуальном фермионе.

В **разделе 1.3** приведены амплитуды процесса $jf \rightarrow j'f'$ вне области резонанса. Выражения имеют явный Лоренц- и калибровочно-инвариантный вид. В **подразделе 1.3.1** получены выражения для амплитуд в предельном случае относительно сильного магнитного поля ($B \gtrsim B_e$), при котором начальный и конечный электрон занимают основной уровень Ландау, а виртуальный фермион может находиться на произвольном уровне Ландау. В **подразделе 1.3.2** проанализирован другой частный случай нерезонансного процесса $jf \rightarrow j'f'$ – когерентное рассеяние тока j на реальных фермионах, принадлежащих плазме, без изменения их состояния (т.н. «рассеяние вперёд»), и сделано обобщение результатов работы [18] на случай присутствия замагниченной плазмы.

В **разделе 1.4** получены амплитуды процесса $jf \rightarrow j'f'$ для случая резонанса на виртуальном фермионе. Показано, что при δ -функциональной аппроксимации резонансных пиков квадрат S -матричного элемента факторизуется квадратами S -матричных элементов подпроцессов $jf \rightarrow \tilde{f}$ и $\tilde{f} \rightarrow j'f'$, содержащих промежуточное состояние \tilde{f} , и приведены одновершинные амплитуды для данных подпроцессов для вершин скалярного, псевдоскалярного, векторного или аксиального типов.

В **разделе 1.5** обсуждаются возможные приложения результатов, полученных в данной главе. Результаты первой главы опубликованы в работах [1,2,8].

Во **второй главе** рассмотрены два двухвершинных процесса: фоторождения нейтрино на электроны, $e\gamma \rightarrow e\nu\bar{\nu}$, и комптоновское рассеяние, $\gamma e \rightarrow \gamma e$, протекающие в присутствии плотной замагниченной плазмы и в которых возможен резонанс на виртуальном электроны.

В **разделе 2.1** проведён обзор литературы по фотонейтринному процессу и комптоновскому рассеянию, обсуждается актуальность рассматриваемых задач.

В **разделе 2.2** результаты 1 главы данной диссертации были использованы для вычисления нейтринной излучательной способности, обусловленной

переходом $e\gamma \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ в случае резонанса. Было показано, что в данном случае нейтринная светимость фотонейтринного процесса $Q_{\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}}$ выразится через нейтринную светимость $Q_{e_n \rightarrow e_{\ell'}\nu\bar{\nu}}$, обусловленную процессом $e_n \rightarrow e_{\ell'}\nu\bar{\nu}$ [12]:

$$Q_{\gamma e \rightarrow e\nu\bar{\nu}} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\ell'=0}^{n-1} Q_{e_n \rightarrow e_{\ell'}\nu\bar{\nu}}, \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость светимости фотонейтринного процесса от $\rho_6 = \rho/(10^6 \text{ г/см}^3)$ (ρ – плотность плазмы) для значений параметров $B = 50B_e$ и $T = 10^9 \text{ К}$ с учётом резонанса (сплошная линия) и без учёта резонанса [19] (пунктирная линия). Как видно из графика, вследствие влияния резонансных эффектов результаты работы [19] являются заниженными при плотности $\rho \gtrsim 6 \times 10^8 \text{ г/см}^3$ при таких параметрах плазмы.

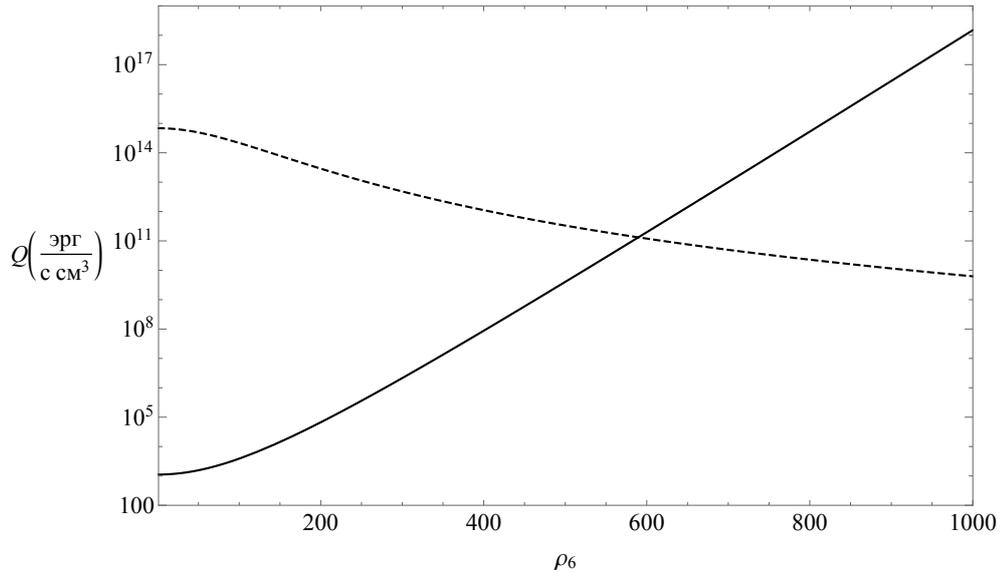


Рис. 1. Зависимость светимости фотонейтринного процесса от плотности плазмы для значений параметров $B = 50B_e$ и $T = 10^9 \text{ К}$. Сплошная линия соответствует светимости резонансного процесса, пунктирная – без учёта резонанса.

В разделе 2.3 на основе амплитуд, полученных в 1 главе, рассчитан коэффициент поглощения фотона в процессе $\gamma^{(\lambda)}e \rightarrow \gamma^{(\lambda')}e$, где $\lambda, \lambda' = 1, 2$ – мода фотона, в случае резонанса на виртуальном электроне. Выражение для коэффициента поглощения может быть представлено следующим образом в простой аналитической форме, удобной для дальнейшего использования при решении

задачи о переносе излучения:

$$W_{\gamma^{(1)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{\alpha\beta}{2\omega} \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{n=n_0}^{\infty} \sum_{\epsilon=\pm 1} \frac{f_e(E_\ell^\epsilon)[1 - f_e(E_\ell^\epsilon + \omega)]}{\sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2}} \times \quad (4)$$

$$\times \left\{ [2\beta(n + \ell) - q_\parallel^2](\mathcal{I}_{n,\ell-1}^2 + \mathcal{I}_{n-1,\ell}^2) - 8\beta\sqrt{\ell n}\mathcal{I}_{n,\ell-1}\mathcal{I}_{n-1,\ell} \right\},$$

$$W_{\gamma^{(2)}e \rightarrow \gamma e} = \frac{\alpha\beta}{2\omega} \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{n=n_0}^{\infty} \sum_{\epsilon=\pm 1} \frac{f_e(E_\ell^\epsilon)[1 - f_e(E_\ell^\epsilon + \omega)]}{\sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2}} \times \quad (5)$$

$$\times \left\{ \left[\frac{(2\beta(n - \ell))^2}{q_\parallel^2} - 2\beta(n + \ell) - 4m^2 \right] (\mathcal{I}_{n,\ell}^2 + \mathcal{I}_{n-1,\ell-1}^2) - 8\beta\sqrt{\ell n}\mathcal{I}_{n,\ell}\mathcal{I}_{n-1,\ell-1} \right\},$$

$$E_\ell^\epsilon = \frac{1}{2q_\parallel^2} \left[\omega (M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2) + \epsilon k_z \sqrt{(M_n^2 - M_\ell^2 - q_\parallel^2)^2 - 4q_\parallel^2 M_\ell^2} \right],$$

$$\mathcal{I}_{n,\ell} \equiv \mathcal{I}_{n,\ell} (q_\perp^2 / (2\beta)),$$

$$\mathcal{I}_{n,\ell}(x) = \sqrt{\frac{\ell!}{n!}} e^{-x/2} x^{(n-\ell)/2} L_\ell^{n-\ell}(x),$$

$$n_0 = \ell + \left\lfloor \frac{q_\parallel^2 + 2M_\ell\sqrt{q_\parallel^2}}{2\beta} \right\rfloor,$$

где $L_n^k(x)$ – обобщенные полиномы Лагерра, $\beta = B/B_e$, $M_\ell = \sqrt{m^2 + 2\beta\ell}$, $f_e(E_\ell) = [1 + \exp(E_\ell - \mu)/T]^{-1}$ – равновесная функция распределения, μ – химический потенциал плазмы, $[x]$ – целая часть числа x .

Кроме того, было оказано, что использование δ -функциональной аппроксимации резонансных пиков в области резонансов хорошо согласуется с результатами работы [11], полученными громоздкими численными расчётами.

Результаты второй главы опубликованы в работах [3,4,7].

В третьей главе проведён анализ процесса расщепления фотона на два фотона, $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, в присутствии зарядово несимметричной плотной замагниченной плазмы и в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония, включая анализ влияния связанных состояний и плазмы на дисперсионные свойства фонов.

Во введении к третьей главе проведён обзор литературы по процессу расщепления фотона и дисперсии фотона в активной среде, обсуждается актуальность рассматриваемой задачи.

В **разделе 3.2** рассмотрены поляризационные состояния фотона в присутствии зарядово несимметричной плотной плазмы, получен закон дисперсии, который существенно отличается от вакуумного. Показано существование кинематической области, в которой квадрат четырёхмерного импульса фотона положителен. В ней становится возможным новый канал расщепления $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$, который закрыт в магнитном поле в отсутствие плазмы. В то же время каналы $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$, разрешённые в магнитном поле, в этой области кинематически закрыты. Также отмечено, что в непосредственной близости от порога рождения пар собственное значение поляризационного оператора фотона моды 2 становится большим, что указывает на необходимость учёта перенормировки волновой функции фотона.

В **разделе 3.3** на основе закона дисперсии для фотона в сильном магнитном поле с учётом влияния позитрония проведён анализ правил отбора по поляризациям для процесса расщепления фотона. Аналогично для случая зарядово несимметричной плотной плазмы, показано существование области, в которой открывается новый канал $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$, а открытые в магнитном поле без учёта вклада позитрония каналы $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ и $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ закрыты.

В **разделе 3.4** вычислена вероятность процесса поглощения фотона в присутствии зарядово несимметричной плотной плазмы. В предельном случае холодной плотной плазмы основным будет канал $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$. На рис. 2 коэффициент поглощения фотона для канала $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ представлен как функция энергии начального фотона для случая, когда фотон распространяется поперек направления магнитного поля для значений химического потенциала 1 МэВ и 0.75 МэВ.

В **разделе 3.5** получены парциальные вероятности процесса поглощения фотона в сильном магнитном поле с учётом вклада позитрония для разрешён-

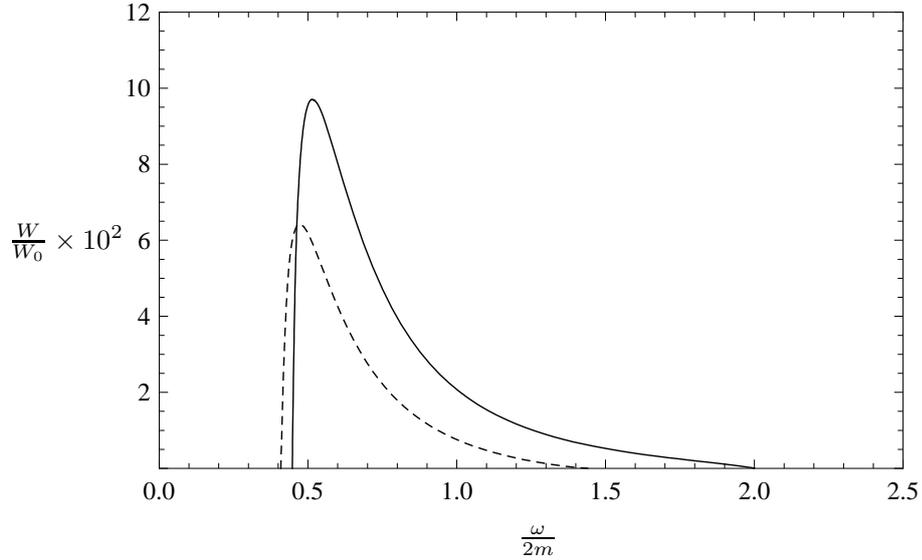


Рис. 2. Вероятность расщепления фотона по каналу $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ в сильном магнитном поле ($B/B_e = 200$) и холодной ($T = 50$ кэВ) плазме при химическом потенциале 1 МэВ (сплошная линия) и 0.75 МэВ (штриховая линия). Здесь $\theta = \pi/2$, $W_0 \simeq 3.25 \cdot 10^2 \text{см}^{-1}$

ных каналов. Они представлены как функции энергии начального фотона при $B = 200B_e$ на рис. 3 - 5.

Для расщепления фотона по каналу $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ было получено аналитическое выражение коэффициента поглощения фотона:

$$W_{2 \rightarrow 11} = \frac{\alpha^3}{8\pi^2} Z_2 H^2 \left(\frac{q_{\parallel}^2}{4m^2} \right) \frac{q_{\perp}^2}{\omega} \mathcal{F} \left(\sqrt{\frac{q_{\parallel}^2}{q_{\perp}^2}} \right) \Theta(q^2), \quad (6)$$

$$\mathcal{F}(z) = 2 \ln z - 1 + z^{-2},$$

$$H(z) = \frac{1}{\sqrt{z(1-z)}} \arctg \sqrt{\frac{z}{1-z}} - 1.$$

В заключении третьей главы проводится анализ полученных результатов. В частности, отмечается, что, как видно из рис. 3 и рис. 4, вероятность процесса расщепления фотона в сильном магнитном поле с учётом влияния позитрония в этих каналах оказалась меньше, чем без учёта влияния позитрония. Это связано с тем, что в кинематической области $q^2 > 0$ эти каналы закрыты.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [5,6].

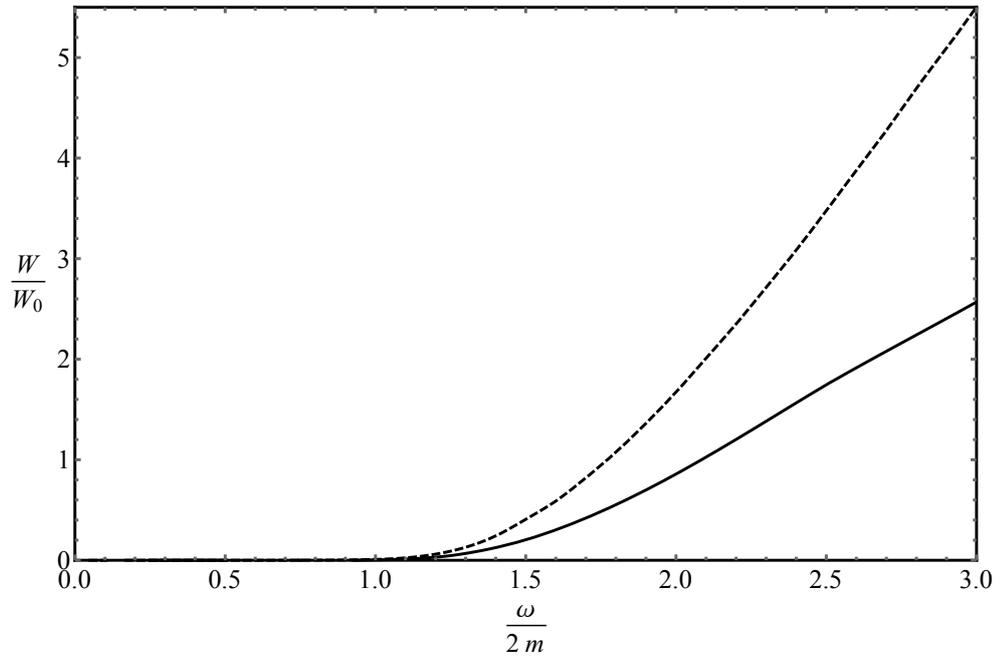


Рис. 3. Коэффициент поглощения фотона в канале $\gamma_1 \rightarrow \gamma_1\gamma_2$ в сильном магнитном поле ($B/B_e = 200$). Пунктирная линия соответствует вероятности реакции в замагниченном вакууме без учёта вклада позитрония [20]. Здесь $W_0 = 3.25 \cdot 10^2 \text{см}^{-1}$.

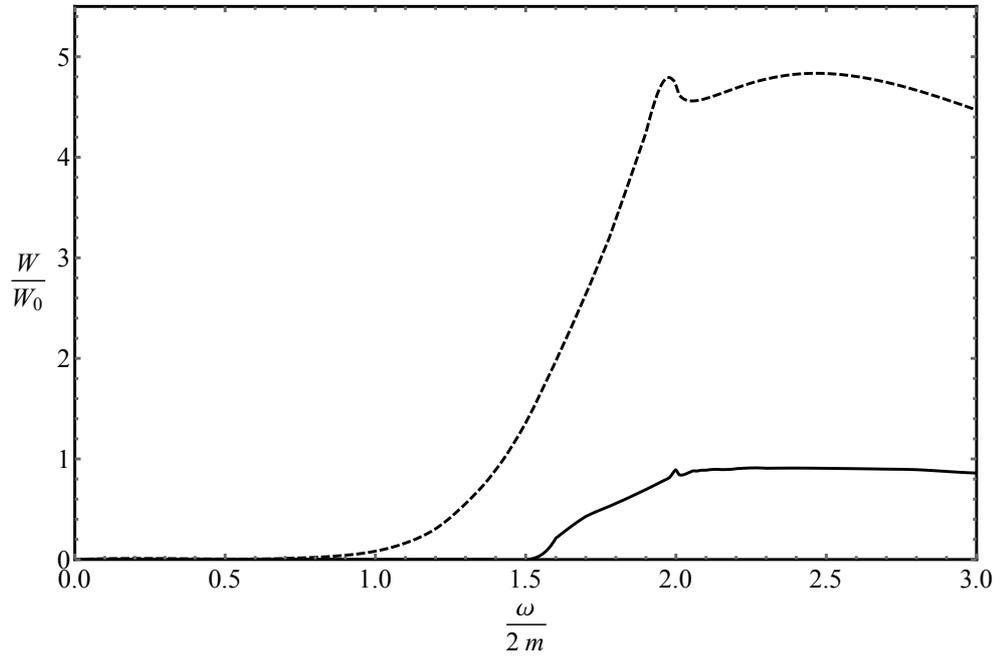


Рис. 4. Коэффициент поглощения фотона в канале $\gamma_1 \rightarrow \gamma_2\gamma_2$ в сильном магнитном поле ($B/B_e = 200$). Пунктирная линия соответствует вероятности реакции в замагниченном вакууме без учёта вклада позитрония [20]. Здесь $W_0 = 3.25 \cdot 10^2 \text{см}^{-1}$.

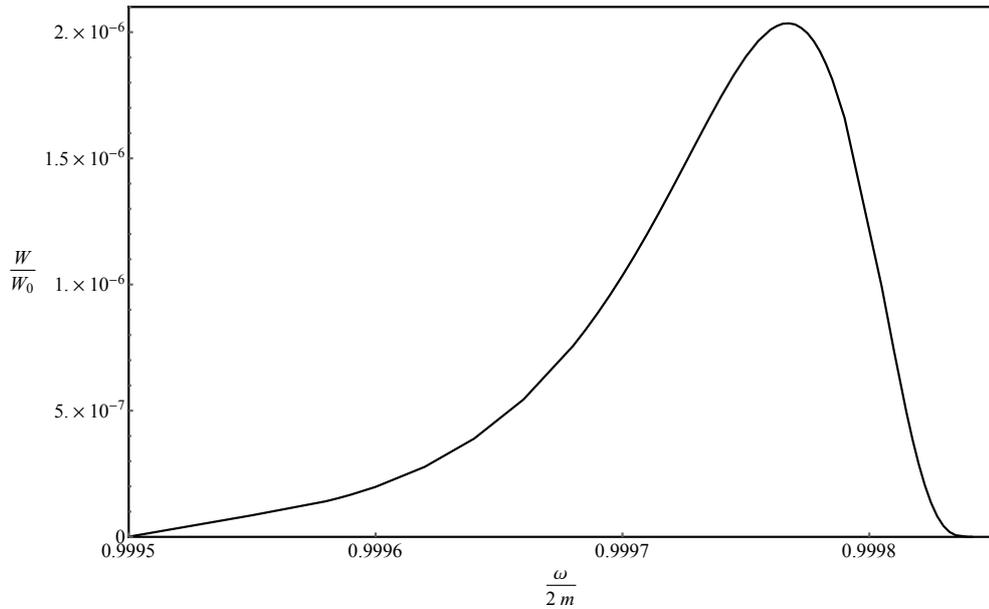


Рис. 5. Коэффициент поглощения фотона в канале $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$ в сильном магнитном поле ($B/B_e = 200$). $W_0 = 3.25 \cdot 10^2 \text{см}^{-1}$.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации

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

В Приложении Б приводится вычисление амплитуды процесса $\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ в сильно замагниченной плазме.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. Kuznetsov A. V., Rumyantsev D. A., Shlenev D. M. Generalized two-point tree-level amplitude $jf \rightarrow j'f'$ in a magnetized medium // Int. J. Mod. Phys. 2015. Vol. A30, no. 11. P. 1550049.
2. Кузнецов А. В., Румянцев Д. А., Шленев Д. М. Обобщённая древесная амплитуда рассеяния в замагниченной среде // Физ. элемент. част. и атом. яд. 2017. Т. 48, № 6. С. 980–983.
3. Румянцев Д. А., Шленев Д. М., Ярков А. А. Резонансы в комптонопо-

добных процессах рассеяния во внешней замагниченной среде // Журн. эксперим. и теор. физ. 2017. Т. 152, № 3. С. 483–494.

4. Kuznetsov A., Rumyantsev D., Shlenev D. Neutrino photoproduction on the electron in dense magnetized medium // EPJ Web Conf. 2017. Vol. 158. P. 05008.
5. Chistyakov M. V., Rumyantsev D. A., Shlenev D. M. Photon splitting in a strongly magnetized, charge-asymmetric plasma // EPJ Web Conf. 2016. Vol. 125. P. 04017 (1–11).
6. Anikin R. A., Chistyakov M. V., Rumyantsev D. A., Shlenev D. M. Photon splitting in strongly magnetized medium with taking into account positronium influence // EPJ Web Conf. 2018. Vol. 191. P. 08011.
7. Chistyakov M. V., Shlenev D. M., Rumyantsev D. A. et al. 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.
8. Кузнецов А. В., Румянцев Д. А., Шленев Д. М. 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.

Цитированная литература

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. С. Взрыв вращающейся звезды как механизм сверхновой // Астрон. журн. 1970. Т. 47. С. 813–816.

3. Бисноватый-Коган Г. С. Физические вопросы теории звездной эволюции. М: 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. Румянцев Д. А., Чистяков М. В. Влияние фотон-нейтринных процессов на остывание магнитара // *Журн. эксперим. и теор. физ.* 2008. Т. 134, № 4. С. 627–636.
10. 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.
11. 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.
12. Yakovlev D. G., Kaminker A. D., Gnedin O. Y., Haensel P. Neutrino emission from neutron stars // *Phys. Rep.* 2001. Vol. 354. P. 1–155.
13. Пинаев В. С. Некоторые процессы рождения нейтринных пар в звездах // *Журн. эксперим. и теор. физ.* 1964. Т. 45, № 2. С. 548–554.

14. Борисов А. В., Жуковский В. Ч., Эминов П. А. Испускание нейтринных пар электроном в сверхсильном магнитном поле // Известия ВУЗов. Физика. 1978. № 3. С. 110–114.
15. Yakovlev D. G., Tschaeppe R. Synchrotron neutrino pair radiation in neutron stars // Astronomische Nachrichten. 1981. Vol. 302. P. 167–176.
16. Yakovlev D. G., Tschaeppe R. Erratum - Synchrotron neutrino-pair radiation in neutron stars // Astronomische Nachrichten. 1982. Vol. 303. P. 218.
17. Chistyakov M. V., Romyantsev D. A., Stus' N. S. Photon splitting and Compton scattering in strongly magnetized hot plasma // Phys. Rev. 2012. Vol. D86. P. 043007.
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. Михеев Н. В., Румянцев Д. А., Чистяков М. В. Фоторождение нейтрино на электроне в плотной замагниченной среде // Журн. эксперим. и теор. физ. 2014. Т. 146, №4. С. 289-296.
20. Chistyakov M. V., Kuznetsov A. V., Mikheev N. V. Photon splitting above the pair creation threshold in a strong magnetic field // Phys.Lett. B. 1998. Vol. 434. P. 67–73.