

На правах рукописи

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород).

Гарасев Михаил Алексеевич

**РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ
В СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ
КОМПАКТНЫХ ЗВЁЗД**

01.04.08 — физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2011

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Вл. В. Кочаровский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор К. А. Постнов

доктор физико-математических наук,
профессор М. Д. Токман

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт имени
А. Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург)


Защита состоится 7 ноября 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан

2011 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

 Ю.В. Чугунов

Общая характеристика диссертации

Предмет исследования и актуальность темы.

Интерес к изучению переноса гирорезонансного излучения в плазме с сильным магнитным полем возник в связи с обнаружением циклотронных линий в спектрах нейтронных звёзд и магнитных белых карликов [1–3]. Для правильной интерпретации такого рода наблюдений необходим детальный анализ основных физических процессов, влияющих на формирование циклотронных линий. Распространение циклотронного излучения в атмосферах нейтронных звёзд и белых карликов исследовалось во многих работах, но в последнее десятилетие данная задача стала особенно актуальной в связи с появлением нового поколения орбитальных телескопов, впервые позволивших детально исследовать тепловые спектры излучения компактных звёзд.

Одной из особенностей задачи о переносе излучения в атмосферах компактных звёзд является наличие у таких объектов настолько сильных магнитных полей, что необходим учёт эффектов квантовой электродинамики. Так, известно, что вакуум в присутствии магнитного поля подобен двулучепреломляющей среде [4]. Этот эффект, называемый поляризацией или намагничиванием вакуума, может существенно влиять на распространение излучения в магнитоактивной плазме, особенно когда вклады плазмы и поляризации вакуума в дисперсию электромагнитных волн сопоставимы [5]. Для интерпретации наблюдений атмосферного излучения нейтронных звёзд и магнитных белых карликов необходимо принимать во внимание влияние эффекта намагничивания вакуума на распространение, генерацию, поглощение и рассеяние электромагнитных волн в магнитоактивной плазме. В частности, благодаря влиянию этого эффекта показатели преломления и коэффициенты поглощения нормальных волн сильно изменяются [6]. При этом может возникать так называемый вакуумный резонанс и, соответственно, сильное линейное взаимодействие нормальных волн [7].

Другой важный эффект, который необходимо учитывать при расчёте переноса циклотронного излучения, — это перераспределение фотонов по частоте в результате последовательных рассеяний. Эффекты перераспределения играют основную роль в переносе излучения в резонансных линиях, приводя к выходу фотонов из резонанса. Обычно, для атомных линий, главным механизмом, приводящим к выходу фотонов из ядра линии в её крылья, является эффект Доплера [8]. Вместе с тем, благодаря фактически одномерному движению электронов в сильно замагниченной плазме, перераспределение по частотам циклотронного излучения существенно отличается от перераспределения при трёхмерном движении рас-

сеивателей. Так, известно, что, в случае использования нерелятивистского условия циклотронного резонанса, перераспределения излучения из ядра линии в её крылья происходить не будет [9]. Реальное перераспределение излучения по циклотронной линии оказывается связано с другими эффектами, такими как релятивистский эффект Доплера, естественное уширение резонанса и эффект отдачи, которые до сих пор детально исследованы не были. (Здесь и ниже слово релятивистский по отношению к эффекту Доплера указывает на необходимость учёта по крайней мере членов порядка v^2/c^2 , где v — скорость электрона и c — скорость света в вакууме.)

Отдельного внимания заслуживает вопрос о расчёте силы давления гирорезонансного излучения. Ещё 30 лет назад было отмечено [10], что сечение рассеяния вблизи первой гармоники гирочастоты на много порядков превышает томсоновское, вследствие чего сила давления излучения в циклотронной линии может приводить к возникновению звёздного ветра, подобного тому, что образуется из-за давления излучения в резонансных линиях ионов в атмосферах звёзд ранних спектральных классов. При этом, как было показано в [11], скорость возникающих плазменных течений может достигать релятивистских значений. Для определения свойств такого ветра необходим детальный анализ переноса излучения, который требует учёта эффектов намагничивания вакуума и перераспределения излучения по частоте. При этом вследствие сложности задачи аналитическое исследование возможно только на качественном уровне и в существенной мере должно быть дополнено численными расчётами уравнений переноса излучения.

Несомненно, наблюдение излучения атмосфер нейтронных звёзд может предоставить ценную информацию об их физических параметрах. В частности, анализ интегрального профиля импульса в рентгеновском диапазоне длин волн позволяет наложить ограничения на возможное значение радиуса нейтронных звёзд [12]. Наблюдение спектральных особенностей позволяет сделать некоторые выводы о составе атмосфер, распределении температуры и магнитного поля по поверхности звёзд [13].

В последнее десятилетие, благодаря появлению рентгеновских телескопов с высоким временным разрешением, стало возможным наблюдать не только интегральный спектр излучения нейтронных звёзд, но и динамический, разрешенный по фазе вращения. Для анализа таких наблюдений необходимо теоретически исследовать те особенности, которые возникают в динамическом спектре в условиях существования резонансных линий (атомных и циклотронных). Учитывая неоднородность магнитного поля и температуры на поверхности, можно построить детализированные

модели спектров нейтронных звезд. Результат при этом сильно зависит от конкретного вида этих неоднородностей, которые априори неизвестны. Тем не менее, сравнение модельных спектров с наблюдениями предоставляет эффективный инструмент для анализа характеристик нейтронных звезд и структуры их атмосфер.

Целью настоящей диссертационной работы является решение следующих задач, относящихся к проблеме распространения гирорезонансного излучения в атмосферах компактных звезд.

- Исследование особенностей перераспределения циклотронного излучения по частоте из-за релятивистского эффекта Доплера и из-за естественного уширения резонансной линии.
- Исследование дисперсионных характеристик гирорезонансного излучения в магнитоактивной плазме с параметрами, характерными для атмосфер нейтронных звезд и магнитных белых карликов. Решение уравнений переноса излучения в атмосферах компактных звезд. Определение темпа потери массы за счёт давления циклотронного излучения.
- Моделирование спектров излучения вращающихся нейтронных звезд с атомными и циклотронными линиями для различных распределений температуры по поверхности звезды с учётом эффектов общей и специальной теорий относительности.

Научная новизна.

1. Доказано, что одним из основных эффектов, обуславливающих выход фотонов из циклотронного резонанса, является релятивистский эффект Доплера.
2. Показано, что конечная естественная ширина циклотронного резонанса может оказывать решающее влияние на выход фотонов из циклотронного резонанса тогда, когда линия располагается в виновском хвосте теплового спектра или когда оптическая глубина области формирования спектральных особенностей достаточно велика.
3. Установлено, что при больших оптических глубинах вероятность выхода гирорезонансных фотонов из полубесконечной атмосферы с малым поглощением падает по степенному (а не экспоненциальному) закону на достаточно большом интервале в несколько порядков величины (оптических глубин), что приводит к сравнимому вкладу гирофотонов со всего указанного интервала в выходящее циклотронное излучение и к расширению области атмосферы, информация о которой содержится в его спектре.

4. Для широкой области параметров атмосфер компактных звезд разработана оригинальная программа численного решения уравнений переноса излучения в линии электронного гирорезонанса с учётом выхода из неё фотонов, поляризации вакуума и линейного взаимодействия нормальных волн.
5. Дана оценка темпа потери массы вследствие давления гирорезонансного излучения для одиночных магнитных белых карликов и нейтронных звезд. Показано, что при определенных условиях увеличение коэффициента затухания обыкновенной волны в верхних слоях атмосферы, вызванное намагничиванием вакуума, приводит к существенному возрастанию силы давления циклотронного излучения, особенно значительному в том случае, когда эти слои являются оптически тонкими.

Научная и практическая ценность. Полученные результаты представляют интерес для изучения процессов формирования циклотронных линий в атмосферах нейтронных звезд и магнитных белых карликов. Они могут быть использованы для объяснения наблюдаемых спектров этих объектов, определения параметров их атмосфер и оценки темпа потери массы вследствие возникновения циклотронного ветра.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Явление частотного перераспределения, связанное с релятивистским эффектом Доплера и естественным уширением циклотронной линии, приводит к качественному изменению параметров диффузии гирофотонов и существенной модификации спектра выходящего гирорезонансного излучения в рассеивающих атмосферах магнитных белых карликов и нейтронных звезд.
2. Вероятность выхода гирофотонов из полубесконечной рассеивающей атмосферы с малым поглощением падает по степенному закону на достаточно продолжительном интервале больших оптических глубин, тем самым обеспечивая сравнимый вклад гирофотонов со всего указанного интервала в формирование циклотронных особенностей теплового излучения компактных звезд.
3. Согласно численному решению уравнений переноса гирорезонансного излучения, возникновение ветра в атмосферах компактных звезд под действием теплового циклотронного излучения возможно для широкой области параметров магнитоактивной плазмы, отвечающей ряду реально наблюдаемых астрономических объектов, для которых оценённый темп потери массы позволяет ожидать значительную перестройку их атмосфер.

4. Совместное действие геометрических факторов и эффектов доплеровского сдвига частоты, абберации, искривления лучей света и гравитационного красного смещения фотонов в областях атомных и циклотронных спектральных линий излучения вращающейся нейтронной звезды с неоднородно нагретой поверхностью в определённых условиях приводит к появлению ряда существенных особенностей в частотном профиле фурье-гармоник динамического спектра излучения, связанных с вращением звезды.

Апробация работы. По теме диссертации опубликованы 5 статей в ведущих научных журналах, входящих в список ВАК, 4 доклада в трудах отечественных и международных конференций, 8 тезисов докладов. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института прикладной физики РАН, российских и международных конференциях: научная конференция по радиофизике ННГУ (Нижний Новгород, 2005, 2006, 2007), X-ая Конференция молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы» БШФФ-2007 (Иркутск, 2007), Пятнадцатая межрегиональная научно-техническая конференция «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения» (Нижний Новгород, 2007), научная школа по нелинейным волнам (Нижний Новгород, 2008, 2010), российская конференция «Физика нейтронных звёзд — 2008» (Санкт-Петербург), всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (Москва, 2007, 2008, 2009), международная конференция «Frontiers of Nonlinear Physics — 2010» (Нижний Новгород — Санкт-Петербург, 2010).

Результаты представленных исследований использовались в грантах Российского Фонда Фундаментальных Исследований (08-02-00163-а, 11-02-00364-а), гранте Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских учёных и ведущих научных школ Российской Федерации (НШ — 4588.2006.2), программах Президиума РАН «Происхождение и эволюция звёзд и галактик» и в гранте федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, госконтракт 02.740.11.0246.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, трёх глав, Заключение и списка литературы, включающего и работы автора. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включая 28 рисунков. Список литературы содержит 117 наименований.

Краткое содержание работы

Во **Введении** определены предмет исследования и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность тематики, а также приведены данные по публикациям включенных в диссертацию материалов.

В **первой главе** анализируются (в том числе с помощью метода Монте-Карло) эффекты перераспределения гирорезонансного излучения по частоте и связанный с ними выход фотонов из циклотронной линии благодаря многократному рассеянию на замагниченных электронах, движущихся с тепловыми скоростями вдоль силовых линий магнитного поля. Последовательный учёт этих эффектов проводится впервые (хотя указания на данную проблему в литературе имеются; см., например, [9]). Он существенно усложняет решение уравнений переноса излучения. Ранее детально рассматривался [14] только выход из резонанса, связанный с изменением частоты фотонов вследствие эффекта отдачи при рассеянии. Этот процесс становится достаточно эффективным лишь в случае довольно сильных магнитных полей, таких, в которых средняя энергия гирорезонансных фотонов намного превосходит характерную тепловую энергию электронов. Приведённые в главе численные расчёты показывают важность других эффектов выхода циклотронного излучения из резонанса, которые существенны и при меньших значениях магнитного поля в атмосфере. Особое внимание при этом уделяется перераспределению фотонов по частоте, вызываемому действием релятивистского эффекта Доплера.

В разделе 1.1 обсуждается постановка задачи и схема метода Монте-Карло, а в разделе 1.2 анализируются основные механизмы перераспределения циклотронного излучения по частоте. Как оказывается, механизмы перераспределения циклотронного излучения по частоте существенно отличаются от хорошо изученных механизмов перераспределения, типичных для атомных и ионных спектральных линий, в основном из-за одномерного характера движения электронов в сильном магнитном поле. Основным эффектом, обуславливающим выход фотонов из циклотронного резонанса, является релятивистский эффект Доплера, который начинает модифицировать спектр уже после нескольких сотен рассеяний, даже в плазме с нерелятивистской температурой T порядка 1 эВ. Он отвечает за существование двух резонансных значений скоростей электронов, наличие которых приводит к тому, что фотон может претерпевать значительные скачкообразные изменения в коэффициенте поглощения в результате резонансного рассеяния на быстрых электронах, скорость которых лежит на краях максвелловского распределения. Такие скачкообразные изменения (перескоки) в рассеянии происходят тогда, когда фотон распростра-

няется почти поперёк магнитного поля в плазме.

Роль конечной естественной ширины циклотронной линии γ оказывается незначительной в том случае, когда энергия гирофотонов меньше или сравнима с типичной тепловой энергией электронов, однако может оказаться решающей для выхода фотонов из линии (а следовательно, фактически и из атмосферы) в случае, если циклотронная линия располагается в виновском хвосте теплового спектра, или в случае, если оптическая глубина области формирования циклотронных особенностей τ достаточно велика.

Например, рассмотрим полубесконечную атмосферу с экспоненциальным распределением концентрации, в котором рассеяние значительно преобладает над поглощением. Вероятность поглощения в одном акте рассеяния почти линейно растёт с глубиной

$$P_{\text{abs}} = \frac{\varepsilon_0 \tau}{1 + \varepsilon_0 \tau}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 \tau$ — отношение вероятности поглощения к вероятности рассеяния для фотонов в центре линии, при этом выполняется соотношение $\varepsilon_0 \ll 1$. Используя моделирование методом Монте-Карло, можно вычислить вероятность выхода фотонов P_{esc} , изначально испущенных на оптической глубине τ .

При малых оптических глубинах, где вероятность поглощения мала, вероятность выхода близка к единице. Таким образом, практически все резонансные фотоны, независимо от того, успели они перераспределиться из центра линии или нет, покидают атмосферу. Начиная с оптических глубин порядка $\tau_1 \sim \varepsilon_0^{-1/3}$ (что соответствует глубине термализации излу-

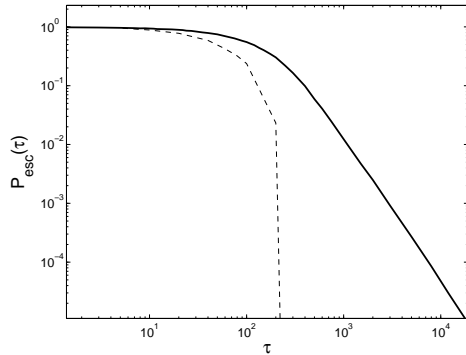


Рис. 1. Вероятность выхода фотонов из полубесконечной атмосферы с малым поглощением. Сплошная линия — вероятность выхода с учетом как релятивистского перераспределения по частоте, так и перераспределения, вызванного конечной естественной шириной резонансной линии, штриховая — без их учета. Параметры: $T = 50$ эВ, $\gamma/\omega_B = 10^{-6}$, $\varepsilon_0 = 10^{-6}$, где ω_B — гирочастота электронов.

чения в пределе квазикогерентного рассеяния) фотоны, которые не успевают перераспределиться из центра линии в край, поглощаются. Те же фотоны, которые успевают перераспределиться, имеют достаточно большую вероятность выйти из атмосферы. Если перераспределение в линии вызвано релятивистскими эффектами, то вероятность уйти из области частот, для которых оптическая глубина равна τ , в область частот, где оптическая глубина меньше или порядка τ_* , равна

$$P(\tau \rightarrow \tau_*) \approx \frac{\beta_T \tau_*}{\sqrt{8 \ln(\tau/\tau_*)} \tau}, \quad (2)$$

где $\beta_T = \sqrt{T/(mc^2)}$ — характерная тепловая скорость электронов в плазме, m — масса электрона. Величина же τ_* выбирается такой, чтобы фотон либо уходил из атмосферы диффузионным образом быстрее, чем возвращался бы в центр линии за счёт обратного перераспределения по частотам, либо быстрее, чем он поглотился бы. Первый процесс преобладает, когда $\beta_T > \varepsilon_0 \tau$, второй — когда выполнено обратное условие. Таким образом,

$$\tau_* \approx \begin{cases} 1/\sqrt{\beta_T}, & \tau < \tau_2 = \beta_T/\varepsilon_0, \\ 1/\sqrt{\varepsilon_0 \tau}, & \tau > \tau_2. \end{cases} \quad (3)$$

При этом, если коэффициент излучения линейно растёт с оптической глубиной (что выполняется для атмосферы с экспоненциальным профилем концентрации), то количество фотонов, выходящих с оптической глубины τ (которое пропорционально $\tau P_{\text{esc}}(\tau)$), будет уменьшаться всего лишь как τ^{-1} . Это приводит к тому, что все эти глубокие слои вносят сопоставимый вклад в выходящее излучение на частотах вблизи гирорезонансной линии. При очень больших оптических толщинах, когда $\tau > \tau_3 \approx 1/\varepsilon_0$, средняя длина свободного пробега определяется поглощением, а не рассеянием. В таком случае фотоны имеют экспоненциально малую вероятность выйти из атмосферы. В целом можно сделать вывод, что для адекватного анализа переноса излучения необходимо при расчётах учитывать все оптические толщины вплоть до весьма большого значения τ_3 .

В общем случае можно выделить четыре области оптических глубин с различной динамикой выхода фотонов из атмосферы. В области $\tau < \tau_1$ практически все генерируемые фотоны покидают атмосферу, в области $\tau_1 < \tau < \tau_2$ вероятность поглощения примерно описывается степенным законом с показателем степени 2, а в области $\tau_2 < \tau < \tau_3$ показатель степени приближается к 2.5. Наконец, из области с $\tau > \tau_3$ фотоны выходят с вероятностью, которая экспоненциально уменьшается с ростом τ .

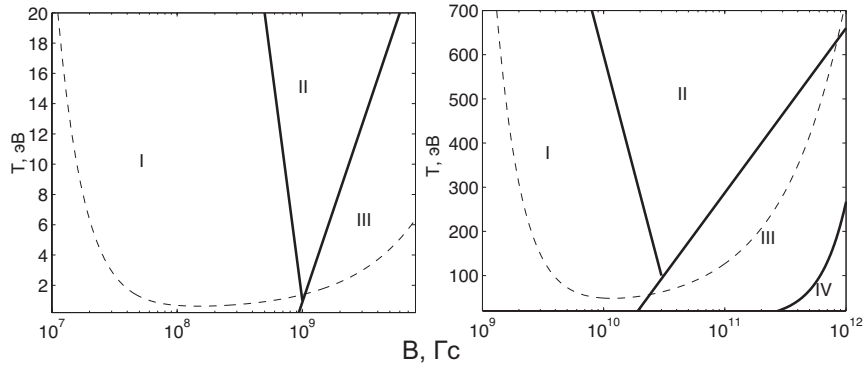


Рис. 2. Схематическое изображение областей доминирования различных механизмов выхода из полубесконечной атмосферы на плоскости параметров магнитное поле — температура плазмы. I — диффузионный выход, II — релятивистские перескоки, III — естественное уширение линии, IV — эффект отдачи. Область, где возможно возникновение циклотронного ветра располагается над штриховой кривой. Левый рисунок соответствует белым карликам массы $M_{WD} = 1 M_{\odot}$, правый — нейтронным звёздам массы $M_{NS} = 1.4 M_{\odot}$ и радиуса $R = 12$ км.

Указанные особенности диффузии гирорезонансных фотонов в полубесконечной атмосфере подробно анализируются в разделах 1.3 и 1.4. Статистически, перераспределение фотонов по частоте в циклотронной линии приводит к значительному увеличению (на порядки) вероятности выхода фотонов с больших оптических глубин (см. Рис. 1). Как показывает моделирование с учётом эффектов перераспределения фотонов по частоте, выходящее излучение собирается с большого интервала оптических глубин, различающихся в десятки, сотни и более раз. Это делает формирование циклотронных особенностей в значительной мере не локальным, так что в них содержится информация о структуре и параметрах довольно глубоких слоёв атмосферы компактных звёзд.

Основываясь на результатах моделирования методом Монте-Карло, мы можем разбить плоскость параметров магнитное поле — температура плазмы на области, где тот или иной механизм выхода доминирует над остальными (Рис. 2). Этот рисунок соответствует такой оптической глубине, где вероятность выхода фотонов равна вероятности поглощения. Из-за того, что большая часть выходящего излучения может происходить с гораздо больших оптических глубин, эффекты перераспределения по частоте могут оказаться важными и при более мягких условиях.

Всего можно выделить четыре разных области с разным механизмом выхода гирорезонансных фотонов из полубесконечной атмосферы. В зоне I диффузия фотонов в пространстве, даже без значительных изменений в длине свободного пробега, позволяет излучению покинуть атмосферу. В этом случае можно пренебречь выходом фотонов из резонанса, как за счет релятивистских перескоков, так и за счет конечной ширины резонансной линии. Иначе говоря, в этом случае оправдано использование квазикогерентного приближения. В зоне II основная часть излучения покидает атмосферу в результате перераспределения из-за релятивистских перескоков, а в зоне III — за счет рассеяния в лоренцевских крыльях циклотронной линии. В зоне IV становится важным эффект отдачи.

Вторая глава посвящена решению уравнений переноса излучения в атмосферах компактных звёзд, причём проводится по возможности наиболее полный учёт эффектов перераспределения излучения по частоте и намагничивания вакуума. Главной целью было исследование распространения излучения в области параметров $\hbar\omega_B \sim T$, где возможно формирование циклотронного ветра.

В первом разделе рассматриваются дисперсионные свойства разреженной слаборелятивистской замагниченной плазмы с учётом эффектов намагничивания вакуума. В частности, получен тензор диэлектрической проницаемости указанной плазмы и рассмотрены некоторые особенности коэффициентов поглощения и поляризации нормальных волн в такой среде. Для примера на Рис. 3 показана частотная зависимость коэффициентов поглощения нормальных волн в сравнении с нерелятивистским пределом, изученным в [15]. Форма резонансной кривой сильно искажена и имеет особенность ширины $\sqrt{\gamma} \ll \beta_T$, привязанную к частоте отсечки в условии резонанса. Вблизи этой точки количество резонансных электронов, приходящихся на интервал частот, стремится к бесконечности, если мы пренебрегаем естественной шириной резонансной линии. Кроме того, асимметрия в показателях поглощения становится более явной — более крутое падение наблюдается на частотах выше резонансной, чем ниже.

В следующем разделе дан вывод выражений для диаграмм направленности рассеяния произвольно поляризованных волн отдельным электроном. Далее рассмотрены уравнения переноса излучения в системе «магнитоактивная плазма + намагниченный вакуум» и их особенности, приводится краткое описание численной схемы решения уравнений переноса. Затем следует обсуждение полученных решений. В частности, рассмотрены диаграммы направленности и спектр выходящего излучения в области частот вблизи линии электронного циклотронного резонанса. Рассчитывается сила давления гирорезонансного излучения и определяется

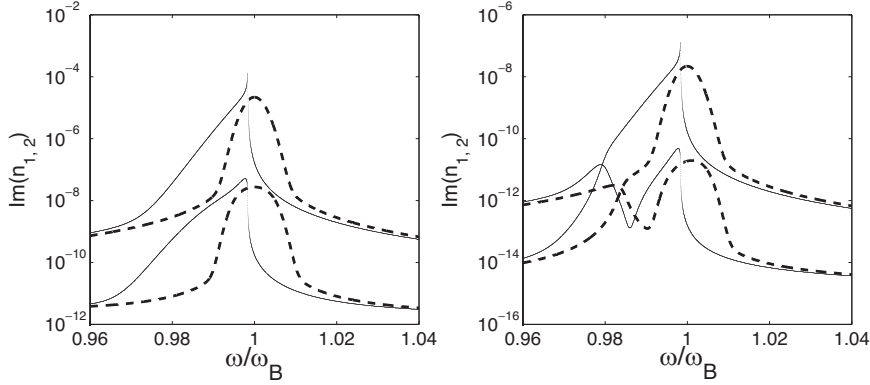


Рис. 3. Зависимость коэффициентов поглощения $\text{Im}n_{1,2}$ необыкновенной (верхние кривые) и обыкновенной (нижние кривые) волн от частоты. Правый рисунок соответствует концентрации электронов $N_e = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, направлению распространения по отношению к магнитному полю $\cos \theta = 0.05$, величине магнитного поля, равной $B = 2.56 \cdot 10^{11} \text{ Гс}$, $T = 1 \text{ кэВ}$, левый — $N_e = 10^{21} \text{ см}^{-3}$, $\cos \theta = 0.05$, $B = 2.56 \cdot 10^{11} \text{ Гс}$, $T = 1 \text{ кэВ}$. Сплошная линия — с учётом релятивистских эффектов и эффекта отдачи, штриховая — без учёта.

зона параметров, в которой возможно возникновение циклотронного ветра. Оценивается связанный с ним темп потери массы.

На Рис. 4 показана область, где возможно истечение плазмы под влиянием силы давления циклотронного излучения и приведена оценка темпа потери массы для атмосфер нейтронных звёзд и магнитных белых карликов, которая получена в предположении о сферически симметричном истечении вещества с поверхности:

$$\dot{M} = 4\pi R^2 N_s c_s, \quad (4)$$

где R — радиус звезды, N_s — концентрация в звуковой точке, c_s — изотермическая скорость звука. Отметим, что вклад силы давления излучения в континууме мал для рассматриваемой области параметров.

Форму линий постоянного темпа потери массы на Рис. 4 можно понять из следующих качественных рассуждений. Давление излучения максимально, если гирочастота располагается вблизи максимума теплового спектра. Если температура слишком мала и сила давления циклотронного излучения не нарушает гидростатического равновесия в атмосфере, то данный факт имеет место для всех значений магнитного поля. Предположим, что при некотором значении температуры сила давления излучения превышает силу тяжести, приводя к формированию циклотронного вет-

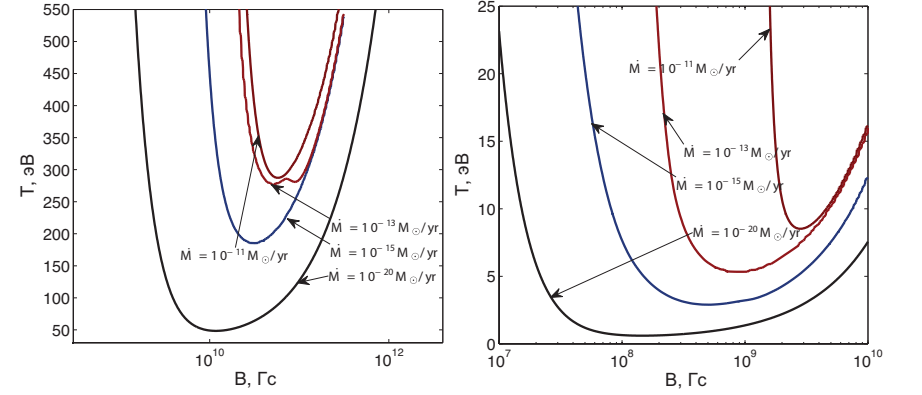


Рис. 4. Линии постоянного темпа потери массы на диаграмме магнитное поле B — температура плазмы T из-за силы давления циклотронного излучения для магнитных белых карликов (справа) с массой $M_{\text{WD}} = 0.8M_{\odot}$ и нейтронных звёзд (слева) с массой $M_{\text{NS}} = 1.4M_{\odot}$ с водородной атмосферой.

ра с темпом истечения \dot{M} . При увеличении или уменьшении магнитного поля центр циклотронной линии сдвигается либо в виновскую, либо в релей-джинсовскую части спектра, где интенсивность излучения меньше. Таким образом, и давление излучения и темп потери массы будут также уменьшаться, пока условие гидростатического равновесия вновь не будет выполняться.

В некоторой области параметров атмосфер нейтронных звёзд кривые постоянного темпа потери массы имеют два максимума. Второй пик появляется под влиянием намагничивания вакуума, которое приводит к увеличению силы давления излучения за счёт вовлечения обыкновенной волны в резонансное взаимодействие с электронами плазмы в верхних слоях атмосферы.

Вычисления показывают, что циклотронный ветер возникает в атмосферах магнитных белых карликов с температурой $T \gtrsim 2 \text{ эВ}$ и магнитным полем $B \sim 10^8 - 10^9 \text{ Гс}$. У нейтронных звёзд возникновение плазменных течений возможно для атмосфер с магнитным полем $B \sim 10^{10} - 10^{12} \text{ Гс}$ и температурами $T \gtrsim 100 \text{ эВ}$. Характерное значение темпа потери массы при этом составляет $\lesssim 10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$. (Отметим, что в определенной области параметров, несмотря на формальное существование звёздного ветра, темп истечения является крайне малым; особенно это характерно для белых карликов.)

Наличие такого ветра может приводить к образованию радиацион-

ных дисконов — особого типа звёзд с протяженной плазменной магнитосферой, структура которой определяется силой давления излучения [16]. Можно отметить, что наиболее вероятными кандидатами в радиационные диски среди нейтронных звёзд являются одиночные нейтронные звёзды в остатках сверхновых (ССО), характерная температура атмосфер которых $T \sim 200 - 500$ эВ, а значение магнитного поля $B \lesssim 10^{11}$ Гс [17]. Среди магнитных белых карликов наиболее вероятными кандидатами являются такие объекты, как EUVE J0317-855, GD 229, HE 1043-0502 и др. (см. [18]).

В третьей главе проведено численное моделирование распространения излучения с целью исследования механизмов формирования особенностей в наблюдаемом динамическом спектре нейтронных звёзд. Из-за малых размеров нейтронных звёзд эффекты общей теории относительности (ОТО), такие как искривление лучей света и гравитационное красное смещение, значительно искажают наблюдаемый спектр. Кроме того, вследствие быстрого вращения регистрируемый спектр искажается под влиянием эффекта Доплера, абберации света (при наличии анизотропии излучения) и геометрической задержки времени прихода излучения от разноудаленных относительно наблюдателя участков поверхности нейтронной звезды.

В начале главы представлены используемая модель и методика вычисления динамического спектра излучения от нейтронной звезды. Перечислены применяемые приближения и набор характерных параметров, используемых для расчётов. В частности, магнитное поле звезды считается дипольным. Также используются два основных вида распределения температуры по поверхности звезды. В первом излучают только приполярные области (модель горячих полярных шапок), которые считаются точечными. При этом температура обеих полярных шапок считается одинаковой. Во втором вид распределения моделируется угловой зависимостью

$$T = T_{\text{pc}} [\rho + (1 - \rho) \cos^2 \theta'], \quad \rho = \frac{T_{\text{eq}}}{T_{\text{pc}}}, \quad (5)$$

где θ' — полярный угол в системе координат, связанной с осью магнитного диполя, T_{pc} — температура на магнитных полюсах, T_{eq} — температура на магнитном экваторе.

В следующем разделе представлен новый метод анализа наблюдаемых спектров, основанный на получении фурье-гармоник (по частоте вращения звезды) спектра излучения. Конкретнее, зависимость наблюдаемого спектра от фазы вращения можно представить в виде ряда Фурье по гармоникам частоты вращения звезды. При этом оказывается, что спектры

амплитуд и фаз таких фурье-гармоник содержат узкие особенности, связанные с наличием в исходном спектре звезды линий поглощения или излучения, которые в интегральном спектре зашиваются под влиянием различных факторов. Характерный вид этих особенностей довольно заметно зависит как от параметров плазмы в атмосфере звезды, так и от ориентации оси вращения и оси магнитного поля по отношению к лучу зрения. Предложенная методика может быть применена для идентификации особенностей в наблюдаемых спектрах и для определения параметров атмосфер нейтронных звёзд.

Далее обсуждаются атомные спектральные линии в модели нейтронных звёзд с двумя горячими полярными пятнами. В последующем разделе рассмотрены циклотронные линии для различных распределений температуры по поверхности звезды и различных ориентаций дипольного магнитного поля. В заключительном разделе обсуждаются возможные приложения полученных результатов к анализу наблюдаемых спектров нейтронных звёзд (в основном на примере одиночной нейтронной звезды 1E 1207.4-5209).

В качестве иллюстрации проведенных вычислений на Рис. 5 изображена зависимость интегрального спектра нейтронной

звезды для различных распределений температуры по поверхности (5) при наличии в локальном спектре одной циклотронной линии поглощения. Видно, что с уменьшением величины ρ линия вблизи частоты $\omega = 0.5\omega_{\text{pc}}$ (где ω_{pc} — значение гирочастоты на магнитном полюсе) пропадает, тогда как линия, соответствующая магнитному полю на полюсах,

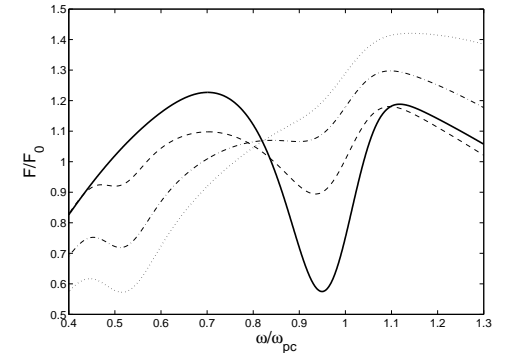


Рис. 5. Нормированный интегральный спектральный поток при наличии циклотронной линии для различных распределений температуры (5). Сплошная линия соответствует $\rho = 0$, штриховая — $\rho = 0.5$, штрих-пунктирная — $\rho = 0.75$, пунктирная — $\rho = 1$. Угол наклона оси вращения относительно наблюдателя $i = 45^\circ$, угол между осью вращения и осью магнитного диполя $\zeta = 45^\circ$, радиус нейтронной звезды $R \approx 10$ км, частота вращения $\nu = 300$ Гц, $T_{\text{pc}} = 200$ эВ, $\hbar\omega_{\text{pc}} = 600$ эВ, $M_{\text{NS}} = 1.4M_{\odot}$.

становится более ярко выраженной.

Также видно, что в достаточно широкой области распределения температур циклотронная особенность проявляется в интегральном спектре излучения нейтронной звезды как двойная, компоненты которой соответствуют полярной и экваториальной гирочастотам. Доля пульсирующего излучения при таких распределениях температуры, очевидно, оказывается значительно ниже, чем в модели полярных шапок. Тем не менее в области частот $0.5\omega_{pc} \div \omega_{pc}$ доля пульсирующего излучения оказывается порядка одного процента; такой уровень вполне обнаружим в наблюдениях.

Тонкая структура спектра фурье-гармоник в данном случае довольно сложна и сильно зависит как от выбранной геометрии осей магнитного диполя и вращения нейтронной звезды, так и от выбранного профиля циклотронной линии. Кроме того, ряд характерных для циклотронных линий особенностей возникает из-за геометрических факторов. Дело в том, что в зависимости от значений угла наклона оси вращения по отношению к наблюдателю и угла между осью магнитного диполя и осью вращения звезды амплитуда и характер колебаний, приходящих от различных магнитных широт, могут меняться в широких пределах. В частности, существуют выделенные широты (свой для каждой конкретной геометрии), вклад которых в долю пульсирующего излучения минимален. Указанная ситуация возможна благодаря тому, что доля видимой поверхности в окрестности этих широт практически не меняется со временем. Такой эффект возникает из-за гравитационного искривления лучей света, которое приводит к тому, что видимая площадь поверхности звезды больше половины фактической площади звезды. Наличие подобных выделенных широт приводит к появлению узких минимумов в спектре амплитуд фурье-гармоник.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Установлена принципиальная роль явления перераспределения по частоте при распространении гирорезонансного излучения в разреженной магнитоактивной плазме с параметрами, характерными для атмосфер компактных звёзд (в диапазонах магнитных полей и температур плазмы $10^7 - 10^{10}$ Гс, $1 - 20$ эВ для белых карликов и $10^9 - 10^{13}$ Гс, $50 - 1000$ эВ для нейтронных звёзд). Выяснено, что механизмы перераспределения фотонов по частоте в таких условиях существенно отличаются от хорошо изученных механизмов перераспределения, типичных для атомных и ионных спектральных ли-

ний, главным образом из-за одномерного характера движения электронов в сильном магнитном поле. Показано, что основным эффектом, обуславливающим выход фотонов из циклотронного резонанса, является релятивистский эффект Доплера. Показано также, что конечная естественная ширина циклотронного резонанса не играет особой роли в случае, когда энергия гирофотонов сравнима с типичной тепловой энергией электронов, однако может оказывать решающее влияние на выход фотонов из линии тогда, когда линия располагается в виновском хвосте теплового спектра или когда оптическая глубина области формирования циклотронных особенностей достаточно велика.

2. Вычислена вероятность выхода гирофотонов из полубесконечной рассеивающей атмосферы со слабым поглощением. Установлено, что при больших оптических глубинах эта вероятность падает по степенному (а не экспоненциальному) закону на достаточно продолжительном интервале оптических глубин в несколько порядков величины, что приводит к сравнимому вкладу гирофотонов со всего указанного интервала в выходящее циклотронное излучение и к расширению области атмосферы, информация о которой содержится в его спектре. На основе моделирования рассеяния и распространения фотонов методом Монте-Карло выделены области на плоскости параметров магнитное поле — температура плазмы, где явление перераспределения гирофотонов по частоте в основном определяется либо релятивистским эффектом Доплера, либо естественным уширением циклотронной линии, либо эффектом отдачи электронов.
3. Решены уравнения переноса излучения в линии электронного гирорезонанса с учётом выхода из неё фотонов, для чего разработана оригинальная численная программа, основанная на методе ускоренных итераций. Показано, что получение корректных результатов для атмосфер нейтронных звёзд и белых карликов требует использования тензора диэлектрической проницаемости слаборелятивистской плазмы в сильном магнитном поле, включающего релятивистские поправки к условию циклотронного резонанса, а также учёта эффектов намагничивания вакуума. Определены действительные и мнимые части показателей преломления и коэффициенты поляризации нормальных электромагнитных волн в условиях преобладания рассеяния над поглощением. Установлено, что релятивистские эффекты, приводящие к сильному изменению дисперсии и резонансного поглощения волн, а также намагничивание вакуума качественно изменяют спектр, диаграммы направленности и давление гироре-

зонансного излучения для широкой области параметров атмосфер компактных звёзд.

4. На основе полученных решений уравнений переноса излучения рассчитана сила давления гирорезонансного излучения и указаны параметры атмосфер компактных звёзд, для которых возможно истечение плазмы под действием циклотронного излучения. Оценен темп потери массы для одиночных магнитных белых карликов и нейтронных звёзд. Выяснены условия, при которых вызванное намагничиванием вакуума увеличение коэффициента затухания обыкновенной волны в верхних слоях атмосферы приводит к существенному возрастанию силы давления циклотронного излучения, особенно значительному в том случае, когда эти слои являются оптически тонкими.
5. С использованием численного моделирования интегральных спектров излучения вращающихся нейтронных звёзд с различными распределениями температуры по поверхности звезды найдены особенности формируемых ими атомных и циклотронных линий. При расчёте распространения излучения учтены доплеровский сдвиг частоты, абберация, искривление лучей света и гравитационное красное смещение. Предложен и разработан новый метод анализа данных наблюдений спектров излучения нейтронных звезд, основанный на получении фурье-гармоник динамического спектра излучения на частотах, кратных частоте вращения звезды. Регистрируемый спектр гармоник формируется под влиянием как геометрических, так и указанных физических факторов. Предложенный метод может быть использован для интерпретации наблюдаемых спектров излучения нейтронных звёзд и установления параметров их атмосфер.

Список работ по теме диссертации

- [A1] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Влияние релятивистских эффектов и намагничивания вакуума на перенос гирорезонансного излучения и устойчивость атмосфер компактных звёзд // *Письма в астрономический журнал*. — 2008. — Т. 34, № 5. — С. 339–350.
- [A2] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Влияние частотного перераспределения на перенос гирорезонансных фотонов в атмосферах компактных звёзд: анализ методом Монте-Карло // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2010. — Т. 53, № 12. — С. 757–765.

- [A3] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Особенности проявления спектральных линий в динамических спектрах нейтронных звёзд // *Известия вузов. Радиофизика*. — 2011. — Т. 54, № 5. — С. 335–347.
- [A4] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Статистика частотного перераспределения для гирорезонансного излучения в атмосферах компактных звёзд // *Письма в астрономический журнал*. — 2011. — Т. 37, № 10. — С. 761–768.
- [A5] М. Garasyov, E. Derishev, V. Kocharovskiy and Vl. Kocharovskiy. Spectral redistribution of gyroresonant photons in magnetized atmospheres of isolated compact stars // *Astron. Astrophys.*. — 2011. — V. 531. — P. L14.
- [A6] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Перенос резонансного излучения в замагниченной плазме с учётом диффузии по частоте // Нижегородская сессия молодых учёных. Естественнонаучные дисциплины (12; 2007). — ННГУ, 2007. — С. 43.
- [A7] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Влияние эффекта поляризации вакуума на перенос резонансного излучения в атмосферах нейтронных звёзд // «Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения». Материалы пятнадцатой межрегиональной научно-технической конференции. — Нижний Новгород — Москва, 2007. — С. 406–408.
- [A8] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Перенос резонансного излучения в атмосферах нейтронных звёзд // Труды XI научной конференции по радиофизике, посвященной 105-летию со дня рождения М.Т. Греховой (Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.) — Издательство ННГУ, Нижний Новгород, 2007. — С. 12.
- [A9] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Перенос резонансного излучения в замагниченной плазме с учётом диффузии по частоте // Труды X Конференции молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы», БШФФ-2007. — Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2007. — С. 265-266.
- [A10] М. А. Garasyov, E. V. Derishev, Vl. V. Kocharovskiy. Transfer of gyroresonant radiation in neutron star atmospheres // Russian Conference on Physics of neutron stars. Abstracts. Saint-Petersburg, 2008. — P. 33.
- [A11] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Перенос циклотронного излучения в замагниченной плазме с учётом поляризации вакуума и релятивистских эффектов // XIV научная школа «Нелинейные волны - 2008». Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики. — Изд-во ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2008. — С. 22.
- [A12] М. А. Гарасев, Е. В. Дергачев, Вл. В. Кочаровский. Влияние релятивистских эффектов в плазме с сильным магнитным полем на дисперсионные свойства нормальных волн // Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2007)». — Изд-во ИКИ РАН, Москва, 2007. — С. 6.

- [A13] М. А. Гарасев, Е. В. Дерюшев, Вл. В. Кочаровский. Циклотронный ветер в атмосферах компактных звёзд // *Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики* (Конференция молодых ученых, 6-12 марта 2010 г., Нижний Новгород). Тезисы докладов. — Изд-во ИПФ РАН, Нижний Новгород, 2010. — С. 20.
- [A14] М. А. Гарасев, Е. В. Дерюшев, Вл. В. Кочаровский. Давление гирорезонансного излучения в атмосферах компактных звёзд // 14-я Нижегородская сессия молодых учёных (естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, 19-24 апреля 2009 г. — Изд-во ННГУ, Нижний Новгород, 2009. — С. 31.
- [A15] М. А. Гарасев, Е. В. Дерюшев, Вл. В. Кочаровский. Истечение плазмы из атмосфер компактных звёзд под действием давления излучения // Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2009)». — Изд-во ИКИ РАН, Москва, 2009. — С. 7.
- [A16] М. А. Гарасев. Звёздный ветер под действием давления излучения // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Астрономия и культура» (Нижегородский планетарий, 23 – 25 сентября 2009 г.). — Нижний Новгород, ИПФ РАН, 2009. — С. 26.
- [A17] E. V. Derishev, M. A. Garasyov, Vl. V. Kocharovskiy. Gyroresonant radiation transfer: principal phenomena and astrophysical implications // Proc. of the 4th Int. Conf. "Frontiers of Nonlinear Physics", July 13-20, 2010, Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, ed. A. Litvak. — P. 383-384.
- [6] Г. Г. Павлов, И. А. Шибанов. *Влияние поляризации вакуума магнитным полем на распространение электромагнитных волн в плазме* // *ЖЭТФ*, **76**, стр. 1457–1473 (1979).
- [7] В.В. Железняков, В.В. Кочаровский, Вл.В. Кочаровский. *Линейное взаимодействие электромагнитных волн в неоднородных слабоанизотропных средах* // *Успехи физических наук*, **141**, 10, стр. 257–310 (1983).
- [8] Д. Михалас. *Звёздные атмосферы. Т.2*: М: Мир (1982), стр. 424.
- [9] V. V. Zheleznyakov, A. A. Litvinchuk. *Radiation Pressure on the Plasma above Degenerate Stars with a Strong Magnetic Field* // *Soviet Astronomy*, **31**, pp. 159–166 (1987).
- [10] G. Slater, E. E. Salpeter, I. Wasserman. *Monte Carlo calculations of resonance radiative transfer through a semi-infinite atmosphere* // *Astrophys. Journal*, **255**, pp. 293–302 (1982).
- [11] I. G. Mitrofanov, A. I. Tsygan. *Relativistic ejection from compact stars with a strong magnetic field* // *Astrophys. & Space Science*, **84**, pp. 35–51 (1982).
- [12] D. A. Leahy. *Mass-Radius Constraints from a Pulse Shape Model for Hercules X-1* // *Astrophys. Journal*, **613**, pp. 517–521 (2004).
- [13] G. G. Pavlov, V. E. Zavlin, J. Truemper, R. Neuhaeuser. *Multiwavelength Observations of Isolated Neutron Stars as a Tool to Probe the Properties of their Surfaces* // *Astrophys. Journal*, **472**, pp. L33–L36 (1996).
- [14] I. Wasserman, E. Salpeter. *Resonance radiative transfer for cyclotron line emission with recoil* // *Astrophys. Journal*, **241**, pp. 1107–1121 (1980).
- [15] N. Weinberg, M. C. Miller, D. Q. Lamb. *Oscillation Waveforms and Amplitudes from Hot Spots on Neutron Stars* // *Astrophys. Journal*, **546**, pp. 1098–1106 (2001).
- [16] V. V. Zheleznyakov, A. V. Serber, J. Kuijpers. *Radiation-driven envelopes around magnetic white dwarfs. Radiation-driven diskons* // *Astron. Astrophys.*, **308**, pp. 465–471 (1996).
- [17] A. Kawka, S. Vennes, G. D. Schmidt, D. T. Wickramasinghe, R. Koch. *Spectropolarimetric Survey of Hydrogen-rich White Dwarf Stars* // *Astrophys. Journal*, **654**, pp. 499–520 (2007).
- [18] W. Zhu, V. M. Kaspi, M. E. Gonzalez, A. G. Lyne. *Xmm-Newton X-Ray Detection of the High-Magnetic-Field Radio Pulsar PSR B1916+14* // *Astrophys. Journal*, **704**, pp. 1321–1326 (2009).

Список литературы

- [1] J. R. P. Angel. *Magnetic white dwarfs* // *Annual Rev. of Astron. & Astrophys.*, **16**, pp. 487–519 (1978).
- [2] J. Truemper, W. Pietsch, C. Reppin, W. Voges, R. Staubert, E. Kendziorra. *Evidence for strong cyclotron line emission in the hard X-ray spectrum of Hercules X-1* // *Astrophys. J. Lett.*, **219**, pp. L105–L110 (1978).
- [3] A. Santangelo, A. Segreto, S. Giarrusso, D. dal Fiume, M. Orlandini, A. N. Parmar, T. Oosterbroek, T. Bulik, T. Mihara, S. Campana, G. L. Israel, L. Stella. *A BEPPOSAX Study of the Pulsating Transient X0115+63: The First X-Ray Spectrum with Four Cyclotron Harmonic Features* // *Astrophys. J. Lett.*, **523**, pp. L85–L88 (1999).
- [4] S. L. Adler. *Photon splitting and photon dispersion in a strong magnetic field.* // *Annals of Physics*, **67**, pp. 599–647 (1971).
- [5] В. В. Железняков. *Излучение в астрофизической плазме*: М: Янус-К (1997), стр. 528.

Оглавление диссертации

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Выход фотонов из гирорезонансной линии в атмосферах компактных звёзд, обусловленный эффектами частотного перераспределения	15
1.1. Постановка задачи. Схема метода Монте-Карло	16
1.2. Основные механизмы перераспределения циклотронного излучения по частоте	21
1.3. Диффузия фотонов в рассеивающей атмосфере и особенности частотного перераспределения. Анализ методом Монте-Карло	32
1.4. Термализация циклотронного излучения в полубесконечной атмосфере со слабым поглощением при учёте эффектов частотного перераспределения	39
1.5. Выводы	43
Глава 2. Перенос гирорезонансного излучения с учётом релятивистских эффектов и намагничивания вакуума. Условия возникновения циклотронного ветра в атмосферах компактных звёзд	46
2.1. Тензор диэлектрической проницаемости и дисперсионные характеристики нормальных волн в системе «магнитоактивная плазма + намагниченный вакуум»	48
2.2. Диаграммы направленности рассеяния произвольно поляризованных волн на замагниченных электронах	56
2.3. Уравнения переноса гирорезонансного излучения в системе «магнитоактивная плазма + намагниченный вакуум»	60
2.4. Численная схема решения уравнений переноса излучения в области гирорезонанса	65
2.5. Численное решение задачи о переносе циклотронного излучения в рассеивающей атмосфере со слабым поглощением	68
2.6. Сила давления теплового циклотронного излучения и условия возникновения звездного ветра	72
2.7. Выводы	78
Глава 3. Моделирование динамических спектров излучения вращающихся нейтронных звёзд	80
3.1. Постановка задачи и используемая модель	81
3.2. Метод частотно-разделённых гармоник	86
3.3. Моделирование спектральных линий в динамических спектрах излучения нейтронных звёзд с двумя горячими полярными шапками	89
3.4. Моделирование циклотронных линий в спектрах излучения нейтронных звёзд	95
3.5. Обсуждение наблюдаемых особенностей в спектре излучения нейтронной звезды 1E 1207.4-5209	99
3.6. Выводы	102
Заключение	103
Список литературы	106

ГАРАСЕВ Михаил Алексеевич

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОСОБЕННОСТЕЙ В СПЕКТРАХ ИЗЛУЧЕНИЯ КОМПАКТНЫХ ЗВЁЗД

Автореферат

Ответственный за выпуск
М. А. Гарасев

Подписано к печати 12.09.2011
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 79(2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46