

Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

На правах рукописи

ПОТЕХИН Александр Юрьевич

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА
В ОБОЛОЧКАХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД**

01.03.02 — Астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург, 2009

Работа выполнена в секторе теоретической астрофизики Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Учреждения Российской академии наук «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН».

- Официальные оппоненты:
- профессор, доктор физ.-мат. наук
Г. С. Бисноватый-Коган
(Институт космических исследований
РАН, Москва)
 - профессор, доктор физ.-мат. наук
Ю. Н. Гнедин
(Главная астрономическая обсерватория
РАН, Пулково, Санкт-Петербург)
 - профессор, доктор физ.-мат. наук
И. Н. Топтыгин
(Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, Санкт-
Петербург)

Ведущая организация: ФГУП «ГНЦ РФ — ИТЭФ им. А. И. Алиханова» (Большая Черёмушкинская ул., д. 25, 117218 Москва)

Защита состоится 10 декабря 2009 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д002.205.03 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу: Политехническая ул., д. 26, 194021 Санкт-Петербург.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2009 года.

Учёный секретарь диссертационного совета:

канд. физ.-мат. наук

А. М. Красильщиков

1 Общая характеристика работы

1.1 Актуальность работы

Исследование оболочек нейтронных звёзд находится на стыке астрофизики и физики плазмы, являясь актуальной задачей с точки зрения каждой из этих наук.

Важная роль оболочек нейтронных звёзд в их тепловой эволюции и наблюдательных проявлениях была осознана ещё до открытия пульсаров [1] и исследовалась во многих работах (см., напр., ссылки в обзорах [2, 3]), но в последнее десятилетие их изучение стало особенно актуальным в связи с появлением нового поколения орбитальных рентгеновских обсерваторий (*Chandra* и *XMM-Newton*), впервые позволивших детально изучать остывание и тепловые спектры нейтронных звёзд (напр., [4]). В частности, начиная с 2002 года, стали обнаруживаться линии поглощения в тепловых спектрах нейтронных звёзд [5, 6]. Необходимость достоверной интерпретации новых высокоточных наблюдений остро требует детального моделирования теплопереноса и формирования спектров электромагнитного излучения в поверхностных слоях нейтронных звёзд. При этом часто оказывается необходимым учитывать *сильное магнитное поле*¹ $B \gtrsim 10^{12}$ Гс, которое способно существенно изменять кинетические, а при определённых условиях – и термодинамические характеристики звёздного вещества. Последнее обстоятельство стало особенно актуальным после открытия нового класса нейтронных звёзд – магнитаров, обладающих *сверхсильными* магнитными полями $B \sim 10^{14}$ – 10^{15} Гс, что на 1–3 порядка превосходит магнитные поля обычных пульсаров. Наблюдательные свидетельства в пользу наличия у некоторых нейтронных звёзд (аномальных рентгеновских пульсаров и источников повторяющихся гамма-всплесков) сверхсильных магнитных полей появились, в основном, в течение последнего десятилетия [7].

Кинетические и термодинамические свойства вещества при давлениях в миллионы атмосфер и температурах в сотни тысяч и миллионы градусов, которые встречаются в атмосферах нейтронных звёзд, можно изучать в реализуемых и планируемых в настоящее время лабораторных экспериментах (в частности, в опытах с использованием создаваемых мощными лазерами ударных волн) [8]. Поэтому изучение вещества с такими параметрами актуально

¹Применительно к нейтронным звёздам, магнитное поле обычно называют сильным, если велика его величина в атомных единицах – то есть при магнитной индукции $B \gg m_e^2 c e^3 / \hbar^3 = 2,35 \times 10^9$ Гс, – и сверхсильным, если существенны релятивистские магнитные эффекты, то есть при $B \gtrsim m_e^2 c^3 / (\hbar e) = 4,4 \times 10^{14}$ Гс. Здесь и далее используется система единиц СГСЭ

для физики плазмы. Необходимо отметить, что на много порядков более высокое давление, характерное для более глубоких, чем атмосфера, оболочек нейтронных звёзд, как и типичные для пульсаров – и тем более магнитаров – значения магнитной индукции, по-прежнему недостижимы в лабораторных условиях, что делает нейтронные звёзды уникальными «природными лабораториями», позволяющими проверить теоретические предсказания свойств вещества в экстремальных условиях.

1.2 Цели работы

1. Главной целью работы является теоретическое исследование термодинамических и кинетических свойств вещества в оболочках нейтронных звёзд, влияющих на тепловую эволюцию нейтронных звёзд и на формирование спектра выходящего теплового излучения, с учётом современных представлений о нейтронных звёздах и достижений теоретической физики плазмы. Работа ориентирована на использование в астрофизических приложениях, поэтому её целью является приведение всех изучаемых термодинамических функций и коэффициентов переноса к виду, подходящему для такого использования, – либо, где это возможно, путём построения аналитических аппроксимаций, либо путём создания общедоступных компьютерных программ, а также числовых таблиц, включённых в общедоступные астрофизические базы данных.
2. Второй целью работы является применение результатов исследования свойств оболочек нейтронных звёзд и созданных программ и баз данных к моделированию тепловой эволюции и спектров теплового электромагнитного излучения нейтронных звёзд и, в конечном итоге, к изучению конкретных нейтронных звёзд посредством сравнения построенных моделей с наблюдениями. Успешное осуществление такого моделирования применительно к ряду наблюдаемых нейтронных звёзд служит подтверждением актуальности и успешного осуществления главной цели работы.
3. В задачи исследования также входят изучение и расчёт квантовомеханических характеристик атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле и взаимодействующего с электромагнитным излучением. Решение этой задачи является необходимым этапом для расчёта уравнения состояния и непрозрачностей атмосфер нейтронных звёзд с сильным магнитным полем и моделирования спектра выходящего из атмосферы теплового излучения, но в то же время оно имеет и самостоятельную значимость с точки зрения теоретической атомной физики.

1.3 Научная новизна работы

В диссертации проведено систематическое исследование уравнения состояния вещества и электронного переноса тепла и заряда во всех оболочках нейтронных звёзд – от внутренней коры до атмосферы – с произвольными магнитными полями. На этой основе впервые разработан общедоступный комплекс компьютерных программ для расчёта термодинамических и кинетических характеристик плазмы в оболочках нейтронных звёзд и исследована механическая и тепловая структура этих оболочек. Также впервые исследовано взаимодействие с электромагнитным излучением атома водорода, произвольным образом движущегося в сильном магнитном поле, и роль этого взаимодействия в формировании спектров теплового излучения в атмосферах нейтронных звёзд.

В частности, впервые решены следующие задачи.

1. Получены аналитические выражения для вкладов ион-ионного и электрон-ионного взаимодействия в свободную энергию и производные от неё термодинамические функции полностью ионизованной плазмы, применимые при произвольной степени вырожденности электронов плазмы, произвольном ионном зарядовом составе и произвольной величине параметра кулоновской связи.
2. Изучены упругие свойства жидкокристаллической мантии нейтронных звёзд, содержащей экзотические атомные ядра, и найдены аналитические формулы для соответствующих коэффициентов упругости.
3. Учтён вклад многофононных процессов в структурный фактор и в кинетические коэффициенты кулоновского кристалла.
4. Систематически исследованы и рассчитаны квантовомеханические свойства атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле, при произвольном значении обобщённого импульса, характеризующего это движение, включая энергии связи, геометрические размеры, силы осцилляторов основного и возбуждённых состояний, времена жизни метастабильных состояний, свойства волновых функций дискретного и непрерывного спектра.
5. Рассчитаны сечения фотоионизации атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле, при произвольном значении обобщённого импульса.
6. Построено уравнение состояния частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле, учитывающее движение атомов по-

перёк магнитных силовых линий, а также эффекты неидеальности, в том числе ионизацию давлением.

7. Получены удобные аналитические выражения для расчёта вероятностей безызлучательных и радиативных переходов между ионными уровнями Ландау при кулоновских столкновениях ионов и электронов в сильном и сверхсильном магнитном поле.
8. Теплопроводность, электропроводность и термоэлектрический коэффициент полностью ионизованной вырожденной плазмы при переносе вдоль квантующего магнитного поля рассчитаны на основе инвариантного формализма квантовомеханической матрицы плотности.
9. Предложены аналитические формулы и создан реализующий их общедоступный комплекс компьютерных программ для расчёта коэффициентов электронного переноса тепла и заряда в полностью ионизованной плазме при произвольной степени кулоновской неидеальности, произвольной степени электронного вырождения и произвольном магнитном поле, в том числе квантующем.
10. Исследована тепловая структура нейтронных звёзд с аккрецированными оболочками без магнитного поля и при наличии сильного или сверхсильного магнитного поля.
11. Рассчитаны коэффициенты тензора диэлектрической восприимчивости и спектральные непрозрачности в частично ионизованных атмосферах нейтронных звёзд с сильными магнитными полями, и на этой основе построены модели частично ионизованных водородных атмосфер нейтронных звёзд с сильными магнитными полями.

1.4 Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка термодинамической модели и расчёт уравнения состояния частично ионизованной неидеальной водородной плазмы в широком диапазоне плотностей при значениях температуры $T \sim 10^5 - 10^7$ К и магнитной индукции $B \sim 10^{11} - 10^{15}$ Гс, характерных для внешних оболочек нейтронных звёзд, с учётом модификации квантовомеханических свойств атомов за счёт эффектов сильного магнитного поля и движения атомов в этом поле.
2. Расчёт квантовомеханических свойств атома водорода, произвольным образом движущегося в сильном магнитном поле и взаимодействующего с электромагнитным излучением.

3. Создание общедоступного комплекса компьютерных программ для расчёта коэффициентов переноса тепла и заряда в кулоновской плазме при любой степени вырожденности и релятивизма электронов, любых значениях параметра кулоновской связи и в произвольном магнитном поле, в том числе квантующем.
4. Расчёт тепловой структуры оболочек нейтронных звёзд со слабыми, сильными и сверхсильными магнитными полями для различных моделей химического состава оболочек.
5. Аналитическое описание термодинамических характеристик кулоновской плазмы при произвольных значениях плотности, температуры и магнитной индукции, для произвольного ионного состава, с учётом ион-ионных и электрон-ионных корреляций при любых значениях параметра кулоновской связи; создание общедоступного комплекса компьютерных программ для расчёта термодинамических функций кулоновской плазмы.
6. Расчёт спектральных непрозрачностей частично ионизованных водородных атмосфер нейтронных звёзд с сильными магнитными полями. Создание общедоступной базы модельных спектров таких атмосфер для применения при интерпретации наблюдений.

1.5 Научная и практическая значимость

Разработанные подходы к описанию уравнения состояния и электронных кинетических коэффициентов полностью ионизованной кулоновской плазмы в произвольном магнитном поле, а также разработанный комплекс компьютерных программ для расчёта основных термодинамических функций и коэффициентов проводимости и теплопроводности такой плазмы применяются при моделировании свойств оболочек нейтронных звёзд, а также оболочек и ядер белых карликов и ядер красных гигантов. Эти подходы могут применяться и при исследованиях иных астрофизических объектов, в которых содержится полностью ионизованная кулоновская плазма. Кроме того, результаты могут служить составляющей для описания частично ионизованной плотной плазмы, использующего «химическую модель» свободной энергии.

Результаты исследования тепловой структуры оболочек нейтронных звёзд, полученные на основе выполненного исследования их тензоров теплопроводности, важны для моделирования тепловой эволюции нейтронных звёзд различных типов и интерпретации их наблюдаемой тепловой светимости. Результаты уже используются с этой целью в секторе теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Построенное уравнение состояния и рассчитанные непрозрачности частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле используются группами Дуна Лая в Корнелльском университете и Клауса Вернера в Тюбингенском университете Эберхарда и Карла, а также Вином Хо в Саутгемптонском университете, при моделировании и интерпретации спектров теплового излучения нейтронных звёзд.

1.6 Апробация работы и публикации

Результаты работы неоднократно докладывались автором на семинарах сектора теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Института астрономии и астрофизики Университета Тюбингена (Германия), Католического университета Чили (Сантьяго де Чили), ИТЭФ им. А. И. Алиханова (Москва), Астрономического отдела физического факультета Корнелльского университета (США), представлялись на конкурсе лучших научных работ ФТИ им. А. Ф. Иоффе (первое место на конкурсе 2004 года), на всероссийских совещаниях и конференциях «Физика нейтронных звёзд» (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 1992, 1995, 2001, 2005), «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (ИКИ РАН, Москва, 2002, 2003), «Исследования неидеальной плазмы» (ИВТАН, Москва, 1997, 1998, 2000, 2003, 2004, 2005, 2008), а также на международных совещаниях и конференциях:

- “Physics of Supernovae and Neutron Stars” (ECT* Workshop, Тренто, Италия, 1996),
- “Atoms and Molecules in Strong External Fields” (Бад Хоннеф, Германия, 1997),
- “Physics of Nonideal Plasmas” (PNP-9 – Росток, Германия, 1998; PNP-10 – Грайфсвальд, Германия, 2000),
- “Pulsar Astronomy – 2000 and beyond” (IAU Colloquium 177, Бонн, Германия, 1999),
- “Neutron Stars” (INT-01-2, Сизтл, США, 2001),
- “Strongly Coupled Coulomb Systems” (Москва, 2005),
- “Isolated Neutron Stars: from the Interior to the Surface” (Лондон, Великобритания, 2006),
- “Astrophysics of compact objects” (Хуаншань, КНР, 2007),
- “The Neutron Star Crust and Surface” (INT-07-2a, Сизтл, США, 2007),

- “Defining the Neutron Star Crust: X-ray Bursts, Superbursts and Giant Flares” (Санта-Фе, Нью-Мексико, США, 2009),
- “Microphysics in Computational Relativistic Astrophysics” (Копенгаген, Дания, 2009).

Основное содержание диссертации опубликовано в 80 научных публикациях, список которых приведён в конце автореферата. В их числе – одна монография и 48 статей в журналах, входящих в «Перечень научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора и кандидата наук», утверждённый решениями Президиума ВАК (в списке публикаций по теме диссертации они помечены звёздочками).

1.7 Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы. Глава 1 носит характер предварительного краткого обзора, в котором изложены те общие сведения о нейтронных звёздах и их оболочках, которые необходимы, чтобы очертить предмет исследований, представленных в диссертации, и обосновать её актуальность. Она в значительной мере основана на обзорных разделах монографии [1]. Оригинальные результаты содержатся в главах 2–7. Глава 2 основана, главным образом, на работах [1, 12, 17, 19, 24, 29–31, 36, 38–41, 49, 53, 59, 72, 78], приведённых в списке публикаций по теме диссертации; глава 3 – на работах [14, 16, 20, 21, 25, 26, 28, 32, 34, 35, 42, 62, 67]; глава 4 – на работах [2, 3, 5–9, 13, 15, 18, 22, 23, 33, 43, 46, 66, 72, 75]; глава 5 – на работах [9–11, 19, 24, 27–29, 31, 32, 35, 37, 43, 46, 56, 60, 66]; глава 6 – на работах [14, 16, 34, 35, 37, 38, 42, 44, 47, 50, 54, 55, 68–74, 79]; глава 7 – на работах [4, 9, 15, 21, 22, 24, 37, 43, 45, 46, 48, 51, 52, 56–58, 60, 63–66, 76, 77, 80].

Полный объём диссертации составляет 420 страниц, включая 99 рисунков, 22 таблицы и список литературы, насчитывающий 445 наименований.

2 Содержание диссертации

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, представлена структура диссертации и дана её общая характеристика.

В **главе 1** дан краткий обзор строения нейтронных звёзд и их оболочек, физических условий в них, их терромагнитной эволюции и наблюдательных проявлений.

В § 1.1 выписаны основные параметры нейтронной звезды; в § 1.2 рассмотрено её общее строение; в § 1.3 более подробно представлены строение и свойства её оболочек; в § 1.4 дана характеристика магнитных полей, типичных для большинства известных нейтронных звёзд; в § 1.5 охарактеризована тепловая структура и эволюция типичных нейтронных звёзд, даны понятия стадий остывания и кривых остывания, и перечислены основные факторы, влияющие на тепловую эволюцию нейтронной звезды; в § 1.6 рассмотрены наблюдательные проявления физических свойств оболочек для нейтронных звёзд различных типов.

В **главе 2** систематически рассмотрены равновесные свойства неидеальной плазмы в оболочках нейтронных звёзд без учёта влияния магнитного поля и представлены методы и аналитические формулы для расчёта термодинамических функций при условиях, характерных для оболочек нейтронных звёзд. Основное внимание в данной главе уделено кулоновскому взаимодействию во внешних оболочках нейтронных звёзд, однако многие результаты главы также применимы и для внутренних оболочек. А поскольку физические условия во внешних оболочках нейтронных звёзд сходны с условиями в недрах белых карликов и в ядрах красных гигантов, то результаты полезны и для исследований этих объектов.

Параграфы 2.1 и 2.2 носят вводный характер. В § 2.1 описаны некоторые из основных термодинамических соотношений, используемых в дальнейшем, а в § 2.2 систематически перечислены основные параметры плазмы, от которых зависят её свойства в оболочках нейтронных звёзд, и охарактеризованы их типичные значения в различных частях оболочек.

В § 2.3 рассмотрено уравнение состояния полностью ионизованной электрон-ионной плазмы. Последовательно рассмотрены различные составляющие такой плазмы и их вклады в термодинамические функции: идеальный электрон-ионный газ, ионная кулоновская жидкость, электрон-ионная кулоновская жидкость с учётом поляризации электронного газа за счёт его взаимодействия с ионами плазмы, электрон-электронные корреляции. Приведены явные аналитические выражения, позволяющие вычислять все перечисленные составляющие термодинамических функций. В их числе – оригинальные, обладающие высокой точностью аналитические выражения для зависимости химического потенциала релятивистского электронного газа от плотности (§ 2.3.1b), для неидеальной составляющей свободной энергии классической кулоновской жидкости (§ 2.3.2.b) и гармонического кулоновского кристалла (§ 2.3.3a), интерполяционное выражение для квантовых ангармонических поправок (§ 2.3.3b), аналитические выражения для поляризационного вклада электронов в кулоновской жидкости (§ 2.3.6) и кулоновском кристалле

(§ 2.3.7). Рассмотрены ионные структурные факторы кулоновской жидкости и кулоновского кристалла, в том числе роль многофононных процессов (§ 2.3.4с), в определении которой значителен личный вклад автора. Рассмотрено плавление классического ионного кулоновского кристалла (§ 2.3.5) и получена наиболее точная на сегодня оценка значения параметра кулоновской связи Γ в точке плавления: $\Gamma_m = 175,0 \pm 0,4$. Оригинальными также являются рассмотрение влияния электронной поляризации на положение точки плавления и теплоту плавления кулоновского кристалла (§ 2.3.7с) и аналитическая формула для свободной энергии классической кулоновской жидкости, содержащей произвольные ионные смеси, применимая при любых значениях параметра Γ (§ 2.3.9). Приведённые выражения реализованы в общедоступном комплексе компьютерных программ².

В § 2.4 рассмотрено уравнение состояния частично ионизованной плотной плазмы. Представлены две разработанные автором модели свободной энергии – для водородной плазмы, содержащей нейтральные атомы и молекулы, и для плазмы, состоящей из многозарядных ионов и электронов, – и на их основе рассчитаны основные термодинамические функции водородной и углеродной плазмы при условиях, встречающихся во внешних оболочках нейтронных звёзд. Построенные модели проверены путём сравнения с другими моделями, известными из литературы.

В § 2.5 рассмотрены упругие свойства оболочек нейтронных звёзд и представлены найденные автором явные аналитические формулы для коэффициентов упругости жидкокристаллической мантии нейтронной звезды.

В § 2.6 представлено оригинальное описание явными аналитическими формулами двух популярных унифицированных уравнений состояния вещества коры и ядра нейтронных звёзд – Фридмана–Пандарипанде (FPS) [9] и Хенселя–Душена (SLy) [10]. Компьютерная программа, реализующая эти аппроксимации, предоставлена автором в свободное пользование на специально созданной странице в Интернете³.

Глава 3 посвящена расчётам теплопроводности, электропроводности и термоэлектрического коэффициента полностью ионизованной плазмы при физических условиях, встречающихся в океане и коре нейтронных звёзд без сильного магнитного поля. В данной главе, после вводной части, опирающейся на результаты предыдущих исследований, большинство из которых было суммировано в работах Д. Г. Яковлева с соавторами, представлено дальнейшее развитие теории, состоящее в учёте частичной упорядоченности кулоновской жидкости вблизи точки кристаллизации, многофононных процессов

²<http://www.ioffe.ru/astro/EIP/>

³<http://www.ioffe.ru/astro/NSG/NSEOS/>

в кулоновском кристалле, конечных размеров ядер и их реального формфактора во внутренней коре нейтронной звезды, а также в выводе аналитических аппроксимаций, применимых во всех оболочках нейтронной звезды при произвольной степени вырожденности и релятивизма электронов.

В § 3.1, носящем вводный характер, суммированы основные известные подходы и формулы для расчёта кинетических коэффициентов плазмы.

В § 3.2 более подробно рассмотрены коэффициенты электро- и теплопереноса, обусловленные рассеянием электронов на ионах в кулоновской жидкости и кулоновском кристалле. В частности, в § 3.2.4 представлена построенная автором единая аналитическая аппроксимация для вычисления электронных теплопроводности, проводимости и термоэлектрического коэффициента, обусловленных рассеянием сильновырожденных электронов на ионах в любой термодинамической фазе с учётом релятивизма электронов, неборновской поправки, конечных размеров ионов, многофононных процессов в кулоновском кристалле (для данной задачи впервые учтённых автором), вымораживания процессов переброса в кулоновском кристалле в пределе низких температур, а также дано обобщение на случай электронов произвольной степени вырожденности.

Параграф 3.3 посвящён аналитическим формулам, описывающим вклад электрон-электронного рассеяния в вычисление теплопроводностей. В частности, в § 3.3.3 приведена оригинальная интерполяционная формула, позволяющая определять этот вклад при произвольной степени вырожденности электронов.

В § 3.4 описаны способы учёта рассеяния на примесях и дефектах кулоновского кристалла, а также многокомпонентного состава кулоновской плазмы в жидком и аморфном состояниях.

Центральными для данной работы являются главы 4 и 5, в которых вклад автора в получение основных результатов был определяющим.

В **главе 4** изучены квантовомеханические свойства атомов с учётом их движения в атмосфере нейтронной звезды с сильным магнитным полем, а также безызлучательные и излучательные квантовые переходы в дискретном и непрерывном спектрах в сильном магнитном поле. Основное внимание уделено атому водорода, для которого задача решена полностью.

В § 4.1 суммированы основные сведения и обозначения, которые используются в данной и следующей главах, а оригинальные результаты содержатся в последующих разделах.

Раздел 4.2 посвящён исследованию энергий связи и волновых функций дискретного и непрерывного спектра атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле. Рассмотрены разные представления гамильтониана и

волновых функций. Разработана и реализована методика точного численного расчёта энергетического спектра и волновых функций, основанная на разложении волновых функций в ряд по базису орбиталей Ландау и выборе наиболее подходящего представления для решения системы уравнений, возникающей в результате подстановки такого функционального ряда в уравнение Шрёдингера. Исследованы как асимптотики уровней энергии и волновых функций при малых и больших значениях обобщённого импульса K_{\perp} , характеризующего движение атома поперёк магнитных силовых линий, так и их поведение в промежуточной области, включая антипересечения уровней и область вблизи критического значения обобщённого импульса K_{cr} , где происходит переход атома из «центрированного» в экзотическое «децентрированное» состояние, в котором электронное облако расположено, в основном, в стороне от ядра. Построены аккуратные аппроксимационные аналитические выражения, описывающие энергии дискретного спектра и геометрические характеристики атома водорода в зависимости от магнитной индукции B и поперечного обобщённого импульса K_{\perp} . На основе этих результатов оценена наибольшая скорость, с которой атом может перемещаться перпендикулярно силовым линиям сильного магнитного поля. Проведено сравнение с численными и аналитическими результатами, публиковавшимися ранее другими авторами, и показана более высокая точность полученных в диссертации результатов по сравнению с предыдущими, а в ряде случаев скорректированы ошибочные утверждения или формулы, встречавшиеся ранее в литературе. В § 4.2.6 рассмотрены волновые функции непрерывного спектра атома водорода, покоящегося или движущегося в сильном магнитном поле, и разработан метод их расчёта, впервые учитывающий связь между разными орбиталями Ландау в непрерывном спектре атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле.

В § 4.3 рассмотрены вероятности переходов между ионными уровнями Ландау при кулоновском электрон-ионном и ион-ионном рассеянии. Для конкретности внимание сконцентрировано на случае водородной плазмы, но обсуждено также и возможное обобщение результатов на случай ионов с зарядовыми числами $Z \neq 1$. Выведены простые аналитические оценки для рассматриваемых вероятностей переходов с точностью до кулоновского логарифма, а также прикладные формулы для расчёта кулоновских логарифмов, соответствующих ион-электронным и ион-ионным столкновениям, и, следовательно, пригодные для достаточно точного определения искомых вероятностей переходов. Проведены расчёты кулоновских логарифмов и представлены примеры, на основе которых сделаны обобщающие выводы – в частности, вывод о том, что для грубой оценки вероятностей переходов достаточ-

но рассмотреть только ион-электронные столкновения, трактовка которых в сильном магнитном поле намного проще, чем трактовка ион-ионных столкновений.

В § 4.4 рассмотрено взаимодействие атома водорода, движущегося в магнитном поле, с электромагнитным излучением. Выведены общие выражения для эффективного оператора такого взаимодействия, справедливые для различных представлений волновых функций, рассмотренных в предыдущем параграфе, как в дипольном приближении, так и вне его рамок (§ 4.4.1). Полученные выражения взаимодействия затем применены к волновым функциям, вычисленным в § 4.3. На этой основе в § 4.4.2 изучены излучательные переходы между дискретными уровнями атома водорода, движущегося в сильном магнитном поле. Вычислены силы осцилляторов для переходов между разными уровнями и изучено их поведение в зависимости от обобщённого импульса K_{\perp} . В частности, найдены асимптотики сил осцилляторов при малых и больших значениях K_{\perp} и изучено их поведение в промежуточной области, в том числе их резкие резонансы, связанные с антипересечениями уровней, обсуждавшимися в предыдущем параграфе. Для сил осцилляторов основных радиативных переходов как функций B и K_{\perp} построены аналитические аппроксимации.

В § 4.4.3 рассмотрена фотоионизация. Впервые для атома, движущегося в сильном магнитном поле, на основе формализма матрицы реакции учтена связь между различными каналами фотоионизации и изучены резонансы Фано, порождаемые радиативными переходами на метастабильные уровни. Показано, что только данный подход, основанный на точном вычислении волновых функций как дискретного спектра, так и континуума, приводит к аккуратным сечениям фотоионизации, инвариантным по отношению к выбору электромагнитной калибровки и представления для гамильтониана и эффективного оператора взаимодействия, тогда как «адиабатическое приближение» и его разнообразные модификации, использовавшиеся в более ранних работах, дают результаты, сильно различающиеся в зависимости от подобного выбора и, таким образом, неточные (а иногда и неверные). Для частного случая покоящегося атома показано, что представление оператора взаимодействия «с координатой» при использовании адиабатического приближения приводит к достаточно точным значениям сечения фотоионизации в сильном магнитном поле, тогда как альтернативное представление «со скоростью» несовместимо с адиабатическим приближением.

В § 4.4.4 рассмотрено свободно-свободное поглощение электромагнитного излучения атомом водорода, движущимся в сильном магнитном поле, — иными словами, поглощение фотонов электроном и протоном, помещёнными

ми в сильное магнитное поле и взаимодействующими между собой посредством кулоновского потенциала, но не образующими связанного состояния. Впервые проведена корректная квантовомеханическая трактовка свободно-свободного поглощения в области частот фотонов, сравнимых с протонной циклотронной частотой или меньше неё. Показано соответствие полученных результатов известному классическому пределу. Одновременно продемонстрирована неприменимость приближения, ранее использовавшегося для расчётов сечений свободно-свободного поглощения в этой области частот четырьмя различными научными группами [11–15], занимавшимися моделированием атмосфер нейтронных звёзд с сильными магнитными полями.

Глава 5 посвящена влиянию сильного магнитного поля на термодинамические и кинетические свойства вещества в оболочках нейтронных звёзд.

В § 5.1 рассмотрено уравнение состояния полностью ионизованной термодинамически равновесной неидеальной плазмы и выписаны прикладные формулы для вычисления всех вкладов (идеальных и неидеальных, классических и квантовых) в свободную энергию такой плазмы в произвольном, в том числе квантующем, магнитном поле. Оригинальными и новыми по сравнению с немагнитным случаем в этом разделе являются интерполяционная формула для вклада электронного взаимодействия в произвольном магнитном поле (§ 5.1.3), трактовка поправок на конечную температуру для термодинамических функций сильно вырожденных электронов с учётом магнитного квантования, а также разработанный на основе приведённых формул комплекс программ для быстрого расчёта термодинамических функций полностью ионизованной плазмы при произвольных значениях плотности, магнитной индукции и температуры. Компьютерная программа, реализующая их вычисление, предоставлена в свободное пользование на специально созданной странице в Интернете⁴.

В § 5.2 рассмотрено кинетическое равновесие заселённостей ионных уровней Ландау в полностью ионизованной электрон-ионной плазме в сильном магнитном поле без предположения о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) и определены условия наличия ЛТР. В этом же параграфе рассмотрены радиативные переходы в водородной плазме в сильном магнитном поле, приводящие к образованию протонной циклотронной линии в спектре излучения, и оценена величина возможного влияния отклонений от ЛТР на излучательную способность плазмы в сверхсильном магнитном поле.

В § 5.3 разработана термодинамическая модель частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле. Разработанная модель является обобщением модели частично ионизованной водородной плазмы без

⁴<http://www.ioffe.ru/astro/EIP/>

магнитного поля, рассмотренной в главе 2. В данном параграфе учтены изменения энергий связи и геометрических размеров атомов и молекул в сильном магнитном поле, зависимость энергий связи атомов от состояния их движения, характеризуемого обобщённым импульсом, а также включено влияние квантующего магнитного поля на уравнение состояния полностью ионизованной компоненты согласно § 5.1. Вычислены относительные заселённости атомных уровней. Рассчитано ионизационное равновесие. Обсуждены и объяснены зависимости нейтральной фракции и заселённостей уровней от плотности ρ , температуры T и магнитной индукции B . В частности, показано, что увеличение B при фиксированных ρ и T всегда приводит к увеличению доли нейтральных атомов. Иное заключение, делавшееся в некоторых ранних работах (напр., [16]), объясняется неучётом эффектов движения атомов поперёк магнитных силовых линий. Рассчитаны основные термодинамические функции частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле. Рассмотрен плазменный фазовый переход, возникающий в определённом интервале плотностей при достаточно низкой температуре и являющийся полным аналогом известного гипотетического плазменного фазового перехода в немагнитном случае [17, 18]. Определена зависимость критической плотности и температуры для разделения фаз от магнитного поля. Показано, что образование конденсированной поверхности, предсказывавшееся в работах [19, 20], звёзд, и рассмотренный фазовый переход имеют одну и ту же природу, а их положения в зависимости от параметров плазмы (ρ , T , B) согласуются между собой в пределах теоретических неопределённостей. Результаты расчётов ионизационного равновесия и уравнения состояния, а также основанных на них расчётов росселандовых непрозрачностей для нормальных электромагнитных волн в частично ионизованной водородной плазме (расчёт непрозрачностей описан в главе 7 диссертации), представлены в виде общедоступных таблиц в Интернете, снабжённых программой для интерполяции по этим таблицам⁵.

Параграф 5.4 посвящён исследованию коэффициентов электронного переноса тепла и заряда в квантующем магнитном поле и выводу аналитических формул для расчёта этих коэффициентов при произвольной величине магнитного поля. Впервые коэффициенты проводимости, теплопроводности и термоэлектрический коэффициент для электронного переноса вдоль магнитных силовых линий в квантующем магнитном поле рассчитаны на основе инвариантного формализма квантовомеханической матрицы плотности, и на основе сравнения полученных результатов с формализмом функции плотности, использованным в предыдущих работах, сделан вывод о степе-

⁵<http://www.ioffe.ru/astro/NSG/Hmagnet/>

ни точности последнего и рекомендовано предпочтительное представление электронных волновых функций при его использовании. Предложены прикладные аналитические выражения для коэффициентов тензоров, описывающих электро- и теплоперенос в сильно вырожденной полностью ионизованной плазме для произвольных магнитных полей – как сильно и слабоквантующих, так и неквантующих, как с большим значением параметра Холла, так и с малым или умеренным его значением. На основе этих формул предложен простой способ расчёта кинетических коэффициентов в плазме с произвольной степенью вырожденности электронов. Комплекс компьютерных программ, реализующих эти аппроксимации, предоставлен в свободное пользование на специально созданной странице в Интернете⁶.

Глава 6 посвящена изучению тепловой структуры и эволюции нейтронных звёзд на основе результатов для уравнения состояния и коэффициентов теплопроводности плотной плазмы, представленных в главах 2, 3 и 5.

Параграф 6.1 носит, в основном, вводный характер. В нём выписаны дифференциальные уравнения теплового баланса, управляющие тепловой структурой и эволюцией звезды с учётом эффектов ОТО, а также кратко охарактеризованы две взаимно дополнительные компьютерные программы, разработанные в секторе теоретической астрофизики ФТИ им. А. Ф. Иоффе, для численного решения этих уравнений. Одна из этих программ, созданная О. Ю. Гнединым и Д. Г. Яковлевым [21] и впоследствии модифицированная при участии других сотрудников сектора, в том числе автора, реализует расчёт общего теплового баланса и эволюции звезды, а другая, разработанная автором на основе результатов, представленных в предшествующих главах диссертации, реализует расчёт тепловой структуры оболочек.

В § 6.2 на основе применения указанных программ с использованием коэффициентов теплопроводности, описанных в главе 3, изучается тепловая структура и остывание немагнитных нейтронных звёзд среднего возраста либо с теплоизолирующими оболочками, составленными полностью из железа и других тяжёлых элементов, близких к основному состоянию вещества в оболочках, либо с оболочками, верхние слои которых содержат более лёгкие элементы от Н до О, которые могут появиться в результате аккреции вещества на звезду после её рождения. Показано, что соотношение между эффективной температурой поверхности T_s и температурой на внутренней границе теплоизолирующего слоя T_b почти не зависит от выбора конкретного варианта модели аккрецированной оболочки, а в основном регулируется единственным параметром – массой ΔM слоя, состоящего из атомных ядер от водорода до кислорода. Главный результат этого параграфа состоит в

⁶<http://www.ioffe.ru/astro/conduct/>

том, что наличие оболочки из лёгких элементов приводит к существенному уменьшению температуры при заданных плотности и тепловом потоке и, соответственно, увеличению теплового потока и поверхностной температуры T_s (при фиксированном значении T_b), что объясняется более высокой электронной теплопроводностью плазмы, содержащей ионы с меньшим зарядом. Таким образом, присутствие поверхностных слоёв, состоящих из лёгких элементов, приводит к «просветлению» теплоизолирующей оболочки. Данный эффект оказывает влияние на кривые остывания: на более ранней нейтринной стадии остывания нейтронные звёзды с аккрецированными оболочками имеют более высокую, а на более поздней фотонной стадии – более низкую тепловую фотонную светимость, чем звёзды с железными оболочками. Аппроксимированы также рассчитанные зависимости T_s от величин T_b , ΔM и гравитационного ускорения g на поверхности звезды.

В § 6.3 описаны применения результатов расчётов тепловой структуры, полученных в § 6.2, к изучению тепловой релаксации коры молодых нейтронных звёзд, а также к интерпретации наблюдений нагревания и остывания рентгеновских транзиентов.

В § 6.4 с использованием коэффициентов теплопроводности, описанных в § 5.4, изучается тепловая структура и остывание нейтронных звёзд с сильными магнитными полями. Показано, что при реалистичных магнитных конфигурациях сильное, но не сверхсильное, магнитное поле приводит к незначительному уменьшению T_s при фиксированном T_b , а сверхсильное поле – к существенному увеличению тепловой светимости. Исследовано совместное влияние наличия аккрецированных оболочек и магнитного поля на тепловую структуру. Построены аппроксимационные выражения для рассчитанных зависимостей T_s от величин T_b , ΔM , g , B и от угла наклона магнитных силовых линий к поверхности.

В § 6.5 описаны применения результатов, полученных в § 6.4, к изучению тепловой структуры, энергетического баланса и светимости магнитаров в сравнении с наблюдательными данными.

Глава 7 посвящена, главным образом, вычислению оптических спектральных непрозрачностей нейтронных звёзд с сильными магнитными полями, причём основное внимание в ней уделено водородным атмосферам, так как только для водорода пока удалось полностью решить задачу о микроскопической структуре атома и вероятностях излучательных переходов при движении в сильном магнитном поле. В данной главе уравнение состояния водородной плазмы в сильном магнитном поле, полученное в главе 5, использовано совместно с сечениями поглощения, вычисленными в § 4.4, для расчёта спектральных непрозрачностей водородной плазмы в сильном магнитном по-

ле при физических условиях, характерных для атмосфер нейтронных звёзд. В конце главы вкратце описано применение рассчитанных непрозрачностей к моделированию спектров атмосфер нейтронных звёзд.

Атмосферы нейтронных звёзд с сильными магнитными полями ранее исследовались во многих работах на основе модели полностью ионизованной атмосферы (напр., [11–15]). Имелось также небольшое число работ, посвящённых моделям частично ионизованных атмосфер нейтронных звёзд с сильными магнитными полями [22, 23], но в них эффекты движения атомов либо не учитывались вовсе, либо учитывались весьма приближённо, на основе теории возмущений, которая применима только при малых значениях поперечного обобщённого импульса $K_{\perp} \ll K_{\text{ср}}$ и совсем не описывает децентрированные состояния. Такая трактовка может быть оправдана для тяжёлых атомов в сравнительно холодных атмосферах, но неприменима к лёгким атомам, для которых при $T \sim 10^6$ К и $B \gtrsim 10^{12}$ Гс изменение энергии за счёт движения в магнитном поле нельзя считать малым по сравнению с их энергией связи в состоянии покоя. Кроме того, даже в полностью ионизованных атмосферах эффекты совместного движения электронов и ядер оказываются важны при вычислении сечений поглощения, как показано в § 4.4.4 данной диссертации. В главе 7 описаны модели полностью и частично ионизованных водородных атмосфер с полным учётом эффектов движения частиц в магнитном поле при наличии кулоновского взаимодействия между ними, основой для чего служат результаты глав 4 и 5.

В § 7.1, носящем характер введения, представлены некоторые сведения и формулы, используемые в дальнейшем, большая часть которых известна из литературы.

В § 7.2 рассмотрены коэффициенты поглощения и излучения за счёт квантовых переходов между ионными уровнями Ландау в полностью ионизованной плазме. Сначала, в § 7.2.1, с использованием результатов § 4.4.4 для сечений свободно-свободных радиативных переходов, вычислены спектральные непрозрачности водородной плазмы в сильном магнитном поле с учётом протонного циклотронного и вакуумного резонансов в условиях ЛТР. Затем, в § 7.2.2, с применением результатов § 5.2 для статистического равновесия и населённостей ионных уровней Ландау, рассчитаны и обсуждены спектральные коэффициенты излучения такой плазмы вне рамок ЛТР. Показано, что даже сильные отклонения от ЛТР, которые осуществляются в атмосферах магнитаров, не оказывают существенного влияния на формирование протонной циклотронной линии. Физическая причина слабости такого влияния состоит в том, что главный вклад в формирование линии дают те процессы, которые не сопровождаются переходом иона на другой уровень Ландау.

В § 7.3 исследованы спектральные непрозрачности *частично ионизованной* водородной атмосферы нейтронной звезды с сильным магнитным полем. Подробно рассмотрено формирование особенностей дискретного и непрерывного спектров, включая основные механизмы спектрального уширения. Наиболее важным из них оказалось *магнитное уширение*, не имеющее аналогов в отсутствие магнитного поля и связанное с сильной зависимостью энергий связи, а также сил осцилляторов, от обобщённого импульса K_{\perp} атома в сильном магнитном поле. При условиях, характерных для атмосфер нейтронных звёзд, магнитное уширение приводит к размытию каждой спектральной линии в широкую полосу, а также к широкому размытию фотоионизационного скачка. Связанно-связанные и связанно-свободные радиативные переходы атомов водорода существенно увеличивают непрозрачности в интервале энергий $\hbar\omega \sim 0,03 - 3$ кэВ, на который обычно приходится значительная часть теплового излучения. На основе представленных оригинальных расчётов коэффициентов поглощения, с использованием соотношения Крамерса–Кронига автором рассчитан тензор диэлектрической восприимчивости и найдены векторы поляризации нормальных электромагнитных мод для частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле. В итоге рассчитаны суммарные непрозрачности для водородных атмосфер нейтронных звёзд с частично ионизованными замагниченными водородными атмосферами.

В § 7.4 кратко описаны метод и результаты расчёта излучательной способности конденсированной поверхности нейтронной звезды с сильным магнитным полем.

В § 7.5 представлены некоторые применения рассчитанных в диссертации термодинамических функций и непрозрачностей к моделированию спектров теплового излучения нейтронных звёзд с сильными магнитными полями и описана созданная на этой основе общедоступная база данных для такого моделирования NSMAX в составе пакета для моделирования рентгеновских спектров XSPEC. Успешным примером такого моделирования является интерпретация теплового спектра близкой нейтронной звезды RX J1856.5–3754 на основе модели ограниченной по глубине (оптически тонкой в определённом спектральном диапазоне) частично ионизованной водородной атмосферы с сильным магнитным полем.

В **Заключении** подытожены основные результаты работы и сформулированы благодарности.

3 Основные результаты и выводы

1. Рассчитаны тензоры электронной теплопроводности, проводимости, и термоэлектрический тензор в кулоновской жидкости и кулоновском кристалле в квантующем магнитном поле. Построено аналитическое описание этих тензоров в произвольном магнитном поле при сильной вырожденности электронов. Создан общедоступный комплекс компьютерных программ для расчёта этих тензоров при произвольной вырожденности электронов.
2. Развито аналитическое описание уравнения состояния неидеальной электрон-ионной плазмы в произвольном (в том числе квантующем) магнитном поле. Разработан общедоступный комплекс компьютерных программ для вычисления термодинамических функций такой плазмы.
3. Исследованы квантовомеханические свойства атома водорода в сильном магнитном поле, характерном для нейтронных звёзд ($B \sim 10^{12} - 10^{15}$ Гс) с учётом возможного движения центра масс (что эквивалентно рассмотрению атома в скрещенных полях – сильном магнитном и произвольном электрическом). Рассчитаны и изучены следующие характеристики:
 - энергии связи и характерные особенности волновых функций связанных состояний;
 - силы осцилляторов для излучательных переходов между этими состояниями;
 - поведение этих характеристик при изменении магнитного поля или обобщённого импульса центра масс при движении поперёк поля; особенности, связанные с антипересечениями уровней энергии;
 - волновые функции непрерывного спектра атома (в том числе движущегося) в сильном магнитном поле и их характерные особенности; метастабильные состояния и их автоионизация;
 - сечения фотоионизации и их характерные особенности, связанные, в том числе, с автоионизацией, с антипересечениями уровней при движении атома в магнитном поле, с эффектами недипольности.

Построены аналитические выражения для астрофизических приложений, в широком диапазоне параметров плазмы аппроксимирующие поведение основных квантовомеханических характеристик атома в зависимости от магнитной индукции и/или обобщённого импульса атома. Показано, что учёт эффектов движения в сильном магнитном поле радикально меняет общий спектр поглощения по сравнению с тем случаем, когда рассматривается только покоящийся атом.

4. Построена модель свободной энергии частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле. В широком диапазоне плотностей при температурах $T \sim 10^5 - 10^7$ К, типичных для внешних оболочек нейтронных звёзд, выполнены расчёты и созданы комплекты таблиц термодинамических функций, ионных населённостей и росселандовых непрозрачностей, используемые при моделировании водородных атмосфер нейтронных звёзд.
5. Найдены явные аналитические выражения для коэффициентов упругости жидкокристаллической мантии нейтронной звезды.
6. Построены аналитические формулы для двух широко используемых унифицированных (то есть построенных на основе единой модели для любых плотностей) уравнений состояния внутренней коры и ядра нейтронной звезды.
7. Исследованы квантовые переходы в непрерывном спектре плазмы, помещённой в квантующее магнитное поле:
 - вычислены спектральные коэффициенты поглощения электромагнитных волн при переходах в непрерывном спектре квантовомеханических состояний электрон-протонной плазмы с учётом магнитного квантования движения как электронов, так и протонов;
 - вычислены скорости столкновительных и излучательных переходов между уровнями Ландау в электрон-ионной плазме, условия существования локального термодинамического равновесия (ЛТР) в такой плазме, а также расчёт её спектральных непрозрачностей и излучательной способности вне рамок ЛТР.

Найдены приближённые аналитические выражения для расчёта указанных спектральных коэффициентов поглощения и скоростей переходов.

8. Осуществлён расчёт тензора поляризуемости частично ионизованной водородной плазмы в сильном магнитном поле и векторов поляризации нормальных электромагнитных волн в такой плазме.
9. Исследована тепловая структура нейтронных звёзд с магнитными полями от нулевого до сверхсильного. Изучен эффект «просветления» теплоизолирующей оболочки нейтронной звезды при наличии аккрецированного слоя или сверхсильного магнитного поля. Предсказаны следствия этих эффектов для тепловой эволюции обычных нейтронных звёзд и магнитаров.
10. Исследованы и рассчитаны спектральные коэффициенты непрозрачности для частично ионизованных водородных атмосфер нейтронных звёзд

с сильными магнитными полями. Произведено моделирование таких атмосфер. Создана общедоступная база моделей спектров излучения водородных атмосфер нейтронных звёзд с сильными магнитными полями. На примерах сравнения модельных спектров с результатами наблюдений показана перспективность использования разработанных моделей при интерпретации теплового излучения нейтронных звёзд.

Публикации по теме диссертации

1. Haensel P., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. *Neutron Stars 1: Equation of State and Structure*. – New York: Springer, 2007. – 643 pages.
2. Bulik T., Pavlov G., Potekhin A. “Ionization equilibrium of hydrogen in strong magnetic field with allowance for pressure effects” // *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **24**, 1133 (1992)
- 3.* Potekhin A.Yu., Pavlov G.G. “Photoionization of the hydrogen atom in strong magnetic fields” // *Astrophys. J.*, **407**, 330–41 (1993)
4. Shibano Yu.A., Zavlin V.E., Pavlov G.G., Ventura J., Potekhin A.Yu. “Model atmospheres of magnetic neutron stars” // *Physics of Isolated Pulsars* / Eds. K. Van Riper, C. Ho, & R. Epstein. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. – P. 174–181
- 5.* Potekhin A.Y. “Structure and radiative transitions of the hydrogen atom moving in a strong magnetic field” // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **27**, No. 6, 1073–1090 (1994)
- 6.* Bezchastnov V.G., Potekhin A.Y. “Transitions between shifted Landau states and photoionization of the hydrogen atom moving in a strong magnetic field” // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **27**, 3349–61 (1994)
7. Pavlov G.G., Potekhin A.Yu. “Photoionization of the hydrogen atom in a strong magnetic field” // *Astron. Astrophys. Transactions*, **4**, 261–267 (1994)
8. Bezchastnov V.G., Potekhin A.Y. “Modified adiabatic approximation for a hydrogen atom moving in a magnetic field” // *The Equation of State in Astrophysics* / Eds. G. Chabrier and E. Shtatzman. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994. – P. 555–559.
- 9.* Pavlov G.G., Potekhin A.Y. “Bound-bound transitions in strongly magnetized hydrogen plasma” // *Astrophys. J.*, **450**, 883–95 (1995)
- 10.* Potekhin A.Y. “Electron conduction along quantizing magnetic fields in neutron star crusts. I. Theory” // *Astron. Astrophys.*, **306**, 999–1010 (1996)

- 11.* Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. “Electron conduction along quantizing magnetic fields in neutron star crusts. II. Practical formulae” // *Astron. Astrophys.*, **314**, 341–352 (1996)
- 12.* Potekhin A.Y. “Ionization equilibrium of hot hydrogen plasma” // *Physics of Plasmas*, **3**, 4156–4165 (1996)
- 13.* Potekhin A.Y., Pavlov G.G., Ventura J. “Ionization of the hydrogen atom in strong magnetic fields” // *Astron. Astrophys.*, **317**, 618–629 (1997)
- 14.* Chabrier G., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. “Cooling neutron stars with accreted envelopes” // *Astrophys. J.*, **477**, L99–L102 (1997)
- 15.* Potekhin A.Y., Pavlov G.G. “Photoionization of hydrogen in atmospheres of magnetic neutron stars” // *Astrophys. J.*, **483**, 414–425 (1997)
- 16.* Potekhin A.Y., Chabrier G., Yakovlev D.G. “Internal temperatures and cooling of neutron stars with accreted envelopes” // *Astron. Astrophys.*, **323**, 415–428 (1997)
- 17.* Pethick C.J., Potekhin A.Y. “Liquid crystals in the mantles of neutron stars” // *Phys. Lett. B*, **427**, 7–12 (1998)
- 18.* Potekhin A.Y. “Hydrogen atom moving across a strong magnetic field: analytical approximations” // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **31**, 49–63 (1998)
- 19.* Chabrier G., Potekhin A.Y. “Equation of state of fully ionized electron-ion plasmas” // *Phys. Rev. E*, **58**, 4941–4949 (1998)
- 20.* Baiko D.A., Kaminker A.D., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. “Ion structure factors and electron transport in dense Coulomb plasmas” // *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 5556–5559 (1998)
21. Shibanov Yu.A., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G., Zavlin V.E. “Evolution of thermal structure and radiation spectrum of cooling neutron stars” // *The Many Faces of Neutron Stars* / Eds. M.A. Alpar, R. Buccheri, J. van Paradijs. – Dordrecht: Kluwer, 1998. – P. 553–559.
22. Ventura J., Potekhin A.Y., Pavlov G.G. “Atomic ionization and opacities in pulsar atmospheres” // *The Many Faces of Neutron Stars* / Eds. M.A. Alpar, R. Buccheri, J. van Paradijs. – Dordrecht: Kluwer, 1998. – P. 561–566.
23. Potekhin A.Y. “Hydrogen atoms in neutron star atmospheres: analytical approximations for binding energies” // *Atoms and Molecules in Strong External Fields*, / Eds. P. Schmelcher, W. Schweizer. – New York: Plenum, 1998. – P. 49–54.

24. Potekhin A.Y., Shibano Yu.A., Ventura J. “Equation of state and opacities for hydrogen atmospheres of strongly magnetized cooling neutron stars” // *Neutron Stars and Pulsars* / Eds. N. Shibasaki, N. Kawai, S. Shibata, T. Kifune. – Tokyo: Universal Academy Press, 1998. – P. 161–164.
- 25.* Kaminker A.D., Pethick C.J., Potekhin A.Y., Thorsson V., Yakovlev D.G. “Neutrino-pair bremsstrahlung by electrons in neutron star crusts” // *Astron. Astrophys.*, **343**, 1009–1024 (1999)
- 26.* Potekhin A.Y., Baiko D.A., Haensel P., Yakovlev D.G. “Transport properties of degenerate electrons in neutron star envelopes and white dwarf cores” // *Astron. Astrophys.*, **346**, 345–353 (1999)
- 27.* Potekhin A.Y., Chabrier G., Shibano Yu.A. “Partially ionized hydrogen plasma in strong magnetic fields” // *Phys. Rev. E*, **60**, 2193–2208 (1999)
- 28.* Potekhin A.Y. “Electron conduction in magnetized neutron star envelopes” // *Astron. Astrophys.*, **351**, 787–797 (1999)
29. Potekhin A.Y., Chabrier G., Shibano Yu.A., Ventura J. “Ionization equilibrium and equation of state of hydrogen plasmas in strong magnetic fields” // *Contrib. Plasma Phys.*, **39**, 101–104 (1999)
- 30.* Potekhin A.Y., Chabrier G. “Equation of state of fully ionized electron-ion plasmas. II. Extension to relativistic densities and to the solid phase” // *Phys. Rev. E*, **62**, 8554–8563 (2000)
31. Potekhin A., Chabrier G., Shibano Yu. “Partially ionized layers of accreted envelopes of weakly and strongly magnetized neutron stars” // *Pulsar Astronomy – 2000 and beyond* / Proc. IAU Coll. №177 (30.08–03.09.99, Bonn, Germany), eds. M. Kramer, N. Wex, R. Wielebinski. – ASP Conference Series, V. **202**. – San Francisco: ASP, 2000. – P. 619–620.
32. Potekhin A. “Heat and charge transport in envelopes of weakly and strongly magnetized neutron stars” // *Pulsar Astronomy – 2000 and beyond* / Proc. IAU Coll. №177 (30.08–03.09.99, Bonn, Germany), eds. M. Kramer, N. Wex, R. Wielebinski. – ASP Conference Series, V. **202**. – San Francisco: ASP, 2000. – P. 621–622
- 33.* Potekhin A.Y., Turbiner A.V. “Hydrogen atom in a magnetic field: The quadrupole moment” // *Phys. Rev. A*, **63**, 065402 [4 pages] (2001)
- 34.* Gnedin O.Y., Yakovlev D.G., Potekhin A.Y. “Thermal relaxation in young neutron stars” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **324**, 725–737 (2001)
- 35.* Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. “Thermal structure and cooling of neutron stars with magnetized envelopes” // *Astron. Astrophys.*, **374**, 213–226

(2001)

- 36.* Baiko D.A., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G. “Thermodynamic functions of harmonic Coulomb crystals” // *Phys. Rev. E*, **64**, 057402 [4 pages] (2001)
37. Ventura J., Potekhin A.Y. “Neutron star envelopes and thermal radiation from the magnetic surface” // *The Neutron Star – Black Hole Connection* / NATO ASI Ser. C. V. 567. / Eds. C. Kouveliotou, J. Ventura, E. van den Heuvel. – Dordrecht: Kluwer, 2001. – 393–414.
38. Yakovlev D., Gnedin O., Potekhin A. “Strongly coupled Coulomb and nuclear plasma in inner envelopes of neutron stars” // *Contrib. Plasma Phys.*, **41**, 227–230 (2001)
39. Potekhin A.Y., Chabrier G., Yakovlev D.G. “Coulomb plasmas in outer envelopes of neutron stars” // *Contrib. Plasma Phys.*, **41**, 231–234 (2001)
- 40.* Potekhin A.Y., Chabrier G., Gilles D. “Electric microfield distributions in electron-ion plasmas” // *Phys. Rev. E*, **65**, 036412 [12 pages] (2002)
- 41.* Chabrier G., Douchin F., Potekhin A.Y. “Dense astrophysical plasmas” // *J. Phys.: Condensed Matter*, **14**, 9133–9139 (2002)
42. Yakovlev D.G., Gnedin O.Y., Kaminker A.D., Potekhin A.Y. “Cooling of superfluid neutron stars” // *Neutron Stars, Pulsars and Supernova Remnants* / Proc. 270. Heraeus Seminar (Bad Honnef, Jan. 21–25, 2002) / Eds. W. Becker, H. Lesch, J. Trümper, MPE Report 278. – Garching: MPE, 2002. – P. 287–299
- 43.* Potekhin A.Y., Chabrier G. “Equation of state and opacities for hydrogen atmospheres of neutron stars with strong magnetic fields” // *Astrophys. J.*, **585**, 955–974 (2003)
- 44.* Potekhin A.Y., Yakovlev D.G., Chabrier G., Gnedin O.Y. “Thermal structure and cooling of superfluid magnetic neutron stars” // *Astrophys. J.*, **594**, 404–418 (2003)
- 45.* Ho W.C.G., Lai D., Potekhin A.Y., Chabrier G. “Atmospheres and spectra of strongly magnetized neutron stars – III. Partially ionized hydrogen models” // *Astrophys. J.*, **599**, 1293–1301 (2003)
- 46.* Potekhin A.Y., Chabrier G. “Equation of state and opacities for hydrogen atmospheres of magnetars” // *Astrophys. J.*, **600**, 317–323 (2004)
- 47.* Yakovlev D.G., Levenfish K.P., Potekhin A.Y., Gnedin O.Y., Chabrier G. “Thermal states of coldest and hottest neutron stars in soft X-ray transients” // *Astron. Astrophys.*, **417**, 169–179 (2004)
- 48.* Potekhin A.Y., Lai D., Chabrier G., Ho W.C.G. “Electromagnetic

- polarization in partially ionized plasmas with strong magnetic fields and neutron star atmosphere models” // *Astrophys. J.*, **612**, 1034–1043 (2004)
- 49.* Haensel P., Potekhin A.Y. “Analytical representations of unified equations of state of neutron-star matter” // *Astron. Astrophys.*, **428**, 191–197 (2004)
50. Yakovlev D.G., Gnedin O.Y., Kaminker A.D., Levenfish K.P., Potekhin A.Y. “Neutron star cooling: Theoretical aspects and observational constraints” // *Adv. Space Res.*, **33**, 523–530 (2004)
51. Ho W.C.G., Lai D., Potekhin A.Y., Chabrier G. “Atmospheres of magnetized neutron stars: Vacuum polarization and partially ionized models” // *Adv. Space Res.*, **33**, 537–541 (2004)
- 52.* van Adelsberg M., Lai D., Potekhin A.Y., Arras P. “Radiation from condensed surface of magnetic neutron stars” // *Astrophys. J.*, **628**, 902–913 (2005)
- 53.* Potekhin A.Y., Massacrier G., Chabrier G. “Equation of state for partially ionized carbon at high temperatures” // *Phys. Rev. E*, **72**, 046402 [8 pages] (2005)
- 54.* Potekhin A.Y., Urpin V., Chabrier G. “The magnetic structure of neutron stars and their surface-to-core temperature relation” // *Astron. Astrophys.*, **443**, 1025–1028 (2005)
55. Yakovlev D.G., Gnedin O.Y., Gusakov M.E., Kaminker A.D., Levenfish K.P., Potekhin A.Y. “Neutron star cooling” // *Nucl. Phys. A*, **752**, 590–599 (2005)
56. Potekhin A.Y., Lai D., Chabrier G., Ho W.C.G. “Partially ionized atmospheres of neutron stars with strong magnetic fields” // *Adv. Space Res.*, **35**, 1158–1161 (2005)
57. van Adelsberg M., Lai D., Potekhin A. “Radiation from condensed surface of magnetic neutron stars” // *The Electromagnetic Spectrum of Neutron Stars* / Eds. A. Baykal, S.K. Yerli, S.C. Inam, S. Grebenev / NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. – V. 210, pt.IV. – Berlin: Springer, 2005. – P. 141–144
58. Ho W.C.G., Lai D., Potekhin A.Y., Chabrier G. “Modeling Spectral Features from Isolated Neutron Stars” // *The Electromagnetic Spectrum of Neutron Stars* / Eds. A. Baykal, S.K. Yerli, S.C. Inam, S. Grebenev / NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. – V. 210, pt.IV. – Berlin: Springer, 2005. – P. 185–188
- 59.* Chabrier G., Saumon D., Potekhin A.Y. “Dense plasmas in astrophysics:

from giant planets to neutron stars” // *J. Phys. A: Math. Gen.*, **39**, 4411–4419 (2006)

- 60.* Potekhin A.Y., Chabrier G., Lai D., Ho W.C.G., van Adelsberg M. “Nonideal strongly magnetized plasmas of neutron stars and their electromagnetic radiation” // *J. Phys. A: Math. Gen.*, **39**, 4453–4458 (2006)
- 61.* Kaminker A.D., Yakovlev D.G., Potekhin A.Y., Shibazaki N., Shternin P.S., Gnedin O.Y. “Magnetars as cooling neutron stars with internal heating” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **371**, 477–483 (2006)
62. Barriga-Carrasco M.D., Potekhin A.Y. “Proton stopping in plasmas considering e^-e^- collisions” // *Laser and Particle Beams*, **24**, 553–558 (2006)
63. Ho W.C.G., Chang P., Kaplan D.L., Mori K., Potekhin A.Y., van Adelsberg M. “Modeling atmosphere emission from magnetic neutron stars” // *Adv. Space Res.*, **40**, 1432–1440 (2007)
64. Ho W.C.G., Kaplan D.L., Chang P., van Adelsberg M., Potekhin A.Y. “Thin magnetic hydrogen atmospheres and the neutron star RX J1856.5–3754” // *Astrophys. Space Sci.*, **308**, 279–286 (2007)
- 65.* Ho W.C.G., Kaplan D.L., Chang P., van Adelsberg M., Potekhin A.Y. “Magnetic hydrogen atmosphere models and the neutron star RX J1856.5–3754” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **375**, 821–830 (2007)
- 66.* Potekhin A.Y., Lai D. “Statistical equilibrium and ion cyclotron absorption/emission in strongly magnetized plasmas” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **376**, 895–906 (2007)
- 67.* Cassisi S., Potekhin A.Y., Pietrinferni A., Catelan M., Salaris M. “Updated electron-conduction opacities: the impact on low-mass stellar models” // *Astrophys. J.*, **661**, 1094–1104 (2007)
- 68.* Shternin P.S., Yakovlev D.G., Haensel P., Potekhin A.Y., “Neutron star cooling after deep crustal heating in the X-ray transient KS 1731-260” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **382**, L43–L47 (2007)
69. Kaminker A.D., Yakovlev D.G., Potekhin A.Y., Shibazaki N., Shternin P.S., Gnedin O.Y. “Cooling of magnetars with internal layer heating” // *Astrophys. Space Sci.*, **308**, 423–430 (2007)
70. Potekhin A.Y., Chabrier G., Yakovlev D.G. “Heat blanketing envelopes and thermal radiation of strongly magnetized neutron stars” // *Astrophys. Space Sci.*, **308**, 353–361 (2007)
71. Kaminker A.D., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G., Chabrier G. “Heating and

- cooling of magnetars with accreted envelopes” // *Physics of Neutron Stars - 2008: Abstracts* / Eds. D.A. Varshalovich, A.I. Chugunov, A.Y. Potekhin, D.G. Yakovlev. – St. Petersburg: SPbSPU, 2008. – P. 46
72. Potekhin A.Y. “Physics of neutron star surface layers and their thermal radiation” // *AIP Conf. Proc.*, **968**, 121–128 (2008)
73. Yakovlev D.G., Gnedin O.Y., Kaminker A.D., Potekhin A.Y. “Theory of cooling neutron stars versus observations” // *AIP Conf. Proc.*, **983**, 379–387 (2008)
74. Shternin P.S., Yakovlev D.G., Haensel P., Potekhin A.Y., ”Neutron star cooling after deep crustal heating in the X-ray transient KS 1731-260” // *Physics of Neutron Stars - 2008: Abstracts* / Eds. D.A. Varshalovich, A.I. Chugunov, A.Y. Potekhin, D.G. Yakovlev. – St. Petersburg: SPbSPU, 2008. – P. 81
- 75.* Medin Z., Lai D., Potekhin A.Y. “Radiative transitions of the helium atom in highly magnetized neutron star atmospheres” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **383**, 161–172 (2008)
- 76.* Ho, W.C.G., Potekhin A.Y., Chabrier G. “Model X-ray spectra of magnetic neutron stars with hydrogen atmospheres” // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **178**, 102–109 (2008)
77. Suleimanov V., Potekhin A., Werner K. “Models of magnetized neutron stars atmospheres” // *37th COSPAR Scientific Assembly* (13–20 July 2008, Montreal, Canada), abstract E11-0020-08. – Montreal: COSPAR, 2008. – P. 3079
- 78.* Potekhin A.Y., Chabrier G., Rogers F.J. “Equation of state of classical Coulomb plasma mixtures ” // *Phys. Rev. E*, **79**, 016411 [6 pages] (2009)
- 79.* Kaminker A.D., Potekhin A.Y., Yakovlev D.G., Chabrier G., ”Heating and cooling of magnetars with accreted envelopes” // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **395**, 2257–2267 (2009).
- 80.* Suleimanov V., Potekhin A.Y., Werner K. “Models of magnetized neutron star atmospheres: thin atmospheres and partially ionized hydrogen atmospheres with vacuum polarization” // *Astron. Astrophys.*, **500**, 891–899 (2009)

*Звёздочками помечены статьи в журналах, входящих в «Перечень научных журналов и изданий, в которых могут быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора и кандидата наук», утверждённый решениями Президиума ВАК.

Литература, цитированная в автореферате

- [1] Tsuruta S., Cameron A.G.W. // *Canad. J. Phys.* **44**, 1863–1894 (1966)
- [2] Яковлев Д.Г., Левенфиш К.П., Шибанов Ю.А. // *Успехи физ. наук*, **169**, 826–868 (1999)
- [3] Yakovlev D.G., Pethick C.J. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **42**, 169–210 (2004)
- [4] Zavlin V.E. // *Neutron Stars and Pulsars*, / Ed. W. Becker. – New York: Springer, 2009. – P. 181–211
- [5] Haberl F. // *Astrophys. Space Sci.*, **308**, 181–190 (2007)
- [6] van Kerkwijk M.H., Kaplan D.L. // *Astrophys. Space Sci.*, **308**, 191–201 (2007)
- [7] Kaspi V. // *Young Neutron Stars and Their Environments* / Ed. F. Camilo, B. M. Gaensler. – San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 2004. – P. 231–238
- [8] Фортгов В.Е. // *Успехи физ. наук*, **177**, 347–368 (2007)
- [9] Pandharipande V.R., Ravenhall D.G. // *Nuclear Matter and Heavy Ion Collisions* / Ed. M. Soyeur, H. Flocard, B. Tamain, & M. Porneuf – Dordrecht: Reidel, 1989. – P. 103–132
- [10] Douchin F., Haensel P., // *Astron. Astrophys.*, **380**, 151–167 (2001)
- [11] Pavlov G.G., Shibano Yu.A., Zavlin V.E., Meyer R.D. // *The Lives of the Neutron Stars* / Ed. M. A. Alpar, Ü. Kiziloğlu, J. van Paradijs. – Dordrecht: Kluwer, 1995. – P. 71–90
- [12] Zane S., Turolla R., Treves A. // *Astrophys. J.*, **537**, 387–395 (2000)
- [13] Zane S., Turolla R., Stella L., Treves A. // *Astrophys. J.*, **560**, 384–389 (2001)
- [14] Özel, F. // *Astrophys. J.*, **563**, 276–288 (2001)
- [15] Ho W.C.G., Lai D. // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **327**, 1081–1096 (2001)
- [16] Херсонский В.К. // *Астрон. журн.*, **64**, 433–436 (1987)
- [17] Landau L.D., Zeldovitch Ya.B. // *Acta Physicochim. (URSS)* **18**, 194 (1943)
- [18] Норман Г.Э., Старостин А.Г. // *Теплофиз. выс. темп.*, **6**, 410 (1968)
- [19] Lai D., Salpeter E.E. // *Astrophys. J.*, **491**, 270–285 (1997)
- [20] Lai D. // *Rev. Mod. Phys.* **73**, 629–661 (2001)
- [21] Гнедин О.Ю., Яковлев Д.Г. // *Письма в Астрон. журн.*, **19**, 280–287 (1993).
- [22] Rajagopal M., Romani R., Miller M.C. // *Astrophys. J.*, **479**, 347–356 (1997).
- [23] Mori K., Ho W.C.G. // *Mon. Not. R. astr. Soc.*, **377**, 905–919 (2007).