

На правах рукописи

Подпись

Глушихина Мария Владимировна

**Вычисление кинетических коэффициентов
произвольно вырожденных электронов в
замагниченном плотном веществе**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской Академии Наук.*

Научный руководитель: *д.ф.-м.н.,
профессор,
Бисноватый-Коган Геннадий Семенович*

Официальные оппоненты: *д.ф.-м.н.,
профессор,
Баско Михаил Михайлович (ИПМ им. М.В.
Келдыша РАН)*

*д.ф.-м.н.,
Шематович Валерий Иванович (ИНАСАН)*
Ведущая организация: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт
имени П.Н.Лебедева Российской Академии
Наук (ФИАН)*

Защита состоится «_____» _____ 2020 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.03 при *Институте космических исследований Российской Академии Наук*, расположенном по адресу: *г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *ИКИ РАН*.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.,

Подпись

Цупко О. Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Нейтронные звезды и белые карлики - иногда их объединяют под общим названием "вырожденные звёзды", принадлежат к числу наиболее удивительных объектов во Вселенной. Они имеют малые радиусы, приблизительно 10 км и 1000 км соответственно, но при этом масса нейтронной звёзды сравнима с солнечной. Вещество нейтронных звёзд сжато до очень больших плотностей, вплоть до 10^{14} г/см³ в центральных областях, возможно, и более. Плотность вещества белых карликов меньше, может достигать 10^8 г/см³. Кроме экстремальных плотностей у вырожденных звёзд наблюдаются одни из самых больших значений магнитных полей во Вселенной - до 10^{15} Гс у поверхности нейтронных звёзд, и около 10^8 Гс у поверхности белых карликов. Вырожденные звёзды образуются на конечной стадии эволюции звезд. При гравитационном коллапсе ядер обычных звезд с массой $M \geq 8M_{\odot}$ вещество центральных слоев сжимается до ядерных плотностей и нейтронизируется. При образовании нейтронной звезды выделяется огромная энергия, примерно 20% энергии-массы покоя звезды, но почти вся она выделяется в виде нейтрино [1, 2, 3]. Коллапс прекращается, когда в центре формируется стабильная нейтронная звезда. Общее число нейтронных звезд в галактике оценивается в $10^8 - 10^9$, из них радиопульсаров, то есть молодых нейтронных звезд - порядка 10^5 [4]. В звёздах с массой до $8 M_{\odot}$ термоядерная эволюция ядра с массой меньше критической массы Чандрасекара не доходит до образования элементов группы железа. В зависимости от начальной массы, она останавливается на стадиях гелиевого или углеродно-кислородного вырожденного ядра. Такое ядро постепенно остывает и превращается в белый карлик. Предполагается, что белые карлики составляют от 3% до 10% от всего звездного населения нашей галактики [5].

Внутреннее строение нейтронных звёзд и белых карликов известно с большой степенью неопределенности из-за отсутствия лабораторных данных о свойствах вещества в сверхплотном состоянии. Специфические свойства ионизированного газа при сверхвысоких плотностях определяются вырождением. Из-за принципа Паули в вырожденном газе скорости электронов даже вблизи абсолютного нуля остаются большими, следовательно давление вырожденного газа мало зависит от температу-

ры.

Наблюдательные проявления белых карликов ярко видны в составе тесной двойной системы, где под действием приливных сил вещество перетекает со звезды-компаньона, что приводит к увеличению массы белого карлика. При приближении к чандрасекаровскому пределу возникает термоядерное горение, приводящее к взрыву. Такие системы называются взрывными или катаклизмическими переменными. Одиночные удалённые белые карлики наблюдать достаточно трудно из-за их малой светимости $L_{wd} \sim 10^{-3}L_{\odot}$ [5].

Наблюдательные проявления нейтронных звезд многообразны. Раньше всех, в 60-х годах прошлого века, были обнаружены классические радиопульсары и аккрецирующие нейтронные звезды в тесных двойных системах. Если в тесной двойной системе у нейтронной звезды магнитное поле $> 10^{10}$ Гс – наблюдается феномен рентгеновского пульсара. Если магнитное поле на НЗ меньше 10^{10} Гс перетекшее вещество накапливается и, при превышении некоторого критического значения плотности и температуры, на поверхности НЗ происходит термоядерный взрыв. Такие взрывы наблюдаются в виде вспыхивающих рентгеновских источников или барстеров [6].

Позднее были открыты различные типы одиночных нейтронных звёзд, такие как: мягкие гамма повторители (SGR), аномальные рентгеновские пульсары (AXPs), центральные компактные объекты в остатках сверхновых (CCOs in SNRs), вращающиеся радио транзиенты (RRATs) и рентгеновские одиночные нейтронные звёзды XDINS, у последних есть ещё и неформальное название - Великолепная семёрка (Magnificent Seven - M7)[7, 8, 9].

Первый объект из Великолепной семерки, RXJ1856-3754 был открыт 1996 году [10]. В дальнейшем были открыты: RX J1605.3+3249, RBS1223, RX J0806.4-4132, RX J0720.4-3125, RX J0420.0-5022, 1RXS J214303.7+065419 [11]. Эти звёзды расположены недалеко друг от друга, на расстоянии нескольких сотен парсек, их возраст составляет несколько сотен тысяч лет, они излучают в мягком рентгеновском диапазоне спектра из-за остывания их поверхности и являются радио-тихими. Среди всех нейтронных звёзд с тепловым излучением только M7 обладают чистым чёрнотельным спектром, без добавления излучения от аккреционного диска, окружающей туманности или остатка сверхновой[12, 13]. Все объекты из XDINS были обнаружены спутником ROSAT и, несмотря на усиленные поиски, с 2001 года не бы-

ло обнаружено новых кандидатов. Но в 2011 году, по данным наблюдений телескопа Chandra, был обнаружен объект PSR J0726-2612, который подходил по параметрам для XDINS, и позднее, данные с XMM-Newton показали, что пульсар не только является XDINS, но еще и обладает радиозлучением.[14]

Наблюдения теплового излучения от поверхности нейтронной звезды крайне важны, они могут предоставить информацию о массе и радиусе звезды, что необходимо для определения уравнения состояния её материи, химическом составе внешней оболочки, распределении температуры по поверхности и конфигурации магнитного поля [15]. Анализ теплового излучения M7 в рентгеновском диапазоне указывает на периодические изменения [16], причиной которых является анизотропное распределение температуры по поверхности звезды. В широкой области от оптического до рентгеновского диапазона спектр излучения таких НЗ не может быть представлен как спектр излучения с поверхности с одной температурой. Анизотропия температуры встречается в областях с низкой и средней плотностью, таких как твердая кора, где сложная геометрия магнитного поля могла вызвать магнитотепловую эволюцию. В некоторых предельных случаях при достаточно сильном магнитном поле анизотропия может существовать в плохо изученной внутренней области, где за отток энергии отвечают также процессы с участием нейтрино [17].

Для того, чтобы описать тепловое излучение и понять процессы влияющие на распределение заряда и тепла по поверхности нейтронной звезды необходимо знать свойства переноса в её веществе. В зависимости от состояния вещества внутри НЗ выделяются четыре основные зоны: внешняя и внутренняя кора, и внешнее и внутреннее ядро [18]. Ширина внешней коры 300 – 600 м, плотность $\rho < \rho_{nd} = 4 * 10^{11}$ г/см³. Величина ρ_{nd} соответствует плотности, при которой в равновесии появляются свободные нейтроны. Внешняя кора состоит из приповерхностного слоя невырожденных электронов, которые становятся вырожденными при продвижении глубже к центру звезды, и ионов. Ионы обычно рассматриваются как невырожденные. Они могут находиться в газообразном состоянии, могут формировать кулоновскую жидкость или кулоновский кристалл [19]. Кристаллическая структура кулоновских кристаллов отличается от кристаллов, которые находятся на Земле. В земных кристаллах главный вклад в упругость вносит взаимодействие между ионами и атомами, вклад свободных электронов в давление существенно меньше. В коре нейтронной звезды

упругость электронов в сотню раз превосходит упругость кристаллической решетки. Прочность решетки такого кристалла мала, и она легко ломается при внешнем воздействии[20].

Внутренняя кора, с толщиной от 500 до 800 метров от поверхности, где плотность вещества лежит в диапазоне $\rho_{nd} \leq \rho \leq 0.5\rho_0$, где $\rho_0 = 2.8 * 10^{14}$ г/см³ - это ядерная плотность. Во внутренней коре электроны находятся в состоянии ультрарелятивистского вырожденного газа, ядра обогащены нейтронами. Свободные нейтроны образуют сильно вырожденную Ферми-жидкость.

Во внешнем ядре плотность вещества лежит в диапазоне от половины до двух ρ_0 , предполагается, что оно представляет собой однородную материю из сильно вырожденных протонов, нейтронов, электронов. Нуклоны образуют неидеальные ферми-жидкости, а электроны - идеальные ферми-газы. В массивных нейтронных звёздах может быть и внутреннее ядро, в котором предполагается плотность от двух до двадцати ρ_0 . Состав внутреннего ядра достоверно не известен. [18]

Данная диссертационная работа посвящена расчёту кинетических коэффициентов в произвольно вырожденном, замагниченном, плотном веществе, которое входит в состав внешней и внутренней коры нейтронной звезды, а так же центральных слоёв белых карликов. Потоки тепла и плотности токов в оболочке нейтронных звёзд определяются коэффициентами теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта. Теплопроводность — основная величина, необходимая для вычисления взаимосвязи между внутренней температурой нейтронной звезды и эффективной температурой на ее поверхности. Связь между этими величинами влияет на тепловую эволюцию нейтронной звезды и ее радиационные спектры. Диффузия необходима для вычисления распределения токов, что позволит исследовать геометрию магнитного поля на поверхности звезды и, возможно, глубже в коре.

Классические методы кинетической теории газов были разработаны Максвеллом, Больцманом, Гильбертом, Энскогом и Чепменом. Эти методы представлены в монографии Чепмена и Каулинга [21]. Они основаны на решении уравнения Больцмана методом последовательных приближений. В качестве нулевого приближения берется термодинамически равновесная функция распределения: для невырожденного газа — распределение Максвелла, для случая, когда вырождение важно, — распределение Ферми-Дирака. Равновесная функция распределения не дает точное решение

уравнения Больцмана при наличии неоднородности. Согласно методам, предложенным в [21], необходимо искать решение уравнения Больцмана в первом приближении как разложение по полиномам Сонина (Лагерра), которое справедливо для невырожденного газа. Чтобы учесть вырождение, используется система ортогональных функций, которые являются обобщением полиномов Сонина, предложенная в [22, 23, 24], см. также [25]. Обычно для вычисления теплопроводности берутся первые два члена разложения. В [26] было показано, что такое приближение дает существенные погрешности для коэффициента теплопроводности, которые становятся намного меньше, когда используется разложение до третьей степени полинома. Первое применение уравнения Больцмана к газу из заряженных частиц было сделано Чепменом [21]. Из-за расходимости интеграла столкновений при больших прицельных параметрах для частиц с кулоновским взаимодействием в качестве верхнего предела интегрирования по прицельному параметру было взято среднее расстояние между частицами. Таким образом, были получены коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии для газов, состоящих из заряженных частиц. Расхождение интеграла столкновений для кулоновского взаимодействия при больших прицельных параметрах показывает, что рассеяние частиц с большим прицельным параметром и малым изменением импульса при единичном столкновении играет более важную роль, чем столкновения с большим изменением импульса. Ландау использовал этот факт для упрощения интеграла столкновений Больцмана [27]. Он выполнил разложение функции распределения после столкновения при малых изменениях импульса и оставил первые два члена разложения. Полученный таким образом интеграл называют интегралом столкновений Ландау. Другой вывод интеграла столкновений Ландау был сделан Чандрасекаром [28], который использовал аналогию с броуновским движением, которое описывается уравнением Фоккера–Планка. Коэффициенты теплопроводности, электропроводности, термодиффузии и диффузионного термоэффекта для полностью ионизованного газа без магнитного поля были численно получены в работах [29, 30]. Кинетические коэффициенты для невырожденной плазмы при наличии и отсутствии магнитного поля были вычислены в [31, 32, 33] с использованием метода разложения Чепмена–Энскога с интегралом столкновений в больцмановском виде. В случае отсутствия магнитного поля результаты [31, 32, 33] совпадают с результатами [29, 30], так как столкновительные члены в виде Больцмана и Фоккера–Планка

для кулоновского взаимодействия эквивалентны. Идентичность интегралов столкновений Ландау и Фоккера–Планка показана в [34], см. также [35].

Уравнение Больцмана можно решать методом Грэда, который также называют методом моментов [36]. Свойства переноса в полностью ионизованной плазме методом Грэда были исследованы в работах Самохина [37, 38, 39]. В методе Грэда функцию распределения можно представить в таком виде, что зависимость от времени и координат будет проявляться через соответствующую зависимость моментов скоростей частиц, это достигается с помощью разложения функции распределения в ряд по полиномам Эрмита–Чебышева. Отличие метода Грэда от метода Чепмена–Энскога состоит в том, что такие моменты скоростей, как тензор вязких напряжений, тепловой поток и т. д. рассматриваются не как вспомогательные переменные, выражения которых необходимо знать для получения уравнений гидродинамики, а как вполне самостоятельные переменные, характеризующие движение газа [40].

Брагинский [41] вычислил кинетические коэффициенты для невырожденной плазмы в магнитном поле, состоящей из электронов и одного сорта положительно заряженных ионов, используя кинетические уравнения, нормированные на средние скорости, различные для ионов и электронов. Использовался интеграл столкновений Ландау и учитывались два полинома в разложении. Такой же подход использовался в [42, 43], где представлены вычисления кинетических коэффициентов для полностью ионизованной плазмы со сложным составом. Кинетические коэффициенты для полностью ионизованной плазмы в магнитном поле были получены прямым численным расчетом уравнения Фоккера–Планка в [44]. Электропроводность высокотемпературной плазмы в однородном магнитном поле, состоящей из электронов и положительно заряженных ионов, была рассчитана в работе [45] методом Чепмена–Энскога с использованием разложения по полиномам Сонина до 50-го члена.

Компоненты тензора теплопроводности для вырожденных звездных ядер были вычислены в приближении Лоренца для водородной плазмы в [46]. В [47] представлены нерелятивистские вычисления на основе квантового уравнения переноса Ленарда–Балеску для теплопроводности и электрической проводимости плазмы с сильно вырожденными, слабо связанными электронами и невырожденными, слабо связанными ионами.

Проводимость электронов в нейтронных звёздах и белых карликах при нали-

чий магнитного поля была исследована в [48, 49]. Отношение между электропроводностью и теплопроводностью вдоль и поперек силовой линии магнитного поля, рассмотренное в этих работах, было получено феноменологически, с использованием теории свободного пробега.

Выражения для описания влияния магнитного поля на теплопроводность и электропроводность электронов в виде, использованном в статьях [48, 49], применялись и в последующих работах (см. [50, 51]).

В диссертационной работе показано, что кинетические коэффициенты произвольно вырожденных электронов в магнитном поле, полученные из решения уравнения Больцмана существенно точнее учитывают влияние магнитного поля на проводимость электронов в вырожденных звёздах. Новые коэффициенты переноса могут использоваться для моделирования распределения температуры и заряда, геометрии магнитного поля в белых карликах, на поверхности и в коре замагниченных нейтронных звёзд, описания поведения плазмы, получаемой и ускоряемой в лабораторных условиях.

Учитывая недавнее обнаружение нового объекта, похожего по свойствам на XDINS [14], и перспективы открытия большего числа подобных звёзд, вычисление точных значений кинетических коэффициентов в материи коры замагниченной одиночной нейтронной звезды представляется актуальным.

Цель диссертационной работы

состоит в нахождении кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- *Решение уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога с использованием разложения по трем полиномам, обобщающим полиномы Сонина, для произвольно вырожденных электронов в магнитном поле. Расчёты коэффициентов тензоров теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта для приближения невырожденных электронов выполнены в явном виде.*
- *Решение уравнения Больцмана в приближении Лоренца для сильно вырожденных электронов в магнитном поле и получение в явном виде компонент тен-*

зоров теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта.

Научная новизна

Результаты, полученные впервые:

1. Получены аналитические выражения для четырёх тензоров кинетических коэффициентов из решения уравнения Больцмана методом Чепмена-Энскога в 3-полиномиальном приближении с учетом электрон-электронных столкновений для случая невырожденных электронов в магнитном поле. Учёт третьей степени полинома улучшил точность результатов.

2. Для сильно вырожденных электронов впервые получены асимптотически точные аналитические выражения для тензора теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта в приближении Лоренца с учётом магнитного поля. Это решение имеет значительно более сложную зависимость от магнитного поля, чем зависимости в предыдущих публикациях.

3. Для частного случая частичного вырождения при $\epsilon_f/kT = 1.011$ получены аналитические выражения для кинетических коэффициентов при отсутствии магнитного поля из решения уравнения Больцмана в 3-х полиномиальном приближении. Показано, что сходимость полиномиального приближения к точному значению происходит медленнее, чем для невырожденных электронов.

Научная и Практическая значимость

Основные результаты диссертационной работы, определяющие её практическую и научную значимость, опубликованы в авторитетных научных изданиях. Проведенные расчёты коэффициентов переноса позволяют оценить влияние магнитного поля на перенос тепла и заряда в плотных областях нейтронных звезд и белых карликов. Основные результаты были использованы при построении трёхмерных моделей распределения температуры и заряда по поверхности замагниченной нейтронной звезды и для интерпретации наблюдательных данных [52]. Полученные выражения также могут быть использованы для описания коэффициентов переноса в других замагниченных объектах, содержащих свободные произвольно вырожденные электроны.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Получены компоненты тензоров теплопроводности, диффузии, диффузион-

ного термоэффекта и термодиффузии произвольно вырожденных электронов в магнитном поле на основе решения уравнения Больцмана.

2. Получено решение уравнения Больцмана в приближении Лоренца для плазмы в магнитном поле с сильно вырожденными нерелятивистскими электронами и невырожденными ядрами. Это приближение, в котором пренебрегается электрон-электронными столкновениями, является асимптотически точным для плазмы с сильно вырожденными электронами. В приближении Лоренца вычислены компоненты четырех тензоров кинетических коэффициентов в неквантуемом магнитном поле.

3. Методом Чепмена-Энскога получено решение уравнения Больцмана для плазмы в магнитном поле с произвольным вырождением электронов и невырожденными ядрами с использованием разложения по первым трём обобщенным полиномам Сонина. Для невырожденных электронов впервые получено аналитическое выражение для четырех тензоров кинетических коэффициентов в присутствии магнитного поля в 3-полиномиальном приближении с учетом электрон-электронных столкновений.

4. Исследовано влияние вырождения на сходимость 3-полиномиального решения к точному. Показано на примере приближения Лоренца, что точность приближения рядом ортогональных функций, обобщающих полиномы Сонина, уменьшается с увеличением степени вырождения.

5. Показано, что кинетические коэффициенты, полученные из решения уравнения Больцмана точнее учитывают влияние магнитного поля на проводимость произвольно вырожденных электронов, чем приближенные коэффициенты, полученные феноменологически, с использованием теории свободного пробега. Влияние магнитного поля оказывается более сильным и имеет более сложный характер.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены в качестве устных и стендовых докладов на следующих международных конференциях:

- "Physics of Neutron Stars - 2011" (Санкт-Петербург, 2011 г.)
- "Thirteenth Marcel Grossmann Meeting - MG13" (Стокгольм, Швеция, 2012 г.)
- "Supernovae and Gamma-Ray Bursts in Kyoto, 2013" (Киото, Япония, 2013 г.)
- "40th COSPAR Scientific Assembly" (Москва, 2014 г.)
- "Fourteenth Marcel Grossmann Meeting - MG14" (Рим, Италия, 2015 г.)
- "European Week of Astronomy and Space Science - EWASS 2017" (Прага, Чехия,

2017 г.)

- "Physics of Neutron Stars - 2017" (Санкт-Петербург, 2017 г.)
- "High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VI" (Москва, 2017 г.)
- "28-th Plasma Physics Conference" (Прага, Чехия, 2018 г.)
- "Fifteenth Marcel Grossmann Meeting - MG15" (Рим, Италия, 2018 г.)
- "High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows VII" (Барселона, Испания, 2019 г.)

всероссийских:

на конференциях Института Космических Исследований:

- "Конференция молодых ученых" (Москва, 2013, 2017 г.)

на астрофизических семинарах:

- "Магнитоплазменные процессы в релятивистской астрофизике" (Таруса, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2019 г.)
- Физического института РАН (Москва, 2018 г.)

Достоверность представленных результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов вычислений обеспечивается применением хорошо обоснованных классических методов кинетической теории газов, сравнением полученных результатов с результатами предшествующих работ по данной тематике и обсуждением на конференциях и семинарах. Основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Личный вклад автора

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены автором в результате совместных исследований. Результаты, выносимые на защиту, согласованы с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 116 страниц, из них 110 страниц текста, включая 13 рисунков. Библиография включает 81 наименование на 6 страницах.

Содержание работы

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

В первой главе "Уравнение Больцмана и уравнения переноса" получены уравнения переноса для концентрации электронов, полного импульса и энергии электронов в двухкомпонентной смеси из электронов и ядер. Согласно методу последовательных приближений Чепмена-Энскога выписано выражение для функции распределения в первом приближении. Выписаны системы уравнений для нахождения кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в магнитном поле с использованием разложения по трём полиномам, обобщающим полиномы Сонина.

Материалы первой главы опубликованы в работах [A1, A3, A4].

Во второй главе "Расчёт матричных элементов для интегралов столкновений" рассчитаны матричные элементы для интегралов столкновений электрон-электрон и электрон-ядро для случая невырожденных и сильно вырожденных электронов. В частном случае частично вырожденных электронов при $\epsilon_{fe}/kT = 1.011$ рассчитаны матричные элементы для интеграла столкновений электрон-ядро.

Материалы второй главы опубликованы в работах [A1, A4].

В третьей главе "Тензоры теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта для невырожденных электронов в магнитном поле" получены аналитические выражения для тензоров теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта в 3-х полиномиальном приближении для случая невырожденных электронов в магнитном поле. На примере лоренцевского газа показано, что метод обладает хорошей сходимостью к точному решению. Проведено сравнение с результатами предшествующих работ и показано, что учёт третьей степени полинома существенно улучшает точность результатов.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A1, A4].

В четвёртой главе "Расчёт коэффициентов теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта в случае частичного вырождения" получены значения кинетических коэффициентов в случае вырождения $\epsilon_{fe}/kT =$

1.011. Исследована сходимость полиномиального приближения к точному значению. Для сильно вырожденных электронов получены компоненты тензора теплопроводности в магнитном поле в полиномиальном приближении. Проведено сравнение полиномиального решения и точного.

Результаты четвёртой главы опубликованы в работах [A1, A4].

В пятой главе "Расчёт коэффициентов теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта в магнитном поле в случае сильного вырождения в приближении Лоренца" получено асимптотически точное аналитическое решение для кинетических коэффициентов вырожденных электронов в магнитном поле путём решения уравнения Больцмана в приближении Лоренца. В предшествующих работах для оценок кинетических коэффициентов была использована упрощенная теория теплопроводности и диффузии в присутствии магнитного поля, основанной на средней длине свободного пробега [21]. Проведено сравнение с предшествующими результатами и показано, что полученные коэффициенты, имеют значительно более сложную зависимость от магнитного поля, чем зависимости, полученные феноменологическим способом.

Результаты пятой главы опубликованы в работах [A1, A2, A3].

В Заключении кратко повторяются полученные результаты и отмечены возможные направления дальнейшей работы по теме диссертации.

Список публикаций

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

A1. Бисноватый-Коган Г. С., Глушихина М. В., Вычисление коэффициентов теплопроводности в замагниченном плотном веществе //Физика Плазмы, т. 44, с. 355-374, 2018

A2. Бисноватый-Коган Г. С., Глушихина М. В., Четыре тензора, определяющие тепло- и электропроводность вырожденных электронов в замагниченной плазме// Физика Плазмы, т. 44, с. 971-982, 2018

A3. Glushikhina M. V., Bisnovatyi-Kogan G.S., Calculation of thermal conductivity coefficients of electrons in magnetized dense matter// International Journal of Modern Physics D, v. 27, pp.1844008-1-8, 2018

А4. Глушихина М. В., Четыре тензора, определяющие тепло- и электропроводность невырожденных электронов в замагниченной плазме // Физика Плазмы, т. 46, с. 121-138, 2020

Другие публикации автора по теме диссертации

В1. *Glushikhina M. V., Bisnovatyi-Kogan G. S.* Calculation of thermal conductivity coefficients of electrons in magnetized neutron star // The Thirteenth Marcel Grossmann Meeting: On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics and Relativistic Field Theories - Proceedings of the MG13 Meeting on General Relativity, 2012, v.2, pp. 1353-1357

В2. *Glushikhina M. V., Moiseenko S. G.* MHD processes near compact objects // The Fourteenth Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics, and Relativistic Field Theories, held 12-18 July 2015 in Rome, Italy., 2015, pp. 385-408. Edited by Massimo Bianchi, Robert T Jansen and Remo Ruffini.

В3. *Glushikhina M. V., Bisnovatyi-Kogan G. S.* Kinetic coefficients of degenerate electrons in magnetized neutron star crust // The Fourteenth Marcel Grossmann Meeting On Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Astrophysics, and Relativistic Field Theories, held 12-18 July 2015 in Rome, Italy., 2015, pp. 1102-1107. Edited by Massimo Bianchi, Robert T. Jansen and Remo Ruffini.

В4. *Glushikhina M. V., Bisnovatyi-Kogan G.S.* Four Tensors Determining the Heat and Electro-Conductivities of Degenerate Electrons in the Dense Magnetized Matter // High Energy Phenomena in Relativistic Outflows VII. 9-12 July 2019. Facultat de Fisica, Universitat de Barcelona, Spain, 2019, id.79

Цитируемая литература

1. Бисноватый-Коган Г. С., Моисеенко С. Г. Гравитационные волны и сверхновые с коллапсирующим ядром // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. С. 906–914.
2. Арделян Н. В., Бисноватый-Коган Г. С., Космачевский К. В., Моисеенко С. Г. Двумерный расчёт динамики коллапса вращающегося ядра с образованием ней-

- тронной звезды на адаптивной треугольной сетке в лагранжевых переменных // *Астрофизика*. 2004. Т. 47. С. 47–64.
3. Moiseenko S. G., Bisnovaty-Kogan G. S., Ardeljan N. V. A magnetorotational core-collapse model with jets // *MNRAS*. 2006. Vol. 370. P. 501–512.
 4. Шкловский И. С. Звёзды: их рождение, жизнь и смерть. Москва: Наука, 1975.
 5. Засов А., Постнов К. *Общая астрофизика*. Фрязино: Век, 2006.
 6. Treves A., Popov S. B., Colpi M. et al. The Magnificent Seven: Close-by Cooling Neutron Stars? // *X-ray Astronomy 2000, ASP Conference Proceeding Vol. 234*. Edited by Riccardo Giacconi, Salvatore Serio, and Luigi Stella. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. 2001. Vol. 1. P. 225–231.
 7. Popov S. The Zoo of Neutron Stars // *Physics of Particle and Nuclei*. 2008. Vol. 39. P. 1136–1142.
 8. Popov S. B. Evolution of Isolated Neutron Stars // *Astrophysical sources of high energy particles and radiation, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute and 12th Course of the International School of Cosmic Ray Astrophysics, held in Erice, Italy, 10-21 November 2000* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 2001. Vol. 44. P. 101–111.
 9. Popov S. B., Turolla R., Possenti A. A tale of two populations: Rotating Radio Transients and X-ray Dim Isolated Neutron Stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. Vol. 369. P. 23–26.
 10. Walter F., Wolk S. J., Neuhauser R. Discovery of a nearby isolated neutron star // *Letters to Nature*. 1996. Vol. 379. P. 233–235.
 11. Haberl F. The Magnificent Seven: Magnetic fields and surface temperature distributions // *Astrophysics and Space Science*. 2006. Vol. 777. P. 497.
 12. Turolla R. *Neutron Stars and Pulsars*. Berlin: Springer, 2009.
 13. Popov S. B., Colpi M., Treves A. et al. Neutron Star Census // *Astrophysical Journal*. 2000. Vol. 530. P. 896–903.
 14. Rigoselli M., Mereghetti S., Suleimanov V. et al. XMM-Newton observations of PRS J0726-2612, a radio-loud XDINS // *Astron. and Astrophys.* 2019. Vol. 379. P. 233–235.
 15. Pons J., Walter F., Lattimer J. et al. Towards a mass and radius determination of the nearby isolated neutron star RX J185635-3754 // *Astrophysical Journal*. 2002.

- Vol. 564. P. 981–1046.
16. Zavlin V. E. First X-ray observations of the young pulsar J1357-6429 // *Astrophys. J.* 2007. Vol. 665. P. 143.
 17. А.В. Кузнецов Н. М. Электрослабые процессы во внешней активной среде. Ярославль: Из-во Ярославского гос. университета им. П.Г. Демидова, 2010.
 18. Яковлев Д., Левенфиш К., Шибанов Ю. Остывание нейтронных звёзд и сверхтекучесть в их ядрах // *УФН.* 1999. Т. 169. С. 825–868.
 19. Salpeter E. E. Energy and pressure of a zero-temperature plasma // *Astrophys. J.* 1961. Vol. 134. P. 669.
 20. Бисноватый-Коган Г. Релятивистская астрофизика и физическая космология. Москва: КРАСАНД, 2010.
 21. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. Москва: Иностранная литература, 1960.
 22. Uehling E., Uhlenbeck G. Transport Phenomena in Einstein-Bose and Fermi-Dirac Gases. I // *Physical review.* 1933. Vol. 552. P. 43.
 23. Uehling E. Transport Phenomena in Einstein-Bose and Fermi-Dirac Gases. II // *Physical review.* 1934. Vol. 46. P. 917.
 24. Tomonaga S. Z. Innere Reibung und Wärmeleitfähigkeit der Kernmaterie // *Z. Phys.* 1938. Bd. 110. S. 573.
 25. Бисноватый-Коган Г., Романова М. Перенос тепла и диффузия нейтронов в коре нейтронных звёзд // *ЖЭТФ.* 1982. Т. 83. С. 449.
 26. Имшенник В. О теплопроводности плазмы // *Астрономический журнал.* 1961. Т. 38. С. 652.
 27. Ландау Л. Кинетическое уравнение в случае кулоновского взаимодействия // *ЖЭТФ.* 1937. Т. 7. С. 203.
 28. Chandrasekhar S. Stochastic Problems in Physics and Astronomy // *Rev. Modern Phys.* 1943. Vol. 15. P. 1.
 29. Spitzer L., Harm R. Transport phenomena in a completely ionized gas // *Physical Review.* 1953. Vol. 89. P. 977–981.
 30. Spitzer L., Cohen R., McRoutly P. The electrical conductivity of ionized gas // *Physical Review.* 1950. Vol. 80. P. 230–232.
 31. Landshoff R. Transport phenomena in a completely ionized gas in presence of a mag-

- netic field // Physical review. 1951. Vol. 82. P. 442.
32. Marshall W. Kinetic theory of an ionized gas // At. Energy Res Estable. 1960. Vol. -. P. 2419.
 33. Бисноватый-Коган Г. С. Перенос тепла и диффузия в частично ионизованной двухтемпературной плазме // Прикладная механика и техническая физика. 1964. Т. 3. С. 43.
 34. Rosenbluth M., Macdonald W., Judd D. Fokker-Planck equations for the inverse square forces // Physical review. 1957. Vol. 107. P. 1.
 35. Трубников Б. А. Столкновения частиц в полностью ионизованной плазме // Вопросы теории плазмы. 1963. Т. 1. С. 98.
 36. Grad H. On the kinetic theory of rarefied gases // Communications on pure and applied mathematics. 1949. Vol. 2. P. 331–407.
 37. Самохин М. В. Определение коэффициентов переноса в плазме методом Грэда // Журнал технической физики. 1962. Т. 32. С. 1055–178.
 38. Самохин М. В. Токи и потоки тепла в двухтемпературной плазме // Журнал технической физики. 1963. Т. 33. С. 667–674.
 39. Самохин М. В. Потоки частиц и тепла в многокомпонентной плазме // Журнал технической физики. 1963. Т. 33. С. 675–682.
 40. Силин В. П. Введение в кинетическую теорию газов. Москва: Издательство Физического Института имени Лебедева РАН, 1998.
 41. Брагинский С. И. Явления переноса в полностью ионизованной двухтемпературной плазме // ЖЭТФ. 1958. Т. 33. С. 459.
 42. Боброва Н. А., Сасоров П. В. МГД уравнения для полностью ионизованной плазмы сложного состава // Физика плазмы. 1993. Т. 19. С. 789.
 43. Bobrova N. A., Lazarro E., Sasorov P. V. Magnetohydrodynamic two-temperature equations for multicomponent plasma // Physics of Plasmas. 2005. Vol. 12. P. 022105–1–19.
 44. Epperlein E. M., Haines M. G. Plasma transport coefficients in a magnetic field by direct numerical solution of the Fokker-Planck equation // Phys. Fluids. 1986. Vol. 29. P. 1029.
 45. Kaneko S., Taguchi M. Electrical conductivity of a high-temperature plasma in a uniform magnetic field // J. Phys. Soc. Japan. 1978. Vol. 45. P. 4.

46. Wyller A. On thermal conductivity in degenerate stellar cores // *Astrophisica Norvegica*. 1964. Vol. 9. P. 79–88.
47. Lampe M. Transport coefficients of degenerate plasma // *Physical review*. 1968. Vol. 170. P. 306.
48. Flowers E., Itoh N. Transport properties of dense matter // *Astrophys. J.* 1976. Vol. 206. P. 218–242.
49. Яковлев Д., Урпин В. А. Тепло- и электропроводность в белых карликах и нейтронных звёздах // *Астрономический журнал*. 1980. Т. 57. С. 526.
50. Itoh N., Hayashi H., Kohyama Y. Electrical and Thermal Conductivities of Dense Matter in the Crystalline Lattice Phase. III. Inclusion of Lower Densities // *Astrophys. J.* 1993. Vol. 418. P. 405–413.
51. Yakovlev D., Gnedin O., Kaminker A. et al. Neutron star cooling: theoretical aspects and observational constraints // *Adv. Space Res.* 2004. Vol. 33. P. 523.
52. Kondratyev I. A., Moiseenko S. G., Bisnovatyi-Kogan G. S., Glushikhina M. V. 3D Simulation of Anisotropic Heat Transfer in Outer Layers of Magnetized Neutron Stars // *Astronomy Reports*. 2020. Vol. 64. P. 226–243.