

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИКИ РАН

А. А. Петрукович

Чл. Корр. РАН



20 » июня 2020 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований  
Российской академии наук

Диссертация «Вычисление кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе» выполнена в отделе "Прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии" Федерального государственного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН). В период подготовки диссертации соискатель Глушихина Мария Владимировна работала в ИКИ РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2015 г. М. В. Глушихина окончила заочную аспирантуру Института космических исследований РАН по специальности «Астрофизика и звездная астрономия».

Справки о сдаче кандидатских экзаменов выданы в 2015 г. и 2020 г. в ИКИ РАН.

Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор Бисноватый-Коган Геннадий Семёнович, главный научный сотрудник в ФГБУН ИКИ РАН.

По результатам рассмотрения диссертации «Вычисление кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе» принято следующее заключение:

### **Актуальность темы и направление исследования**

Диссертационная работа Глушихиной Марии Владимировны посвящена аналитическому расчёту кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе.

Коэффициенты переноса используются для описания поведения плазмы, находящейся в различных условиях, от лабораторных установок до астрофизических объектов.

В диссертационной работе кинетические коэффициенты были найдены из решения уравнения Больцмана. Для произвольно вырожденных электронов уравнение Больцмана было решено методом последовательных приближений. Чтобы учесть вырождение, используется система ортогональных функций, которые являются обобщением полиномов Сонина. В предшествующих работах для вычисления кинетических коэффициентов замагниченной плазмы невырожденных электронов учитывались первые два члена разложения. В данной работе получены

аналитические выражения для четырёх тензоров кинетических коэффициентов в 3-полиномиальном приближении с учетом электрон-электронных столкновений для случая невырожденных электронов в магнитном поле. Учёт третьей степени полинома улучшил точность результатов. Для частного случая частичного вырождения при  $\epsilon_{Fe}/(kT) = 1.011$  получены аналитические выражения для кинетических коэффициентов в 3-х полиномиальном приближении при отсутствии магнитного поля. Показано, что сходимость полиномиального приближения к точному значению происходит медленнее, чем для невырожденных электронов.

В предшествующих работах по проводимости сильно вырожденных электронов в магнитном поле кинетические коэффициенты были получены феноменологически, с использованием теории свободного пробега. В диссертационной работе кинетические коэффициенты сильно вырожденных электронов в магнитном поле, получены из решения уравнения Больцмана в приближении Лоренца. Это приближение, в котором пренебрегается электрон-электронными столкновениями, является асимптотически точным для плазмы с сильно вырожденными электронами. Показано, что кинетические коэффициенты, полученные из решения уравнения Больцмана точнее учитывают влияние магнитного поля на проводимость электронов.

Полученные выражения могут быть использованы для описания коэффициентов переноса в замагниченных объектах, содержащих свободные произвольно вырожденные электроны. Возможные сферы применения — для моделирования распределения температуры, заряда, геометрии магнитного поля в белых карликах, на поверхности и в коре замагниченных нейтронных звезд, описания поведения плазмы, получаемой и ускоряемой в лабораторных условиях.

Соискателем в первой главе диссертации 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.

Во второй главе работы 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.

В третьей главе 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 продемонстрировано, что метод обладает хорошей сходимостью к точному решению. Проведено сравнение с результатами предшествующих работ и показано, что учёт третьей степени полинома улучшает точность результатов.

В четвёртой главе получены значения кинетических коэффициентов в случае вырождения  $\epsilon_{Fe}/(kT) = 1.011$ . Показано, что точность приближения рядом ортогональных функций, уменьшается с увеличением степени вырождения, а учёт электрон-электронных столкновений дополнительно уменьшает кинетические коэффициенты.

В заключительной главе получено асимптотически точное аналитическое решение для кинетических коэффициентов вырожденных электронов в магнитном поле путём решения уравнения Больцмана в приближении Лоренца. В этом приближении электрон-электронными

столкновениями можно пренебречь по сравнению с электрон-ядерными столкновениями при невырожденных ядрах. Проведено сравнение с предшествующими результатами и показано, что полученные в работе коэффициенты, имеют значительно более сложную зависимость от магнитного поля, чем зависимости, полученные феноменологическим способом.

### **Личный вклад автора при получении результатов, представленных в диссертации**

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.

### **Степень достоверности результатов проведённого исследования**

Достоверность, полученных в диссертационной работе результатов, подтверждается 7 публикациями, 4 из которых опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а так же докладами на российских и международных конференциях, в том числе таких как Ассамблея COSPAR, "European Week of Astronomy and Space Science - EWASS 2017», "Physics of Neutron Stars», "High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows», "28-th Plasma Physics Conference», «Marcel Grossmann Meeting».

### **Научная новизна полученных результатов**

В ходе исследования 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. Показано, что решение имеет значительно более сложную зависимость от магнитного поля, чем зависимости в предшествующих работах и дает в несколько раз меньшее значение коэффициента теплопроводности поперек магнитного поля при  $\omega\tau \sim 0.8$ .

Впервые 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 существенно улучшил точность результатов.

Для частного случая частичного вырождения при  $\epsilon_{Fe}/(kT) = 1.011$  впервые 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 результатов исследования**

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. Полученные выражения также могут быть использованы для описания поведения плазмы в других замагниченных объектах, содержащих свободные произвольно выроджденные электроны.

### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах автора:

1. Bisnovaty-Kogan G. S., Glushikhina M. V., Calculation of thermal conductivity coefficients of electrons in magnetized dense matter, *Plasma Physics Reports*, 2018, v. 44, pp. 405-423.
2. Bisnovaty-Kogan G. S., Glushikhina M. V., Four tensors determining thermal and electric conductivities of degenerate electrons in magnetized plasma, *Plasma Physics Reports*, 2018, v. 44, pp. 1114-1125.
3. Glushikhina M. V., Four tensors determining the thermal and electric conductivities of non-degenerate electrons in magnetized plasma, *Plasma Physics Reports*, 2020, v. 46, pp. 159-175.
4. 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.
5. Glushikhina M. V., Bisnovaty-Kogan G. S., Calculation of thermal conductivity coefficients of electrons in magnetized dense matter, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN PHYSICS D*, v. 27, article id.1844008-1-8
6. Glushikhina M. V., Bisnovaty-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.
7. Glushikhina M. V., Bisnovaty-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.

Все работы опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в системах РИНЦ, Web of Science и Scopus. Все основные положения исследования опубликованы в указанных статьях.

**Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «01.04.02 - Теоретическая физика»**

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к классу, заявленному в паспорте специальности 01.04.02 - «Теоретическая физика»: «Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем.»

**ВЫВОД.** Кандидатская диссертация Глушихиной Марии Владимировны «Вычисление кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе» соответствует «Положению о порядке присуждения учёных степеней».

Диссертация рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - Теоретическая физика.

Заключение принято на заседании НТС отдела «Прикладной и теоретической астрономии и радиоинтерферометрии» Института космических исследований РАН. Присутствовало на заседании 6 членов НТС отдела. Результаты голосования: «за» - 6 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол от 22 июня 2020 г.

Председатель НТС отдела 64 ИКИ РАН

д.ф.-м.н.,

Секретарь НТС отдела 64 ИКИ РАН

к.ф.-м.н.,

С. Г. Моисеенко

О. Ю. Цупко