

## ОТЗЫВ

официального оппонента д-ра физ.-мат. наук Баско М. М.

на диссертационную работу Глушихиной Марии Владимировны

«Вычисление кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в замагниченном плотном веществе», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика».

Диссертационная работа Глушихиной М.В. посвящена вычислению кинетических коэффициентов в произвольно вырожденном, замагниченном плотном веществе, входящем в состав нейтронных звёзд и белых карликов. Эти астрономические объекты уникальны тем, что вещество в них находится в сверхплотном состоянии и, как правило, под действием сверхсильных магнитных полей. Исследование свойств материи, находящейся в таких экстремальных условиях, имеет важное фундаментальное значение. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования переноса тепла и заряда как в астрофизических объектах, так и в определенных лабораторных условиях как, например, в мишенях инерциального термоядерного синтеза. Тем самым обусловлена актуальность темы диссертации.

Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении представлен достаточно полный обзор литературы по исследуемой тематике, обоснована актуальность и сформулированы цели работы, обозначена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе дано описание метода вычисления кинетических коэффициентов. Выписано уравнение Больцмана для плазмы в магнитном поле, получены уравнения переноса, выражения для интегралов столкновений в плазме из произвольно вырожденных нерелятивистских электронов и невырожденных ядер одного сорта. Описан метод последовательных приближений Чепмена-Энскога для решения уравнения Больцмана. Приведены первые три полинома функционального базиса, обобщающего полиномы Сонина (Лагерра), используемые в пределе невырожденных электронов; с их помощью получены системы уравнений для вычисления кинетических коэффициентов произвольно вырожденных электронов в магнитном поле.

Вторая глава посвящена расчёту матричных элементов для интегралов электрон-ионных и электрон-электронных столкновений. Рассмотрены предельные случаи невырожденных и сильно вырожденных электронов. В частном случае частично вырожденных электронов с нулевым химическим потенциалом вычислены матричные элементы для электрон-ионных столкновений.

В третьей главе из решения уравнения Больцмана методом последовательных приближений, описанным в первой и второй главах, получены аналитические выражения для компонент четырёх тензоров кинетических коэффициентов для невырожденных электронов в магнитном поле с использованием разложения по полиномам Сонина вплоть до второй степени. На примере лоренцевой плазмы показано, что метод последовательных полиномиальных приближений обладает хорошей сходимостью к точному решению, и учёт второй степени полинома существенно улучшает точность результатов.

В четвертой главе значения кинетических коэффициентов вычислены для частного случая нулевого значения химпотенциала электронов методом последовательных приближений. Исследована сходимость полиномиального приближения к точному значению. Показано, что точность полиномиального приближения уменьшается с увеличением степени вырождения.

В пятой главе расчёты выполнены для сильно вырожденных, нерелятивистских электронов в магнитном поле. В этом случае уравнение Больцмана решено в приближении Лоренца. Показано, что приближение Лоренца для сильно вырожденных электронов асимптотически точно. Впервые получены аналитические выражения для компонентов тензоров теплопроводности, термодиффузии, диффузии и диффузионного термоэффекта в приближении Лоренца с учётом магнитного поля.

В заключении кратко сформулированы основные результаты, а также обсуждаются возможности практического применения диссертационной работы.

Резюмируя подчеркнём, что представленная работа посвящена решению важной и трудной задачи теоретической физики — вычислению транспортных коэффициентов плотной замагниченной плазмы с приемлемой точностью и в удобной для применения аналитической форме на основе кинетической теории. Решение этой задачи сопряжено с проведением большого количества технически сложных и трудоёмких вычислений, требующих высокой квалификации исследователя, которая была в полной мере продемонстрирована М.В. Глушихиной. Новые формулы, полученные для сильно вырожденной замагниченной плазмы, должны явиться ценным вкладом в теорию белых карликов и нейтронных звезд.

В качестве критических замечаний отметим следующие моменты:

1. Трудно согласиться с утверждением автора на стр. 14 (1-й абзац, а также на стр. 75 и стр. 106) диссертации, что ею «впервые получено аналитическое выражение для четырёх тензоров кинетических коэффициентов в присутствии магнитного поля в 3-полиномиальном приближении с учетом электрон-электронных столкновений» в частном случае невырожденных электронов. На самом деле, в том же порядке по отношению частот электрон-электронных и электрон-ионных столкновений в 1961 г. В.С. Имшенником была получена формула для коэффициента теплопроводности немагнитной невырожденной плазмы, а в 1993 г. Н.А. Бобровой и П.В. Сасоровым — аналитические формулы для всех кинетических коэффициентов замагниченной невырожденной плазмы. Если бы в данной диссертации было действительно использовано более высокое приближение по сравнению с указанными авторами, то дробно-полиномиальные (по степеням  $Z^{-1}$ ) коэффициенты в формулах (3.16), (3.17), отражающие зависимость от  $Z$ , содержали бы более высокие степени  $Z^{-1}$ , чем аналогичные выражения в работах Имшенника и Бобровой-Сасорова, — что не так. Выяснить как формулы данной диссертации соотносятся с аналогичными формулами Имшенника и Бобровой-Сасорова можно только посредством их детального сравнения, которое, к сожалению, отсутствует в диссертации, и серьёзным препятствием для которого является нестандартное (отличное от введенного в курсе Ландау-Лифшица и используемого большинством других авторов) определение основных кинетических коэффициентов — в частности, коэффициента теплопроводности.

2. Следует отметить некоторую небрежность в изложении математического материала, которая затрудняет чтение диссертации: например, в исходных уравнениях (1.1) и (1.2) не объяснены нормировки функций  $f$ ,  $f_N$ , что такое  $f_N$ , что  $c_i$  — это компоненты скоростей электронов в лабораторной системе, что такое дифференциал  $dc_\alpha$ , что такое индекс  $\alpha$ ,  $v_{\alpha i}$ ,  $c_{\alpha i}$  и почему  $f$  зависит от  $c_{\alpha i}$  в уравнении (1.8), что такое  $\rho_e$  в (1.6) и (1.11), и т.п.; в формуле (1.22) без объяснения введен символ  $i$ , который по-видимому означает мнимую единицу, хотя на стр. 39 этим символом обозначена другая величина; в формулах на стр. 31 без объяснения появляются обозначения  $(ND)$  и  $(D)$ .

3. В диссертации широко обсуждается частный случай значения параметра вырождения  $\varepsilon_f/kT=1.011$  без пояснения (если не докопаться до этого в глубине текста), чем физически (или математически) выделен этот случай: гораздо понятнее было бы везде писать, что это частный случай нулевого химического потенциала электронов.

4. Отметим существенные для понимания сути опечатки: в первом предложении на стр. 32 должно быть  $\exp(x-x_0) \gg 1$  вместо  $\exp(x-x_0) \ll 1$ ; в первом предложении на стр. 79 должно быть «...методом Лоренца (3.63) для вырожденных электронов» вместо «...методом Лоренца (3.63) для невырожденных электронов».

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Глушихиной М. В. представляет собой законченное исследование в области теоретической физики. Результаты актуальны, удовлетворяют требованиям новизны и могут использоваться для описания коэффициентов переноса в замагниченных объектах, содержащих свободные, произвольно вырожденные электроны. Положения, выносимые на защиту, достоверны и обоснованы. Результаты диссертационного исследования опубликованы в российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных системах цитирования, а так же представлены на российских и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

По мнению оппонента, диссертационная работа Глушихиной М. В. отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика», а её автор, Глушихина Мария Владимировна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент

вед. науч. сотр. ИПМ им. М.В. Келдыша

д-р физ.-мат. наук

125047, Россия, Москва, Миусская пл., д.4,

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН



Баско М. М.

Подпись Баско М.М. заверяю,

Учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

канд. физ.-мат. наук

09.11.2020




Маслов А. И.