

## ОТЗЫВ

официального оппонента Кочаровского Владимира Владиленовича на диссертацию Собьянина Дениса Николаевича «К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. — теоретическая физика

Диссертация Д.Н.Собьянина посвящена актуальным вопросам современной теоретической физики в области астрофизических и твердотельных плазменных систем, прежде всего тех, для которых наблюдения и эксперименты последних лет выявили ряд новых физических свойств, важных с фундаментальной и практической сторон и требующих своего теоретического объяснения. Соответствующие направления исследований определены как приоритетные в перечне направлений фундаментальных и поисковых научных исследований программы Правительства Российской Федерации на период до 2030 г. (пп. 1.3.2, 1.3.4, 1.3.7) и входят в план фундаментальных исследований Российской академии наук на период до 2025 г. (пп. 2.1, 2.4, 2.5). Представленное диссертационное исследование обладает несомненной новизной и содержит решение ряда интересных модельных задач по выбранным направлениям научной специальности.

Во Введении диссертации описано текущее состояние научных исследований по избранной теме и поставленным конкретным задачам. Отмечаются особенности современных теоретических исследований динамики неравновесных плазменных систем, характеризующихся сложностью и отсутствием универсального подхода к их анализу. Такие системы могут находиться в различных условиях (иметь различные распределения частиц по скоростям, температуры, гидродинамические скорости, электромагнитные поля, особенности взаимодействия с окружением), и в зависимости от этих условий каждая система, демонстрируя общие свойства, характеризуется своими определенными особенностями, которые необходимо учитывать. Приводятся также стандартные сведения, требуемые по правилам оформления диссертаций: актуальность, новизна, методология, публикации, вклад автора и пр.

Глава 2 диссертации посвящена изложению исследований нестационарных процессов в окрестностях замагниченных нейтронных звёзд. Важность проведенных исследований обусловлена обилием наблюдательных данных, получаемых с высоким временным разрешением и свидетельствующих о ключевой роли нестационарных явлений в магнитосфере звёзд. Автор расширяет имеющиеся представления о взаимосвязи стационарных и нестационарных явлений, показывая возможность формирования стационарных кинетических распределений частиц плазмы при ее взрывной генерации, а также обосновывая новый вид активности потухших нейтронных звёзд как генераторов плазмы в так называемом нелокальном режиме. Его оценка наблюдательные проявления этих звезд, ранее считавшихся неактивными, показывает, что они могут быть эффективным источником галактических позитронов.

В главе 3 исследуется динамика генерируемых в нейтронной звезде внутренних электромагнитных полей, электрических зарядов и токов. Сначала изучается изменение электромагнитного поля во времени из-за вращения высокопроводящего вещества. Достижением автора является полностью самосогласованный анализ

задачи, когда все заряды и токи рассматриваются на равных правах и нет каких-либо токов, являющихся внешними, сторонними, заданными. Внутренняя динамика полей изменяет баланс электромагнитных сил, т.е. за счет самовоздействия вращающегося вещества приводит к изменению структуры магнитного поля и поэтому потенциально наблюдаема. Обнаруженный автором эффект влияет на первоначальное равномерное вращение и может привести к дополнительной переменности наблюдаемого излучения. На основе полученных результатов автор строит модель и проводит оценки физических характеристик повторяющихся быстрых радиовсплесков — космических объектов неустановленной природы, многочисленные наблюдения импульсного излучения которых в последние годы остаются необъясненными.

Глава 4 содержит анализ динамики и свойств релятивистского струйного выброса (джета) в галактике М87. Новейшие радиоинтерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами показали существование радиоструктуры, не укладывающейся в стандартные представления об этом плазменном объекте. Автор показывает, что данное противоречие можно разрешить на основе построенной им оригинальной модели строения джета, позволяющей рассчитать его параметры, неизвестные из наблюдений. В данной модели удастся объяснить наблюдаемое периодическое смещение джета как проявление общерелятивистских эффектов, оценить параметры вращения черной дыры, исследовать вопрос об уравнении состояния и составе плазмы, в частности, рассмотрев различные возможности, показать, что плазма на масштабах субпарсеков является горячей и содержит области с доминирующей электрон-позитронной компонентой (характерные значения температуры плазмы чрезвычайно высоки и достигают  $10^{11}$  К). Расчеты автора через несколько лет после их опубликования были подтверждены наблюдениями.

В главе 5 рассматривается динамика нерелятивистской плазмы твердых тел. Здесь температура плазмы, наоборот, чрезвычайно низка (например, порядка 2 К), что позволяет наблюдать интересные квантовые эффекты. Таким эффектом в изучаемой автором спинтронике двумерного электронного газа являются осцилляции времени спиновой релаксации при приложении сильного внешнего магнитного поля до 50 кГс. Эти осцилляции фактически отражают переход исследуемой системы в режим квантового эффекта Холла. Автором обнаружено аномальное магнитное подавление спиновой релаксации, выражающееся в том, что скорость нарастания времени спиновой релаксации в определенном интервале магнитных полей резко падает, а первоначально квадратичная зависимость сменяется линейной еще до появления осцилляций, аналогичных осцилляциям Шубникова-де-Гааза. Автор объясняет данное явление как изменение типа диффузии электронов и возникновение аномальной диффузии Бома. Построенная автором количественная теория полностью согласуется с результатами проведенного лабораторного эксперимента.

Кроме двумерной ситуации, автор исследует спиновую релаксацию в объемном полупроводниковом образце в режиме резонанса нового типа, возникающего в образце арсенида галлия, помещенном в постоянное магнитное поле и подвергнутом периодическому возбуждению оптическими импульсами, а также дополнительному воздействию переменного магнитного поля. При одном типе резонанса, когда фаза прихода последовательных импульсов совпадает с фазой прецессии спина, имеет

место резонансное спиновое усиление, а при другом типе резонанса, когда частота переменного магнитного поля совпадает с частотой ларморовской прецессии, имеет место электронный спиновый резонанс. Происходящее при одновременном воздействии двух факторов выражается в сложной динамике спинового отклика системы, которая детально исследована в диссертации. С помощью выведенного единого аналитического выражения автор объясняет весь набор измеренных в эксперименте как нерезонансных, так и резонансных кривых отклика при изменении величины постоянного магнитного поля, а также амплитуды и частоты переменного магнитного поля. Данные результаты представляют несомненный интерес для практического управления спиновыми свойствами материалов типа арсенида галлия.

В главе 5 решается и задача о связи тепловых и спектральных характеристик системы экситонных поляритонов в микрополости с арсенидом галлия. Автор вычисляет квантовые степени временной когерентности 1-го и 2-го порядка и находит соответствующий спектр излучения микрополости, ширина которого зависит от скоростей излучения и поглощения поляритонов экситонным резервуаром; при этом статистика флуктуаций является суперпуассоновской. Полученное автором соотношение для ширины наблюдаемой спектральной линии легло в основу нового экспериментального метода определения температуры резервуара в неравновесном случае. Данный метод позволил проследить динамику охлаждения резервуара за 1.5 нс от 200 К до 10 К после оптического импульсного возбуждения микрополости.

В качестве общих замечаний по диссертации следует отметить: 1) разнородный характер решаемых задач как для астрофизической, так и для твердотельной плазмы (впрочем, разброс тематики вряд ли критичен для специальности «теоретическая физика»); 2) не полное описание условий применимости рассмотренных модельных задач и выводов, полученных на основе их решения, во всех главах 2-5 (что сглажено «условным» характером формулировок выносимых на защиту положений благодаря использованию слова «можно»); 3) ограниченный обзор работ других авторов по вопросам, затрагиваемым в диссертации (не отражающий известный мне широкий научный кругозор автора). Имеется несколько замечаний и к тексту диссертации, например, к неуместному перечислению на с. 190 части работ автора, не вошедших в диссертацию, или к предпоследнему предложению п. 3 научной новизны (с. 11). Однако эти замечания не умаляют высокого научного уровня работы Д.Н.Собьянина.

Представленная диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.3. — теоретическая физика (пп. 2, 3, 5, 10) и содержит ряд фундаментальных результатов, актуальность, объем, уровень, новизна и значимость для науки которых говорит о том, что научная квалификация автора диссертации соответствует квалификации доктора наук. Совокупность разработанных автором теоретических положений можно квалифицировать как научное достижение. Диссертация написана ясно и логично. Все положения, выводы и рекомендации диссертации хорошо обоснованы. Достоверность результатов обеспечена их строгим выводом из установленных законов физики с использованием обоснованных приближений и подтверждена согласием с результатами современных экспериментов и наблюдений. Результаты диссертации опубликованы в 15 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в международную базу данных Web of Science, причем не будет

лишним добавить, что автор диссертации имеет и другие статьи, опубликованные не по теме диссертации, и общее количество статей автора в журналах из Web of Science составляет 25 шт. Результаты диссертации расширяют научное знание о кинетике и динамике замагниченной плазмы в космических и лабораторных условиях. Они позволяют лучше понять природу астрофизических источников излучения и ускоренных частиц (активные ядра галактик, джеты, нейтронные звезды, пульсары, быстрые радиовсплески) и физических явлений в поляритонных и спиновых системах. Кроме того, результаты имеют значение для перспективных разработок твердотельных логических элементов, основанных на новых принципах. Результаты диссертации могут использоваться в ИПФ РАН, ФИАН, МГУ, ИКИ РАН, ИЯИ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и других научных организациях в исследованиях нестационарных плазменных систем в различных условиях. Автореферат диссертации верно отражает содержание диссертации.

Диссертация «К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы» отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., которые относятся к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Собьянин Денис Николаевич заслуживает присуждения искомой ученой степени по научной специальности 1.3.3. — теоретическая физика.

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий отделом астрофизики и физики космической плазмы отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН

16.02.2024

Кочаровский Владимир Владиленович

Почтовый адрес: 603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Телефон: 8-831-4164894

Адрес электронной почты: kochar@ipfran.ru

Специальность докторской диссертации официального оппонента: 05.27.03 — квантовая электроника

Подпись В.В. Кочаровского заверяю,

ученый секретарь Института прикладной физики РАН, к.ф.-м.н.

Корюкин Игорь Валерьевич

Список основных публикаций официального оппонента по теме рассмотренной диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Nechaev A. A., Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V., Garasev M. A. Multicomponent current sheet of the magnetopause with an arbitrary energy distribution of particles // *JETP Letters*. 2023. Vol. 117, Iss. 3. P. 214—221.
2. Kocharovskiy V. V., Kocharovskiy Vl. V., Tarasov S. V. Atomic boson sampling in a Bose-Einstein-condensed gas // *Physical Review A*. 2022. Vol. 106, Iss. 6. Art. 063312.
3. Garasev M. A., Kocharovskiy Vl. V., Nechaev A. A., Stepanov A. N., Kocharovskiy V. V. The coexistence of orthogonal current structures and the development of different-type Weibel instabilities in adjacent regions of a plasma transition layer with a hot electron flow // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022. Vol. 62, Suppl. 1. P. S10—S24.
4. Tarasov S., Shannon W., Kocharovskiy Vl., Kocharovskiy V. Multi-qubit Bose-Einstein condensate trap for atomic boson sampling // *Entropy*. 2022. Vol. 24, Iss. 12. Art. 1771.
5. Kocharovskaya E. R., Mishin A. V., Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V. Polariton resonance in the self-modulation of the asymmetric state of a superradiant laser // *Semiconductors*. 2022. Vol. 56, Iss. 6. P. 333—339.
6. Garasev M. A., Nechaev A. A., Stepanov A. N., Kocharovskiy V. V., Kocharovskiy Vl. V. Multiscale magnetic field structures in an expanding elongated plasma cloud with hot electrons subject to an external magnetic field // *Journal of Plasma Physics*. 2022. Vol. 88, Iss. 3. Art. 175880301.
7. Garasev M. A., Nechaev A. A., Stepanov A. N., Kocharovskiy V. V., Kocharovskiy Vl. V. Weibel instability and deformation of an external magnetic field in the region of decay of a strong discontinuity in a plasma with hot electrons // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022. Vol. 62, Iss. 3. P. 182—198.
8. Kocharovskiy V., Kocharovskiy Vl., Martyanov V., Tarasov S. Exact recursive calculation of circulant permanents: A band of different diagonals inside a uniform matrix // *Entropy*. 2021. Vol. 23, Iss. 11. Art. 1423.
9. Kocharovskaya E. R., Kukushkin V. A., Mishin A. V., Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V. Dependence of the lasing spectrum and self-mode locking on the photonic band gap in class-C heterolasers with distributed feedback of waves in a Fabry-Perot cavity // *Semiconductors*. 2021. Vol. 55, Iss. 9. P. 741—748.
10. Kocharovskaya E. R., Mishin A. V., Seleznev A. F., Kocharovskiy V. V., Kocharovskiy Vl. V. Coexistence of coherent pulses formed by superradiant and quasi-stationary modes in a laser with low-Q cavity // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. Vol. 63, Iss. 11. P. 887—907.
11. Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V., Nechaev A. A. Analytical model of a magnetopause in a multicomponent collisionless plasma with a kappa energy distribution of particles // *Doklady Physics*. 2021. Vol. 66, Iss. 1. P. 9—13.
12. Tarasov S. V., Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V. Bose-Einstein-condensate fluctuations versus an interparticle interaction // *Physical Review A*. 2020. Vol. 102, Iss. 4. Art. 043315.
13. Tarasov S. V., Kocharovskiy Vl. V., Kocharovskiy V. V. Dependence of the Bose-condensate population fluctuations in a gas of interacting particles on the system size: Numerical analysis // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2020. Vol. 63, Iss. 4. P. 288—297.

14. Kocharovsky Vl. V., Mishin A. V., Seleznev A. F., Kocharovskaya E. R., Kocharovsky V. V. Parametric effect in a superradiant laser with self-mode-locking // *Theoretical and Mathematical Physics*. 2020. Vol. 203, Iss. 1. P. 483—500.
15. Kocharovsky V. V., Kocharovsky Vl. V., Martyanov V. Yu., Nechaev A. A. An analytical model for the current structure of the magnetosheath boundary in a collisionless plasma // *Astronomy Letters*. 2019. Vol. 45, Iss. 8. P. 551—564.