

«УТВЕРЖДАЮ»:

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,

профессор А.А. Федянин

 20

02

2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

*(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1) на диссертационную работу **СОБЬЯНИНА Дениса Николаевича** на тему «**К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы**» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности «1.3.3 – Теоретическая физика»*

Общая характеристика диссертации

Представленная диссертация объемом 242 стр. содержит шесть нумерованных глав, список сокращений и условных обозначений, список литературы, список иллюстративного материала и список работ, опубликованных по теме диссертации.

Первая глава диссертации является введением. В ней отражены актуальность темы исследования и степень ее разработанности, цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов.

Вторая глава содержит результаты исследований диссертанта по генерации релятивистской плазмы в магнитосфере нейтронной звезды. В ней построено обобщение подхода Бека–Коэна к неравновесным системам с разделением пространственно-временных масштабов, в котором учитываются ранее не рассматривавшиеся флуктуации управляющих

параметров системы. В качестве примера приведена нестационарная неравновесная система, в которой развивается ветвящийся процесс Севастьянова. В этой системе происходит взаимопревращение частиц нескольких типов, а число частиц во всей системе и в каждой ее подсистеме возрастает экспоненциально. Рассмотрено астрофизическое приложение и рассчитано энергетическое распределение ультрарелятивистских электронов и позитронов, рождаемых в магнитосфере нейтронной звезды в нестационарном режиме. Оказалось, что основная масса частиц находится в режиме ускорения, а доля частиц, перешедшая в режим самодействия и, по существу, определяющая скорость нарастания плотности плазмы, очень мала. В диссертации предложен и исследован новый механизм генерации плазмы в космосе – излучение субрелятивистских частиц старыми нейтронными звездами. Из-за медленного вращения эти звезды не могут работать как обыкновенные радиопульсары с эффективной генерацией электрон-позитронной плазмы в стационарном режиме непосредственно около поверхности звезды. Частицы рождаются в магнитосфере в сильно нелокальном режиме за счет освещения магнитосферы внешним космическим гамма-фоном. Рассчитаны ключевые параметры: множественность, поток и энергия излучаемых частиц. Описанный механизм объясняет происхождение Галактических позитронов. Энергия излучаемых частиц, взаимодействующих с межзвездным газом, не превышает 10 МэВ. Кроме того, в диссертации даны важные конкретные предсказания о наблюдательных проявлениях старых нейтронных звезд в радиодиапазоне. Оказалось, что такие звезды на частотах обычных радиопульсаров не наблюдаются, но могут излучать радиоволны достаточной мощности на значительно более низких частотах, попадающих в килогерцовый диапазон. Такие волны не проходят сквозь ионосферу Земли, но могут детектироваться в космосе.

Третья глава содержит результаты исследований диссертанта по вращательной динамике нейтронной звезды и ее электромагнитного поля.

Рассмотрено твердотельное вращение замагниченной нейтронной звезды вокруг неподвижной точки и вычислены электромагнитные поля, заряды и токи, индуцируемые при таком вращении. Исследован эффект самодействия, возникающий за счет отличия объемных электрических токов от коротационных токов. Такое самодействие, заключающееся во влиянии индуцируемых сил на движение вещества, приводит к возникновению прецессии нейтронной звезды даже при отсутствии поверхностных электрических токов и деформации звезды. Предложен новый метод определения магнитного поля нейтронной звезды из характеристик ее прецессионного движения. Данный метод был успешно применен диссертантом для оценки магнитного поля новых источников повторяющихся быстрых радиовсплесков.

Четвертая глава содержит результаты исследований диссертанта по динамике релятивистского струйного магнитоактивного плазменного течения в галактике М87. Исследование мотивировано необходимостью объяснить новые данные астрофизических наблюдений, не укладывающиеся в существующие представления о структуре джета, которые основаны на ранних данных об уярчении поперечного профиля радиоинтенсивности к краю. Диссертантом на основе строгих уравнений релятивистской магнитной гидродинамики построена новая модель «джет в джете». Ключевая идея данной модели в том, что наблюдаемый джет в действительности состоит из двух вложенных джетов. Рассчитаны физические параметры джета, которые были впоследствии подтверждены новейшими наблюдениями. Выдвинута идея о том, что обнаруженное в астрофизических наблюдениях качание джета с периодом 8-10 лет является отражением эффектов общей теории относительности, а именно прецессии Лензе–Тирринга аккреционного диска, наклоненного относительно оси вращения черной дыры в центре галактики М87. Получены новые оценки параметра вращения черной дыры в зависимости от ее массы и свойств аккреционного диска. Путем сравнения этих оценок с другими независимыми оценками сделан вывод о том, что

аккреционный диск является магнитно арестованным, что в дальнейшем подтвердилось. Кроме того показано, что на субпарсековых масштабах джет является релятивистски горячим, то есть показатель политропы в уравнении состояния плазмы равен $4/3$. Рассмотрены различные варианты поперечного равновесия джета, и оказалось, что данный вывод модельно независим. Изучен вопрос об изменении профиля ускорения джета при сохранении его формы при удалении от основания джета. Это изменение можно объяснить охлаждением плазмы, а факт резкого увеличения показателя политропы до значения $5/3$ является признаком существования плазмы, положительно и отрицательно заряженные частицы которой имеют одинаковую массу, то есть электрон-позитронной плазмы, и поэтому может рассматриваться как термодинамическое доказательство работы механизма Блэндфорда–Знаека запуска джета.

Пятая глава содержит результаты исследований диссертанта по динамике нерелятивистской твердотельной плазмы. В ней изучена связь спектра и кинетики поляритонной системы. Диссертантом выведена форма наблюдаемой поляритонной линии в зависимости от параметров системы. Ширина полученной лоренцианы пропорциональна скорости поглощения поляритона окружением и при большом числе заполнения обратно пропорциональна этому числу. Продемонстрирована интересная аналогия между подсистемой поляритонов и хаотическим светом. Теоретические результаты диссертанта легли в основу нового практического метода определения временной динамики неравновесной температуры резервуара после оптического возбуждения системы. Для двумерной спиновой системы, представляющей собой высокоподвижный электронный газ, заключенный в квантовую яму, обнаружена неожиданная динамика спиновой релаксации. При постепенном увеличении приложенного магнитного поля квадратичный рост времени спиновой релаксации сменяется линейным ростом с дополнительным появлением осцилляций. Диссертантом предложена новая идея о связи такого изменения с изменением типа диффузии электронов и

возникновением диффузии Бома, показано согласие построенной теории с экспериментом. Кроме того, проведено теоретическое исследование нового типа резонанса в объемной спиновой системе, возникающего при совместном воздействии на систему периодического оптического импульсного возбуждения и переменного радиочастотного поля. С помощью построенной теории полностью объяснен весь набор экспериментальных данных.

Шестая глава диссертации является заключением. В ней представлены основные результаты диссертации, отмечается их развитие в работах других ученых и согласие с результатами новейших астрофизических наблюдений.

Таким образом, диссертация содержит **новые научные результаты**, связанные с описанием, объяснением и предсказанием физических явлений и свойств с помощью построения теорий на основе фундаментальных законов природы и по своей теме и содержанию относится к научной специальности 1.3.3. «Теоретическая физика» по физико-математическим наукам. Ниже приведены соответствующие пункты паспорта специальности:

2. Свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация. Свойства вакуума, темная энергия. Общая теория относительности и ее расширения.

3. Релятивистская астрофизика.

5. Теория конденсированного состояния. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика. Теория фазовых переходов. Физическая кинетика.

10. Теория неравновесных систем. Теория хаоса и турбулентности.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием методологии теоретической физики, согласием результатов теории, эксперимента и наблюдений, сводимостью полученных результатов в частных случаях к ранее установленным результатам, а также фактом их апробации, полного опубликования в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах и применения

другими учеными в своих научных исследованиях. Результаты диссертации опубликованы в 36 работах, 15 из которых являются статьями в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени. Кроме указанных работ, отраженных в диссертации, диссертант имеет ряд важных работ и по другим темам, отличным от темы диссертации. Личный вклад диссертанта в получение результатов диссертации не вызывает сомнений, его работы известны специалистам, плагиат в диссертации отсутствует. **Автореферат диссертации соответствует содержанию самой диссертации** и удовлетворяет требованиям по объему, структуре, содержанию и оформлению, указанным в Положении о присуждении ученых степеней и действующем ГОСТ.

Значимость результатов диссертации для развития физико-математических наук

Результаты диссертации составляют крупное научное достижение в теоретической физике и проясняют процессы, происходящие в астрофизических и твердотельных плазменных системах, представляющих современный интерес. О высокой **актуальности** темы диссертации говорит тот факт, что направления научных исследований, развиваемые в диссертации, входят в перечень приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований по физическим наукам Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы), утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 3684-р от 31 декабря 2020 г. Ниже приведены соответствующие пункты перечня:

1.3.2.1. Развитие теории конденсированных сред.

1.3.2.3. Физика магнитных явлений, магнитные материалы и структуры, спинтроника.

1.3.2.5. Физика нано- и гетероструктур, мезоскопика.

1.3.2.7. Физика низких температур, квантовые кристаллы и жидкости.

1.3.3.4. Физика космических лучей.

1.3.4.1. Физика высокотемпературной плазмы и управляемый ядерный синтез.

1.3.4.2. Физика низкотемпературной плазмы.

1.3.4.3. Плазменные процессы в геофизике и астрофизике.

1.3.7.2. Физика галактик и межгалактической среды.

1.3.7.3. Физика звезд и компактных объектов.

Вклад диссертации в широкий спектр приоритетных направлений изначально предопределен выбором объекта исследований, представляющего собой наиболее распространенное состояние вещества во Вселенной, изучение которого в самых разнообразных условиях проходит через всю современную физику.

Теоретическая значимость результатов диссертации связана с их вкладом в кинетику нестационарного умножения релятивистской электрон-позитронной плазмы в сильном электромагнитном поле нейтронных звезд, расширение представлений о природе космических релятивистских плазменных выбросов, периодических быстрых радиовсплесков и источников субрелятивистских позитронов в Галактике и развитие теории неравновесных явлений в лабораторных оптических и спиновых системах. **Практическая значимость результатов** диссертации определяется возможностью их использования для определения конкретных физических характеристик релятивистских астрофизических объектов (нейтронные звезды, черные дыры и окружающая их плазма), принципиально не доступных исследованию методами экспериментальной физики, а также для проверки сложных численных расчетов в магнитной гидродинамике. Для лабораторных систем практическая значимость результатов диссертации

определяется возможностью использования этих результатов для экспериментального определения неравновесной температуры экситонного резервуара, управления условиями резонансного спинового усиления и тонкой настройки средней спиновой поляризации, что потенциально важно при разработке информационных твердотельных устройств нового типа. Некоторые такие результаты могут в будущем иметь значение и для развития лабораторной астрофизики, например, результаты по боровской диффузии, которая оказывается важной в задачах о переносе частиц в окрестностях нейтронных звезд. Кроме всего прочего, результаты диссертации могут использоваться в образовательной деятельности при разработке специальных учебных курсов по теоретической физике и астрофизике.

Идеи и результаты диссертанта уже получают дальнейшее развитие в научном мире. Ознакомление с работами диссертанта, опубликованными после написания диссертации, показывает, что и сам диссертант далее развивает направления диссертационных исследований. Так, в его работе, опубликованной как письмо в журнал *Physical Review D*, разрешена проблема о существовании радиоизлучения у нового сверхмедленно вращающегося пульсара PSR J0901-4046. С помощью исследования преобразования энергии при развитии каскада генерации электрон-позитронной плазмы диссертантом показано, что данный пульсар является самым замагниченным из известных и обладает рекордным магнитным полем 3×10^{16} Гс. В другой его работе, опубликованной в журнале *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, получили дальнейшее развитие идеи о самодействии движущегося вещества и был построен совершенный неизлучающий электромагнитный источник, проясняющий некоторые тонкие моменты фундаментальной оптики. Диссертантом показано, что естественной природной реализацией таких источников могут быть нейтронные звезды со скрытым магнитным полем.

Результаты диссертации найдут свое применение в научных и образовательных организациях: Московский государственный университет

имени М.В. Ломоносова, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук, Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук, Институт космических исследований Российской академии наук, Институт астрономии Российской академии наук, Институт ядерных исследований Российской академии наук, Объединенный институт ядерных исследований, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, – а также в иных организациях Российской Федерации и ряде зарубежных институтов и университетов, ведущих исследования по теоретической физике и смежным специальностям физико-математических наук (физика космоса и астрономия, физика плазмы, физика конденсированного состояния) или использующих в своей деятельности результаты таких исследований.

Замечания по содержанию диссертации.

1. Общее замечание: в тексте автор иногда использует необщепотребительную терминологию, например, «парсековский» или «магнитно-арестованный». Также фотоны очень высоких энергий называются «ТэВными», а не «тэВными».

2. Автор в целом подробно описывает ход получения результатов. Однако процесс генерации плазмы при взаимодействии внешних гамма-квантов с магнитосферой описан излишне лаконично: «Галактическое и изотропное внегалактическое гамма-излучение освещает магнитосферу и вызывает однофотонное рождение пар [A1]. Оценки показывают, что около 2×10^{10} гамма-квантов с энергией выше пороговой энергии $2m_e c^2$ может поглощаться в магнитосфере за секунду [A2]» (стр. 46). Это очень важный момент для многих последующих выводов, поэтому его нужно было осветить подробнее.

3. Возможность рождения позитронов старыми нейтронными звёздами критически зависит от их силы магнитного поля. Автор пренебрегает временной эволюцией этой величины («Магнитное поле одиночных нейтронных звёзд практически не затухает» (стр. 54)), хотя есть весомые указания на ослабевание магнитного поля как в ядрах старых нейтронных звёзд, так и в их коре.

4. Не совсем чётко обоснована оценка темпа производства позитронов старыми нейтронными звёздами (уравнение (158) на стр. 56). Для расчёта используется нижний предел периода P_0 , хотя кажется, что у большинства НЗ период будет ближе к максимальному P_{\max} из-за постепенной потери запаса вращательной энергии, а зависимость от периода очень сильная ($\sim P^{-10/3}$).

5. В работе принимается, что все НЗ имеют одну и ту же напряженность магнитного поля при рождении, хотя это значительное упрощение и НЗ рождаются с широким распределением величины магнитного поля. Не хватает обсуждения влияния этого факта на оценки темпа образования и на возможность детектирования радиоизлучения от старых НЗ.

6. Предположение бесконечной проводимости вещества НЗ (стр. 62) является неким упрощением, в современных моделях предсказывается существование конечного сопротивления.

7. Раздел 3.1.2 «Кватернионы» возможно следует перенести в Главу 5, где они используются гораздо активнее. В Главе 3 они применяются только в выводе уравнения (197), которое может быть получено и без них.

8. FRB 180916 с расстоянием 150 Мпк не является ближайшим детектированным быстрым радиовсплеском (стр. 75), на сегодняшний день это FRB 20200120E в галактике M81 (~3 Мпк), если не рассматривать галактический магнитар SGR 1935+2154.

9. Стр. 113: «мы предполагаем, что *ширина* внешнего джета достаточно мала по сравнению с шириной джета как целого». Опечатка, очевидно, что имеется в виду толщина внешнего джета.

Перечисленные замечания не умаляют научной ценности выполненных диссертантом исследовательских работ.

Заключение ведущей организации по диссертации

Диссертация «К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым действующим Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а автор диссертации Денис Николаевич Собьянин заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. «Теоретическая физика».

Отзыв составил директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН К.А. Постнов.

Отзыв принят на заседании Координационного Совета по астрофизике Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова. На заседании присутствовало 21 член Совета из 28. Результаты голосования: «за» – 19; «против» – 0; «воздержалось» – 2. Протокол № 21 от «14» февраля 2024 г.

Председатель Координационного совета
по астрофизике ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук

А.С. Гусев

Директор ГАИШ МГУ
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

К.А. Постнов

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по теме рассмотренной диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. O'Connor B., et al. A structured jet explains the extreme GRB 221009A // *Science Advances*. 2023. Vol. 9, Iss. 23. Art. 1405.
2. Strelkov N. V., Vedyayev A. V. Resonance method for measuring parameters of the spin transport in a spin-valve structure // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2023. Vol. 136, Iss. 4. P. 529—533.
3. Prokopov V. A., Alexeyev S. O., Zenin O. I. Black hole shadows constrain extended gravity 2: Sgr A* // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 135, Iss. 6. P. 842—843.
4. Prokopov V. A., Alexeyev S. O., Zenin O. I. Black hole shadows constrain extended gravity // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 135, Iss. 1. P. 91—99.
5. Kolesnikov D., Shakura N., Postnov K. Evidence for neutron star triaxial free precession in Her X-1 from Fermi/GBM pulse period measurements // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 513, Iss. 3. P. 3359—3367.
6. Andreev P. A. On the structure of relativistic hydrodynamics for hot plasmas // *Physica Scripta*. 2022. Vol. 97, Iss. 8. Art. 085602.
7. Tikhonova O. V., Voronina E. N. Transfer of correlations from photons to electron excitations and currents induced in semiconductor quantum wells by non-classical twisted light // *Journal of Physics-Condensed Matter*. 2022. Vol. 34, Iss. 6. Art. 065302.
8. Lipunov V., Grinshpun V., Vlasenko D. Evolutionary relations between different types of magnetized compact objects // *New Astronomy Reviews*. 2021. Vol. 93. Art. 101631.
9. Dolgov A. D., Postnov K. A. Primordial black holes and modification of Zeldovich-Novikov Mechanism // *Astronomy Reports*. 2021. Vol. 65, Iss. 10. P. 921—925.

10. Igoshev A. P., Popov S. B., Hollerbach R. Evolution of neutron star magnetic fields // *Universe*. 2021. Vol. 7, Iss. 9. Art. 351.
11. Igoshev A. P., Popov S. B. Magnetic field decay in young radio pulsars // *Astronomische Nachrichten*. 2021. Vol. 342, Iss. 1—2. P. 216—221.
12. Vedyayev A., Ryzhanova N., Strelkov N., Lobachev A., Diény B. Spin accumulation dynamics in spin valves in the terahertz regime // *Physical Review B*. 2020. Vol. 101, Iss. 1. Art. 014401.
13. Postnov K. A., Kuranov A. G., Simkin I. V. Possible electromagnetic phenomena during the coalescence of neutron star-black hole binary systems // *Astronomy Letters*. 2019. Vol. 45, Iss. 11. P. 728—739.
14. Postnov K. A., Kuranov A. G. Black hole spins in coalescing binary black holes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 483, Iss. 3. P. 3288—3306.
15. Shakirov A. M., Rubtsov A. N., Ribeir P. Spin transfer torque induced paramagnetic resonance // *Physical Review B*. 2019. Vol. 99, Iss. 5. Art. 054434.