

Отзыв официального оппонента

по диссертации Собьянина Дениса Николаевича
«К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики
неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика

Актуальность избранной темы диссертации

Диссертация отражает результаты обширных исследований ее автора по теории релятивистских и нерелятивистских плазменных систем за десятилетний период. С такими системами, сложными и, как правило, неравновесными, приходится встречаться и в лабораторном эксперименте, и при изучении дальнего космоса. Во втором случае положение усложняется тем, что эти системы не доступны для непосредственного эксперимента, но все же проявляют себя вовне через свое излучение, которое наблюдается на Земле. Лишь по этому излучению приходится делать выводы о процессах, происходящих в источниках излучения, находящихся от наблюдателя на расстояниях десятков и сотен миллионов световых лет, и даже о самой природе источников, подчас являющейся неопределенной. Во всех этих случаях сколько-нибудь надежные выводы могут быть сделаны только на основании фундаментальных физических законов и требуют применения строгих методов теоретической физики. Без развития теории, если не ограничиваться исключительно феноменологическим описанием наблюдаемых явлений без попыток проникнуть в суть явлений, совершенно невозможно добиться понимания и объяснения происходящих процессов и тем более предсказания свойств систем и их поведения в иных условиях, отличных от наблюдаемых. Уже ввиду этого актуальность темы диссертации, дающей такое развитие (а это цель, поставленная и достигнутая в диссертации), несомненна.

Не имеет смысла повторять здесь описание формальной структуры диссертации и ее результатов по главам, разделам и подразделам: все это уже указано в автореферате, который правильно отражает содержание диссертации и достижения ее автора. Стоит подчеркнуть, что актуальна не только тема, но и итоговые результаты. Они естественным образом разбиваются на три группы, относящиеся соответственно к плазме нейтронных звезд, к плазме астрофизических джетов и к плазме твердых тел. Первые две группы результатов проясняют динамику плазмы в условиях и на пространственно-временных масштабах, принципиально не достижимых в земных лабораторных условиях. Здесь далекие релятивистские астрофизические объекты выступают в качестве уникальных космических лабораторий, оказывающих на исследуемую плазму сильнейшее электромагнитное и гравитационное воздействие. Третья группа результатов проясняет природу неожиданной динамики твердотельной

плазмы, наблюдаемой в новых экспериментах с лабораторными поляритонными и спиновыми системами. Ее понимание очень важно для перспективных информационных приложений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность обеспечивается основанием теории на установленных фундаментальных физических законах и использованием при построении теории строгих методов теоретической и математической физики. Кратко рассмотрим обоснованность самых основных положений диссертации по отдельности.

Положение о том, что каскад умножения плазмы в магнитосфере нейтронной звезды при экспоненциальном нарастании числа частиц характеризуется формированием стационарного энергетического распределения электронов и позитронов, основывается на решении нелокальной задачи о превращении частиц. Для магнитосферы нейтронной звезды имеется в виду разделение электронов и позитронов на два типа: первый тип соответствует электронам и позитронам, ускоряющимся в продольном электрическом поле, а второй тип соответствует электронам и позитронам, уже ускоренным и играющим роль промежуточного звена, преобразующего работу электрического поля в энергию так называемого изгибного излучения, возникающего при движении электронов и позитронов по искривленным магнитным линиям. Изгибное излучение поглощается в магнитном поле и вызывает генерацию вторичных электронов и позитронов, что соответствует превращению первого типа электронов и позитронов во второй, а задержка в превращении приводит к тому, что доля полностью ускоренных электронов и позитронов довольно мала и составляет сотые доли процентов.

Положение о том, что наблюдаемый избыток позитронов в Галактике можно объяснить работой потухших радиопульсаров, основано на совпадении характеристик по величине потока и по энергии позитронов, генерируемых в магнитосфере старых нейтронных звезд за счет поглощения в магнитном поле космических гамма-квантов, с характеристиками, требуемыми из наблюдений. Сами характеристики позитронов вычислены из общих электродинамических выражений для потерь энергии нейтронной звезды, что позволило успешно преодолеть такую принципиальную трудность, как существенная нелокальность режима генерации, не позволяющая использовать стандартные кинетические уравнения, используемые для обычных радиопульсаров.

Положение о возможной связи периодических быстрых радиовсплесков с вращающимися нейтронными звездами, совершающими вынужденную прецессию, основано на обеспечении наблюдаемой периодичности за счет возникновения при вращении звезды внутренних электромагнитных сил, действующих на проводящее замагниченное вещество и вызывающих такую прецессию. Здесь имеет место необычный эффект самодействия, то есть

воздействие сил, генерируемых движением, на само это движение. Появление ненулевых объемных сил связано с продемонстрированным автором диссертации отличием протекающих токов от токов коротации, а сами заряды и токи определяются из уравнений Максвелла для идеально проводящего вещества.

Положение о структуре релятивистского джета в галактике M87 (модель «джет в джете») изначально выдвинуто автором для объяснения трехгорбой структуры поперечного профиля радиоинтенсивности на трех различных частотах, обнаруженной в новых астрофизических наблюдениях. Максимум интенсивности боковых пиков соответствует линии наблюдения, касательной к внутренней поверхности внешнего плазменного цилиндра, то есть внешнего джета. Построенная модель основана на уравнениях релятивистской магнитной гидродинамики и позволила автору диссертации не только показать возможность реализации подобной структуры в природе, но и вычислить ранее не известные конкретные физические характеристики джета, такие как электромагнитные поля, заряды, токи, давление, плотность, множественность, потоки масс и температура. Впоследствии эти характеристики были подтверждены. Естественной причиной реализации структуры «джет в джете» является работа двух различных механизмов запуска джета, один из которых связан с черной дырой, а другой с аккреционным диском.

Положение о связи наблюдаемого качания джета в галактике M87 с общерелятивистской прецессией Лензе-Тирринга наклоненного аккреционного диска и об оценках параметра вращения центральной сверхмассивной черной дыры M87* обосновывается уже самим фактом того, что вычисленные значения параметра вращения по теории автора диссертации не слишком малы и не превышают единицы. Отметим, что выведенные формулы не накладывают таких ограничений своей структурой, поэтому можно было бы потенциально получить невозможные значения параметра вращения, превышающие единицу, подставляя периоды различных периодических процессов, по своей природе не связанных с прецессией Лензе-Тирринга. Факт ориентации джетов по оси аккреционных дисков обоснован современным численным моделированием.

Положение о том, что джет в галактике M87 на субпарсековых масштабах является горячим, основано на наблюдаемой зависимости лоренц-фактора плазмы от радиуса джета на относительно малых расстояниях от его основания и на теоретическом уравнении поперечного равновесия джета. Какие конкретные силы в основном обеспечивают поперечное равновесие, не известно, поэтому автору диссертации пришлось рассматривать по отдельности все возможные случаи. Оказалось, что во всех случаях для джета получается показатель политропы, равный $4/3$, то есть частицы плазмы совершают не только релятивистское гидродинамическое движение, но и релятивистское термодинамическое движение. Наблюдаемое изменение профиля ускорения на более далеких расстояниях соответствует переходу к показателю политропы

5/3. Такой переход без промежуточной задержки на значении 1.44, характерной для электрон-протонной плазмы, обосновывает положение диссертации о наличии чистой электрон-позитронной компоненты в джете и работе механизма Блэндфорда-Знаека.

Положение о связи ширины поляритонной линии излучения полупроводникового микрорезонатора со скоростью ухода поляритонов из рассматриваемого поляритонного состояния и средним числом заполнения этого состояния основано на теореме о квантовой регрессии, позволяющей определить эволюцию корреляционных функций по основному кинетическому уравнению для оператора плотности. Рекомендация о возможности использования теоретически выведенной автором зависимости ширины линии для экспериментального определения временной динамики неравновесной температуры экситонного резервуара обоснована прямой демонстрацией результативности такого метода в проведенном лабораторном эксперименте.

Положение о связи скорости продольной релаксации спина электронов в квантовой яме со скоростью их пространственной диффузии в магнитном поле обосновано уравнением эволюции спиновой поляризации и столкновениями как единой причиной спиновой и пространственной диффузии. Аномальное магнитное подавление спиновой релаксации как возможное проявление диффузии Бома в двумерном электронном газе обосновывается прямым совпадением теоретических и экспериментальных результатов, при этом коэффициент пропорциональности между коэффициентом диффузии и временем спиновой релаксации не является каким-либо свободным параметром линейной модели, а полностью определяется теоретически по температуре и характеристикам исследуемого лабораторного образца.

Наконец, положение о расщеплении резонансного спектра при увеличении амплитуды радиочастотного магнитного поля во время совместного влияния на объемную спиновую систему магнитного и оптического резонанса не только получено теоретически, с помощью решения неоднородного уравнения Блоха, но и подтверждено экспериментально. Автору диссертации удалось объяснить наблюдаемую картину резонансного и нерезонансного поведения системы, восстановив все особенности сложной карты сигнала фарадеевского вращения. Использование радиочастотного поля дает новый метод управления спиновой поляризацией системы, позволяющий контролировать условия резонансного усиления и достигать тонкой настройки средней поляризации.

Достоверность и новизна

Достоверность результатов диссертации обеспечивается совпадением результатов построенной теории с результатами лабораторных экспериментов и астрофизических наблюдений. В частности, как только что отмечалось, имеется поразительное согласие теоретической и экспериментальной карты сигнала

фарадеевского вращения объемной спиновой системы. Результаты автора диссертации вызывают доверие российских и зарубежных ученых и уже используются ими. Например, официальный оппонент сам ссылается на работу [A10] по результатам параметра вращения M87*. Важным фактором, прямо свидетельствующим о достоверности результатов диссертации, является их предсказательная сила. Так, в 2017 г. автором диссертации были теоретически рассчитаны физические характеристики джета в галактике M87, которые спустя четыре года были подтверждены в новых астрофизических наблюдениях. Тогда же подтвердилась и магнитно-арестованная структура течения вокруг M87*, предсказанная автором диссертации в 2018 г.

Научная новизна диссертации обеспечена изложенными в ней новыми научными результатами автора, наиболее важные из которых заключаются в построении обобщения подхода Бека-Коэна к неравновесным системам на случай флуктуаций управляющих параметров, определении энергетического спектра релятивистских частиц в магнитосфере нейтронной звезды в нестационарном случае, изучении ранее не известного типа активности старых нейтронных звезд как генераторов субрелятивистских позитронов, построении теории релятивистских струйных выбросов, объясняющей новые наблюдательные данные по структуре и динамике джета в галактике M87, и установлении неизвестных характеристик плазменного истечения, определении уравнения состояния джета на субпарсековских масштабах, предложении самосогласованного механизма вынужденной прецессии, объясняющего наблюдаемую периодичность быстрых радиовсплесков, теоретическом вычислении ширины наблюдаемой поляритонной линии, объяснении обнаруженного явления аномального магнитного подавления спиновой релаксации двумерного электронного газа и экспериментальных спектров при новом типе совместного оптического и магнитного резонанса в объемной спиновой системе.

Структура диссертации тщательно проработана. Язык диссертации лаконичный и ясный. Грамматических претензий к тексту нет. В качестве некоторого недостатка диссертации следует отметить отсутствие подробных оценок точностей наблюдений, необходимых для анализа применимости теоретических результатов диссертации к астрофизическим источникам, которые могут наблюдаться в будущих космических экспериментах. Но это скорее не недостаток, а пожелание для продолжения исследований. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ФИАН им. П.Н. Лебедева, в ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ, ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау, ИЯИ РАН, на физических факультетах МГУ, РУДН, КГУ, и в других научных организациях.

Заключение о соответствии диссертации критериям Положения о присуждении ученых степеней (утв. постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842, действ. ред. от 25 января 2024 г.)

Диссертация выполнена автором на высоком научном уровне, обладает внутренним единством и соответствует научной специальности 1.3.3. по действующей номенклатуре (утв. Приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. N 118, действ. ред. от 24 июля 2023 г.), в частности пунктам паспорта научной специальности 2, 3, 5, 10. В диссертации разработаны теоретические положения, совокупность которых представляет собой научное достижение в теоретической физике. Результаты диссертации являются новыми и актуальными, в диссертации даны рекомендации по их использованию, но и без этих рекомендаций результаты уже используются и развиваются в работах других ученых. Результаты диссертации своевременно опубликованы в 15 статьях в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, а также были доложены на научных конференциях и семинарах. Личный вклад автора отражен в диссертации и автореферате диссертации правильно и является основным, ссылки на авторов и соавторов результатов и соответствующие литературные источники при их использовании в тексте диссертации имеются. Диссертация «К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы» соответствует всем указанным в Положении о присуждении ученых степеней требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп. 9–11, 13, 14). Автор данной диссертации Денис Николаевич Собьянин заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

доктор физико-математических наук
Вячеслав Иванович Докучаев

20.02.2024

ведущий научный сотрудник лаборатории нейтринной астрофизики отдела лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований Российской академии наук, почтовый адрес: 117312, Москва, В-312, проспект 60-летия Октября, 7а, телефон: 8(499)135-77-60, адрес электронной почты: dokuchaev@inr.ac.ru. Шифр и наименование научной специальности защищенной докторской диссертации официального оппонента: 01.04.02 Теоретическая физика.

Подпись завере

Вересникова А.В. /
секретарь ИЦ РАН

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

1. Dokuchaev V. I. Spins of supermassive black holes M87* and SgrA* revealed from the size of dark spots in Event Horizon Telescope images // *Astronomy*. 2023. Vol. 2, Iss. 3. P. 141—152.
2. Berezin V. A., Dokuchaev V. I. Weyl geometry, particle production, and induced gravity // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 2023. Vol. 20, Iss. 3. P. 490—494.
3. Dokuchaev V. I. Physical origin of the dark spot in the first image of supermassive black hole SgrA* // *Astronomy*. 2022. Vol. 1, Iss. 2. P. 93—98.
4. Berezin V. A., Dokuchaev V. I. Cosmological particle creation in Weyl geometry // *Classical and Quantum Gravity*. 2022. Vol. 40, Iss. 1. Art. 015006.
5. Dokuchaev V. I. Visualization of black hole images // *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. Vol. 77, Iss. 2. P. 327—331.
6. Berezin V. A., Dokuchaev V. I. Supervisor of the Universe // *Physics*. 2021. Vol. 3, Iss. 4. P. 814—820.
7. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O. Modeling the motion of a bright spot in jets from black holes M87* and SgrA* // *General Relativity and Gravitation*. 2021. Vol. 53, Iss. 8. Art. 83.
8. Berezin V. A., Dokuchaev V. I., Eroshenko Yu. N., Smirnov A. L. Double layer from least action principle // *Classical and Quantum Gravity*. 2021. Vol. 38, Iss. 4. Art. 045014.
9. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O. Visible shapes of black holes M87* and SgrA* // *Universe*. 2020. Vol. 6, Iss. 9. Art. 154.
10. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O. Silhouettes of invisible black holes // *Physics — Uspekhi*. 2020. Vol. 63, Iss. 6. P. 583—600.
11. Berezin V., Dokuchaev V., Eroshenko Yu., Smirnov A. Least action principle and gravitational double layer // *International Journal of Modern Physics A*. 2020. Vol. 35, Iss. 2—3. Art. 2040002.
12. Dokuchaev V. To see the invisible: Image of the event horizon within the black hole shadow // *International Journal of Modern Physics D*. 2019. Vol. 28, Iss. 13. Art. 1941005.
13. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O. The brightest point in accretion disk and black hole spin: Implication to the image of black hole M87* // *Universe*. 2019. Vol. 5, Iss. 8. Art. 183.
14. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O. Event Horizon image within black hole shadow // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2019. Vol. 128, Iss. 4. P. 578—585.
15. Dokuchaev V. I., Nazarova N. O., Smirnov V. P. Event horizon silhouette: implications to supermassive black holes in the galaxies M87 and Milky Way // *General Relativity and Gravitation*. 2019. Vol. 51, Iss. 6. Art. 81.