

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

Изучение неравновесных плазменных явлений является одной из наиболее актуальных тем современных физических исследований. Исследования поведения плазмы начали приобретать актуальность и серьезно развиваться в послевоенные годы, и в настоящее время эти классические исследования еще весьма далеки до своего завершения. Обычно они проводятся на крупных научных установках, например, типа «Токамак». Однако в последнее время ввиду развития техники лабораторного и космического эксперимента и появления новых материалов с уникальными свойствами проводится множество экспериментальных и наблюдательных исследований, в которых неожиданно открываются новые плазменные эффекты, требующие своего теоретического объяснения. Эти эффекты связаны не с упомянутыми классическими установками, а с твердотельными образцами и релятивистскими астрофизическими объектами и совершенно не изучены, что делает работу соискателя особенно актуальной. В рецензируемой диссертации получен ряд существенных результатов, позволяющих объяснить необычные характеристики и механизмы нестационарных явлений, обнаруживаемых при исследовании таких физических систем. Научные задачи, решенные соискателем в рамках общей темы исследований, разбиваются на три большие группы.

Первая группа задач связана с нейтронными звездами. Соискатель рассматривает кинетику нестационарного рождения электрон-позитронных пар в сильном магнитном поле. Важным фактором, определяющим скорость генерации плазмы, но значительно усложняющим исследование проблемы, оказывается не только нестационарность, но и нелокальность процесса, что потребовало от соискателя по-новому взглянуть на проблему. Режим принципиально существенной нелокальности удалось изучить, перейдя на уровень рассмотрения «истории жизни» отдельных частиц. При исследовании случая, когда характерная длина свободного пробега фотонов в магнитном поле по порядку величины сравнима с размерами системы, были привлечены самые общие энергетические соображения и детали процесса ускорения частиц плазмы. Это исследование привело к обнаружению нового вида активности нейтронных звезд. Оказалось, что нейтронные

звезды, считавшиеся ранее по всем своим параметрам «мертвыми», на самом деле активны, но активность эта другая и отличается от той активности, что считается стандартной для вращающихся замагниченных нейтронных звезд, являющихся прогениторами пульсаров. Соискателем показано, что нейтронная звезда, потухая, не умирает, а меняет режим генерации электрон-позитронной плазмы. Были вычислены энергетические и потоковые характеристики плазмы и оказалось, что они вполне соответствуют наблюдаемым характеристикам позитронов в нашей галактике. Происхождение позитронов в галактике является значимой научной проблемой, и в диссертации обосновывается, что их источником могут быть потухшие радиопульсары. Данный вывод имеет важное значение для физики космических лучей. Отдельное внимание в диссертации уделено рассмотрению динамики электромагнитного поля и его влияния на вращательное движение нейтронной звезды. Соискатель демонстрирует, что это влияние приводит к возникновению вынужденной прецессии, которая отличается от так называемой свободной прецессии, причиной которой является деформация нейтронной звезды, и реализуется даже в случае изотропного тензора инерции. Причина прецессии — взаимодействие электрических зарядов и токов с электромагнитным полем, то есть силы Лоренца, приложенные к звезде. В наблюдательных данных прецессия может выражаться в существовании медленной периодичности. Полученные результаты позволили соискателю оценить магнитное поле возможных прогениторов новых астрофизических источников, представляющих большой интерес, а именно, быстрых радиовсплесков (FRB) периодического класса.

Вторая группа задач связана со струйными выбросами. Соискателем исследована динамика плазмы в релятивистском выбросе из активного ядра галактики M87. Данный интересный плазменный объект находится от Земли на относительно небольшом по космическим меркам расстоянии порядка 17 МПк. Характерным масштабом измерения расстояний в самом объекте является радиус Шварцшильда центральной черной дыры галактики. Поскольку масса этой черной дыры чрезвычайно велика и достигает величины порядка 6 млрд солнечных масс, то отношение радиуса Шварцшильда к расстоянию от Земли до объекта достаточно велико и способствует наиболее детальному отображению объекта в существующих наблюдениях. Галактика M87 является поэтому перспективной космической лабораторией, в которой плазма этого релятивистского струйного выброса, также называемого джетом, помещена в уникальные условия. Ранее предполагалось, что джет может рассматриваться аналогично магнитогидродинамическому соплу, однако последние наблюдательные данные высокого пространственного разрешения демонстрируют существование в поперечном профиле радиоинтенсивности джета

сверхузкого центрального пика. Для объяснения данного весьма неожиданного факта соискатель строит новую теоретическую модель «джет в джете». В ней выдвигается идея о джете, состоящем из двух соосных джетов, вложенных один в другой. Очень важно, что данная теория позволяет находить электромагнитные поля, давление и другие физические параметры плазмы, что и было сделано соискателем. Одним из наиболее важных результатов является выведенная величина магнитного поля порядка 80 Гс на основании джета, прямо демонстрирующая, что для объяснения активности джета не требуются значительно более высокие магнитные поля порядка 1-10 кГс, считавшиеся ранее необходимыми. Другим важным результатом является вычисление потока массы, который протекает через джет, и этот поток, как показывает соискатель, примерно равен потоку аккреции Бонди. Это является свидетельством подавления аккреции на черную дыру. Джет демонстрирует в наблюдениях квазипериодическое поперечное смещение, которое объясняется соискателем как проявление прецессии джета, возникающей из-за общерелятивистской прецессии аккреционного диска. Отсюда получены оценки параметра вращения черной дыры и сделан вывод о том, что аккреционный диск является магнитно-арестованным, то есть фактором подавления аккреции является магнитное поле. Данный вывод был подтвержден в наблюдениях 2021 г. Кроме этого, соискатель исследовал вопрос об уравнении состояния плазмы в джете и ее составе. Продемонстрировано, что плазма является высокотемпературной, а за ее генерацию, как минимум, частично отвечает механизм Блэндфорда-Знаека. Соискатель также находит, что электрический ток, протекающий вдоль магнитных силовых трубок, оказывается точным интегралом движения, что в общем случае не является обязательным, но здесь реализуется и свидетельствует о существовании устойчивой структуры токов.

Третья группа задач относится к твердотельной плазме. Здесь все теоретические результаты соискателя имеют прямую связь с лабораторным экспериментом. Соискатель демонстрирует, что параметры наблюдаемого спектра излучения поляритонной системы связаны с параметрами взаимодействия поляритонов с окружением и поэтому несут информацию о его характеристиках. Изменение спектра во времени соответствует изменению характеристик взаимодействия и дает новый метод определения динамики неравновесной температуры окружения, который был реализован на практике. При исследовании спиновой динамики электронной плазмы соискателем найдена связь между движением частицы в пространстве и изменением ее спина. Наблюдение спиновой диффузии соответствует пространственной диффузии электронов. Обнаружен новый физический эффект — так называемое аномальное магнитное подавление спиновой релаксации, и на основе установленной соискателем связи между временем релаксации,

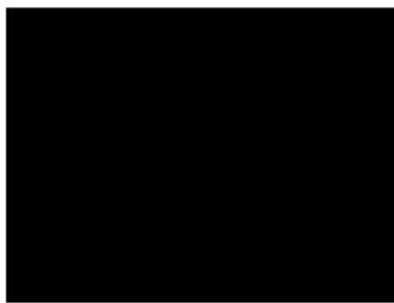
коэффициентом диффузии и спиновой длиной этот эффект объяснен как признак возникновения аномальной диффузии. Также исследована динамика спиновой поляризации при совместном воздействии на систему двух видов возбуждения: радиочастотного и оптического. Соискателю удалось теоретически объяснить полное поведение лабораторной спиновой системы, что позволяет говорить о практической применимости результатов для предсказуемого управления ее свойствами в различных задачах.

Переходя к итоговой оценке диссертации в целом, прежде всего подчеркнем, что соискателем получен ряд принципиально новых научных результатов, которые не только дают ясную картину исследованных физических явлений в неравновесных плазменных системах различного рода, но и стимулируют дальнейшее развитие соответствующих научных направлений в теоретическом и практическом ключе. Диссертация представляет собой целостное научное исследование самого серьезного уровня. В диссертации и своих работах соискатель проявил должную научную квалификацию, развитую физическую интуицию и высокие навыки физика-теоретика. Совокупность теоретических положений диссертации является научным достижением в теоретической физике и вносит значительный вклад в теорию кинетических и магнитных процессов в астрофизической и твердотельной плазме. Результаты диссертации могут использоваться как для определения параметров удаленных астрофизических объектов, не доступных прямым экспериментальным измерениям, так и для исследования и управления параметрами твердотельных плазменных систем. Диссертация хорошо структурирована и аккуратно оформлена, читать ее приятно, основное представление о результатах диссертации, а также их дальнейшем развитии в достаточно полной мере можно почерпнуть из автореферата, верно их передающего. Формальные требования выполнены, личный вклад соискателя отражен, цитирование авторов и их результатов при использовании в диссертации производится корректно. Результаты диссертации полностью обоснованы и получены путем последовательного изучения рассматриваемых явлений, выявления их механизмов и закономерностей, учета существующих теоретических, численных, экспериментальных и наблюдательных результатов и построения теории на основе фундаментальных законов физики с учетом специфики каждой конкретной исследуемой системы. Достоверность результатов диссертации обеспечена их верификацией при независимом рецензировании в известных научных журналах и подтверждена согласием с известными экспериментальными и наблюдательными результатами, в том числе появившимися значительно позже результатов соискателя. Результаты диссертации опубликованы в 15 статьях в научных журналах, входящих в международную базу данных

«Сеть науки» (Web of Science), доложены на профильных научных семинарах и конференциях, указанные в диссертации и автореферате диссертации сведения о публикациях соискателя по теме диссертации верны.

Таким образом, диссертация «К теории кинетических и магнитных процессов в задачах динамики неравновесной астрофизической и твердотельной плазмы» удовлетворяет всем требованиям для докторских диссертаций, прописанным в разделе II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Денис Николаевич Собьянин заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.3. — теоретическая физика.

Заведующий сектором
Института космических исследований
Российской академии наук (ИКИ РАН),
доктор физико-математических наук,
профессор



Петросян А. С.

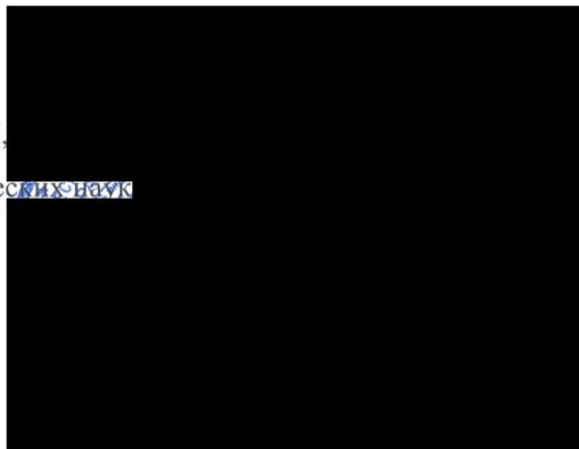
29 января 2024 г.

117997, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32, ИКИ РАН
тел. +7 (916) 557-10-25, apetrosy@iki.rssi.ru

Научная специальность защищенной докторской диссертации:
01.04.02 — теоретическая физика

Подпись заведующего сектором ИКИ РАН Петросяна Аракела Саркисовича заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физико-математических наук



Садовский А. М.

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

1. Fedotova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. Wave processes in plasma astrophysics // *Plasma Physics Reports*. 2023. Vol. 49, Iss. 3. P. 303—350.
2. Karelsky K. V., Petrosyan A. S. Formation and classification of jumps and solitary shock waves in isentropic flows of polytropic continuous media // *JETP Letters*. 2022. Vol. 116, Iss. 2. P. 90—97.
3. Yudenkova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. Poincare waves and Rossby waves in compressible shallow water flows // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2022. Vol. 134, Iss. 3. P. 327—339.
4. Fedotova M., Klimachkov D., Petrosyan A. Resonant interactions of magneto-Poincare and magneto-Rossby waves in quasi-two-dimensional rotating astrophysical plasma // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 509, Iss. 1. P. 314—326.
5. Fedotova M., Klimachkov D., Petrosyan A. Variable density flows in rotating astrophysical plasma. Linear waves and resonant phenomena // *Universe*. 2021. Vol. 7, Iss. 4. Art. 87.
6. Fedotova M. A., Petrosyan A. S. Wave processes in rotating compressible astrophysical plasma flows with stable stratification // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 131, Iss. 6. P. 1032—1055.
7. Fedotova M. A., Petrosyan A. S. Wave processes in three-dimensional stratified flows of a rotating plasma in the Boussinesq approximation // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2020. Vol. 131, Iss. 2. P. 337—355.
8. Petrosyan A., Klimachkov D., Fedotova M., Zinyakov T. Shallow water magnetohydrodynamics in plasma astrophysics. Waves, turbulence, and zonal flows // *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, Iss. 4. Art. 314.
9. Fedotova M. A., Klimachkov D. A., Petrosyan A. S. The shallow-water magnetohydrodynamic theory of stratified rotating astrophysical plasma flows: Beta-plane approximation and magnetic Rossby waves // *Plasma Physics Reports*. 2020. Vol. 46, Iss. 1. P. 50—64.
10. Zinyakov T. A., Petrosyan A. S. Spectra of decaying two-dimensional magnetohydrodynamic turbulence on a beta-plane // *JETP Letters*. 2020. Vol. 111, Iss. 2. P. 76—84.
11. Sirazov R. A., Petrosyan A. S. Nonlinear transformations of the kinetic and magnetic energies in rotating magnetohydrodynamic turbulent flows // *JETP Letters*. 2019. Vol. 110, Iss. 5. P. 329—335.