



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

академик РАН

С.А. Никитов

«07» 06 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук» (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) на диссертационную работу Лукьянцева Дмитрия Сергеевича «Влияние рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей на распространение электромагнитного излучения космических источников», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика»

Актуальность темы выполненной работы и ее связь с планами соответствующих отраслей науки

Учет рефракционных эффектов в структуре наблюдаемого электромагнитного излучения удаленных источников необходим для корректной интерпретации данных астрофизических экспериментов. Фильтрация искажений излучения, связанных с его распространением в среде, позволяет адекватно анализировать механизмы генерации и статистику источников излучения. Также рефракционные характеристики принятого излучения источника с известными свойствами можно использовать для диагностики неоднородностей космической среды. При обработке данных астрофизических экспериментов необходим учет влияния полей тяготения и неоднородностей космической плазмы на излучение. При космологических расстояниях транспорт излучения в окрестности массивных астрофизических объектов может сопровождаться гравитационным линзированием, фокусировкой потока излучения, изменением наблюдаемого спектра и другими эффектами. Структурные особенности принятого излучения, прошедшего поля тяготения, могут содержать сведения о характеристиках массивных объектов, невидимых в электромагнитном диапазоне.

Для детального восстановления возмущающих гравитационных потенциалов скрытых объектов по характеристикам принятого излучения необходимо учитывать не только маскирующее действие космической плазмы, но и присутствие в окружающем

пространстве областей стохастических неоднородностей полей тяготения, поскольку последние также могут приводить к частичному маскированию гравитационных эффектов детерминированных массивных объектов.

Целью представленной диссертации является исследование методом математического моделирования особенностей транспорта электромагнитного излучения космических источников с учетом рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей. Работа выполнялась в соответствии с планами основного научного направления Иркутского государственного университета «Исследование фундаментальных проблем физики элементарных частиц, астрофизики, физики околоземного пространства, радиофизики и геофизики» на 2021-2030 гг. и проводилась при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2020-0024, FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005) на базе уникальной научной установки «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ» (соглашение № 075-15-2021-675)

Структура и содержание работы

Представленная диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 163 наименований. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, включая 40 рисунков.

Во введении дана общая характеристика диссертации, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и научная значимость результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные положения лучевого приближения и условия его применимости. На основе фундаментального принципа Ферма представлен вывод лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера в специальной сферической системе координат, используемой для решения задач космической радиофизики. Разработан метод численно-аналитического моделирования направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения в космической среде. Выполнено тестирование компьютерных программ расчета рефракционных характеристик излучения путем сравнения с аналитическими решениями, полученными для ряда моделей космической среды.

Во второй главе с помощью разработанного метода проведено численно-аналитическое моделирование влияния гравитационных и плазменных неоднородностей

на рефракционные характеристики электромагнитного излучения космических источников. Рассмотрены различные конфигурации полей тяготения. Исследованы эффекты замыкания лучевых картин в плоскости наблюдателя в задачах просвечивания космической среды в присутствии гравитационно-линзовой системы. Представлены приближенные оценки рефракционных характеристик электромагнитного излучения в областях фокусировки. Предложен парциальный подход для приближенной оценки увеличения амплитуды поля в линзовой области, выраженной повышением плотности точек прихода лучей в картинную плоскость.

Третья глава посвящена исследованию эффектов сильной регулярной рефракции электромагнитного излучения различных частотных диапазонов при распространении в звездной короне. Поставлены численные эксперименты по оценке влияния околозвездной плазмы на направление распространения, групповую задержку и ослабление потока электромагнитного излучения. Рассмотрена возможность определения параметров плазменного возмущения по данным многоволнового просвечивания околозвездной среды.

Четвертая глава посвящена численным экспериментам по расчету эффектов Эйнштейна и Шапиро при распространении электромагнитного излучения в поле тяготения Солнца. Рассмотрена задача о распространении низкочастотного радиоизлучения естественных солнечных источников (радиовсплесков), расположенных глубоко в залимбовой области Солнца в присутствии плазменного возмущения типа коронального выброса массы. Определены условия и диапазон рабочих частот наблюдения этого эффекта.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Материалы в диссертации, в целом, изложены логично, работа хорошо структурирована и оформлена. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Публикации в рецензируемых научных изданиях отражают содержание работы. Выводы по диссертации являются полными, логичными и обоснованными.

Новизна исследования и полученных результатов

Из представленного выше краткого описания содержания диссертационной работы видно, что в ней рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с теоретическим исследованием и математическим моделированием сильных рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей космической среды при распространении электромагнитного излучения удаленных источников. К числу наиболее значимых новых научных результатов работы можно отнести следующие:

1. Для интерпретации данных измерений астрофизических прецизионных инструментов нового поколения предложен численно-аналитический метод моделирования рефракционных характеристик распространения электромагнитного излучения в космической среде с гравитационными и плазменными неоднородностями. Основу метода составляет модель эффективного показателя преломления гравитационного поля объектов, выраженного через гравитационный потенциал, и решение стохастических дифференциальных уравнений Лагранжа-Эйлера, полученных из вариационного принципа Ферма.

2. Разработан программный вычислительный комплекс для расчета направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения различных частотных диапазонов в поле тяготения группы астрофизических объектов в присутствии гравитационного шума и флуктуаций показателя преломления космической плазмы.

3. Для тестирования созданных компьютерных программ расчета получены аналитические решения для рефракционных характеристик излучения в случае простых моделей показателя преломления космической среды. Сравнение результатов аналитических и численных расчетов показали высокую степень совпадения, что позволило эффективно использовать разработанные программы для исследования транспорта электромагнитного излучения в среде с гравитационными и плазменными неоднородностями.

4. С помощью разработанных компьютерных программ проведены расчеты максимального отклонения направления распространения (эффект Эйнштейна) и дополнительной групповой задержки (эффект Шапиро) электромагнитного излучения в гравитационном поле Солнца. Результаты расчетов показали высокую степень соответствия реальным экспериментальным данным.

5. Выполнено математическое моделирование с целью оценивания рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в поле тяготения группы астрофизических объектов в условиях гравитационного линзирования. Для различных конфигураций гравитационно-линзовой системы и положений источника излучения синтезированы уникальные распределения лучевой структуры изображения в картинной плоскости наблюдателя. Показано, что под воздействием многокомпонентного флуктуирующего поля тяготения группы объектов происходит сепарация излучения в картинной плоскости наблюдателя.

6. Сделана оценка эффекта стохастического замыывания области гравитационной фокусировки при распространении излучения сквозь сложную гравитационно-линзовую

систему в присутствии неоднородностей космической плазмы. Показано, что метровый диапазон длин волн можно считать условной низкочастотной границей, при которой возможно наблюдение выраженной фокусировки и возникновение сепарации излучения.

7. Получены функциональные соотношения, связывающие групповые задержки сигналов радиопросвечивания на различных рабочих частотах с параметрами звездного коронального выброса. Показана возможность определения плотности регулярной фронтальной части выброса по данным многочастотных измерений групповых задержек сигналов просвечивания.

8. Проведено численное моделирование распространения метровых и дециметровых радиовсплесков в солнечной короне в условиях коронального выброса массы (КВМ). При условии возмущений показана возможность волноводного распространения радиоизлучения в пункт наблюдения при расположении источника глубоко в залимбовой области. Рассчитанный диапазон рабочих частот, соответствующий данному эффекту, находится в соответствии с известными экспериментальными данными. На основе результатов моделирования показано, что залимбовые источники метровых и дециметровых радиовсплесков можно рассматривать в качестве естественных зондов для мониторинга солнечных КВМ. Разработанный аппарат моделирования универсален и может быть использован для интерпретации экспериментальных данных залимбового просвечивания солнечных КВМ с космических аппаратов сигналами планетарных радаров и радиоизлучением дискретных космических источников.

Практическая и научная значимость результатов

Предложенный аппарат численно-аналитического моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения можно использовать для интерпретации экспериментальных данных, в том числе при изучении объектов, невидимых в электромагнитном диапазоне. Задавая различные конфигурации систем астрофизических объектов с соответствующими пространственными масштабами, можно синтезировать различные лучевые структуры в картинной плоскости наблюдателя, которые позволят идентифицировать скрытые массивные объекты в натуральных экспериментах. Предложенные функциональные соотношения при решении задачи многоволнового просвечивания звездной и солнечной короны могут быть использованы для оценки структуры корональных выбросов массы в ближайших и будущих экспериментах.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и университетах, специализирующихся в области космической радиофизики, физики плазмы и астрофизики (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, МГУ им.

М.В. Ломоносова, СПбГУ, КФУ, МФТИ, ИКИ РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, ИСЗФ СО РАН).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватным использованием математического аппарата, совпадением полученных аналитических результатов в предельных частных случаях с известными из литературы, а также использованием для моделирования хорошо апробированных численных схем решения дифференциальных уравнений.

Результаты, представленные в диссертации, отражены в 23 печатных работах, включая 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК: «Техника радиосвязи», «Математическая физика и компьютерное моделирование», «Компьютерные исследования и моделирование», «Современные наукоемкие технологии» и 7 статей в журналах, индексируемых международными системами цитирования Scopus и WebofScience: «St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics», «Журнал технической физики», «ProceedingSPIE», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Результаты исследований опубликованы в 3 журналах из списка по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

По результатам исследований подготовлены и сделаны доклады на 10 Всероссийских научных конференциях.

В соответствии с пунктом 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на публичную защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

Замечания по содержанию диссертационной работе.

1. В предложенной модели эффективного показателя преломления вакуума в случае множества гравитационных объектов следует пояснить как учитывается модовая структура гравитационного потенциала дополнительных гравитационных неоднородностей. В общем случае количество мод может быть больше количества массивных объектов. В каких астрофизических условиях можно использовать предложенную модель?

2. Для оценки электронной плотности фронтальной части коронального выброса звездной массы предлагается, наряду с многочастотными радиоизмерениями групповых задержек сигналов просвечивания дискретных источников, использовать данные

оптических наблюдений. Какие оптические наблюдения для этого требуются, есть ли примеры таких наблюдений?

3. При решении задачи просвечивания звездной короны внешним источником радиоизлучения в работе не исследованы возможные ограничения предлагаемого метода, связанные с тем, что корональная плазма сама является мощным радиоисточником. Каким должен быть просвечивающий сигнал по отношению к собственному корональному излучению, чтобы было возможно реализовать предлагаемый метод?

4. Также необходимо сделать техническое замечание по оформлению списка литературы диссертации. В автореферате указано общее число публикаций автора по теме диссертации, которое составляет 42. Но автор диссертации не привел все ссылки на публикации, а ссылается только на наиболее значимые собственные публикации, идеи и результаты которых он использует в диссертации.

Заключение

Отмеченные недостатки не имеют характер принципиальных возражений против основных положений работы, не снижают теоретической и практической значимости рассмотренной диссертации. Полученные результаты соответствуют поставленной цели. Лично автору принадлежит вывод основных аналитических соотношений, представленных в диссертации, разработка программного комплекса расчета и постановка численных экспериментов. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проведены совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Автореферат отражает содержание диссертации. Диссертация соответствует научной специальности 1.3.4.- Радиофизика.

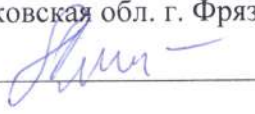
Диссертационная работа Лукьянцева Дмитрия Сергеевича на тему «Влияние рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей на распространение электромагнитного излучения космических источников» является законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, научной новизны и значимости для теории и практики.

Представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Лукьянцев Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Доклад Д.С. Лукьянцева по материалам диссертационной работы заслушан и обсужден на заседании научно-квалификационного семинара (НКС)ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по направлению «Радиофизические методы исследования Земли, околоземного космического пространства и объектов солнечной системы»

28 мая 2025 г., протокол № 3.

Отзыв подготовил:

Гаврик Анатолий Леонидович, 01.04.03. – Радиофизика, к.ф.-м.н., ученое звание ст.н.с., ведущий научный сотрудник ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 8-496-565-25-60, 141190. Россия. Московская обл. г. Фрязино. ул. Вокзальная. д. 27. кв. 24. alg248@hotmail.com
А.Л. Гаврик 

Подпись заверяю

Начальник отдела кадров ИРЭ им. В.А. Котельникова



Е.В. Нижова