

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию

Лукьянцева Дмитрия Сергеевича

«Влияние рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей на распространение электромагнитного излучения космических источников»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4. – Радиофизика

Диссертационная работа Лукьянцева Д.С. посвящена теоретическому исследованию и математическому моделированию переноса электромагнитного излучения космических источников в поле тяготения массивных объектов с учетом окружающей плазмы. Актуальность темы диссертации обусловлена фундаментальной направленностью решаемых задач и анализом возможностей наблюдения на современных измерительных установках физических эффектов, возникающих в процессе распространения волн в широком диапазоне электромагнитного спектра. Необходимо отметить, что результаты измерений содержат интегральную информацию об источнике излучения и о среде распространения. Электромагнитные волны, излученные источником, подвержены влиянию гравитационных и плазменных неоднородностей на пути к наблюдателю. Эффекты этого влияния могут маскировать структуру и параметры источника. В то же время, при известных характеристиках источника, наблюдаемые эффекты позволяют получить сведения о возмущениях среды, в том числе о гравитационных объектах, неизлучающих в электромагнитном диапазоне. Присутствие массивных объектов в окрестности траектории волны, вышедшей из источника, может привести к появлению его множественных миражей, к временным задержкам между возникающими изображениями, а также к фокусировке наблюдаемого потока излучения.

Целью диссертации является исследование аналитическими и численными методами процесса распространения электромагнитного излучения космических источников в плазменной среде, погруженной в гравитационное поле астрофизических объектов.

Для достижения поставленной цели соискателем были решены следующие задачи: разработан численно-аналитический метод моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в космической среде с гравитационными и плазменными неоднородностями, использующий приближение геометрической оптики и теорию возмущений; разработан программный комплекс расчета направления распространения, групповой задержки и пространственного ослабления потока электромагнитного излучения в космической плазме с учетом влияния окружающих

полей тяготения; проведено тестирование созданных программ расчета путем сравнения результатов вычислений с аналитическими решениями, полученными для простых моделей среды; поставлены численные эксперименты для оценки рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей в структуре электромагнитного излучения космических источников.

Научная новизна диссертации состоит в создании нового универсального аппарата численно-аналитического моделирования рефракционных характеристик распространения электромагнитного излучения в космической среде, который позволяет одновременно учесть эффекты воздействия гравитационных и плазменных неоднородностей регулярного и случайного типа. Новыми являются выполненные соискателем теоретические оценки условий наблюдения гравитационного линзирования электромагнитного излучения различных частотных диапазонов с учетом влияния хаотических плазменных неоднородностей и гравитационного шума. В работе впервые для диагностики параметров звездного коронального выброса по данным радиопросвечивания сигналами дискретных космических источников в метровом и декаметровом диапазонах получены интегральные соотношения, учитывающие рефракционные искривления траекторий просвечивания.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

В первой главе выводятся уравнения геометрической оптики в приближении, позволяющем избегать некоторые математические особенности, которые усложняют численный расчёт лучевой траектории. Для этого используется предположение, в котором линия источник-наблюдатель и расчётная траектория лежат примерно в одной плоскости. На деле же, такое приближение неплохо работает до угловых отклонений в половину радиана. Лучевые уравнения этого приближения диссертант получает на основе принципа наименьшего действия – Ферма. При этом роль времени играет бегущая вдоль луча угловая координата, а используемые углы рефракции соотносятся с проекциями волнового вектора. Пригодность полученных таким способом уравнений тестируется сравнением численных и аналитических решений. В этой же главе приводятся выражения для используемых эффективных показателей преломления в плазме и в поле тяготения и их модельные представления.

Вторая глава посвящена численному и аналитическому расчёту лучевой картины и групповых задержек радиосигнала в гравитационных полях набора массивных тел. Расчёт лучевой картины обрывается на сфере, в центре которой самое массивное тело, а радиус равен расстоянию до картинной плоскости наблюдателя. Плотность лучей используется как показатель эффектов гравитационного линзирования и ослабления радиоизлучения. Выполнены оценки замытия этих эффектов из-за присутствия случайных распределений

масс и неоднородностей космической плазмы. Такое присутствие моделируется шумом в пространственном распределении эффективного показателя преломления радиоволн.

В третьей главе влияние гравитации исключается и обсуждаются эффекты рефракции при радиопросвечивании плазменных корон Солнца и звёзд, возмущённых корональным выбросом массы (КВМ). К эффектам рефракции относятся групповая задержка, возможности фокусировки и ослабления принимаемого радиосигнала. Обсуждается возможность решения обратной задачи в рамках модельных представлений о структуре КВМ.

В четвертой главе рассчитываются угловое отклонение и групповое запаздывание электромагнитного сигнала в поле тяготения Солнца. Эффекты имеют единую природу и называются эффектами Эйнштейна и Шапиро соответственно. Известные теоретические и экспериментальные оценки этих эффектов с хорошей точностью совпали с результатами численного эксперимента на основе используемых в диссертации лучевых уравнений, подтвердив работоспособность предложенного диссертантом алгоритма расчёта.

В ходе выполнения диссертационного исследования соискателем получены значимые научные результаты, из которых следует отметить следующие:

В широком диапазоне параметров эффективного показателя преломления вакуума, выраженного через гравитационный потенциал, проведены расчеты рефракционных характеристик электромагнитного излучения при распространении в случайно-неоднородном поле тяготения группы астрофизических объектов в условиях гравитационного линзирования. Для различных конфигураций гравитационно-линзовой системы и положений источника излучения синтезированы уникальные изображения, показывающие распределения плотности лучевой структуры в картинной плоскости наблюдателя. Показано, что присутствие случайных неоднородностей поля тяготения может привести не только к замытию эффектов гравитационного линзирования или делинзирования, но и масштабному перераспределению плотности лучевых траекторий в картинной плоскости наблюдателя.

Выполнена 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, когда ещё возможно наблюдение линзовых эффектов.

Поставлены численные эксперименты для анализа характеристик распространения метровых и декаметровых радиоволн в солнечной короне в условиях коронального выброса массы (КВМ). Показана возможность волноводного распространения радиоизлучения в

пункт наблюдения при расположении радиоисточника в элипсоидальной области. Представлен аппарат численного моделирования, который можно использовать для диагностики плазменных параметров КВМ при их просвечивании с космических аппаратов, сигналами планетарных радаров и радиоизлучением дискретных космических источников.

Практическая значимость и ценность результатов работы состоит в том, что их можно использовать для интерпретации данных, полученных на существующих наблюдательных инструментах, а также при планировании будущих наземных и орбитальных обсерваторий. В частности, разработанный аппарат численно-аналитического моделирования рефракционных характеристик электромагнитного излучения применим для изучения гравитационных 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 массивные объекты, не участвующие в электромагнитном взаимодействии и недоступные прямому наблюдению. Последнее является одной из наиболее актуальных космологических задач. Полученные функциональные соотношения в задаче многоволнового просвечивания звездной и солнечной короны могут быть использованы для оценки плазменной структуры корональных выбросов массы в ближайших и будущих экспериментах.

Результаты работы могут быть использованы в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, МГУ, СПбГУ, КФУ, МФТИ, ИКИ РАН, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, ИЗМИРАН, ИСЗФ СО РАН, ИПГ им. академика Е.К. Федорова, ЮФУ, ВолГУ.

На основании полученных результатов соискателем сформулированы основные защищаемые положения, которые отражают суть полученных результатов, соответствуют поставленной цели и задачам. В них автор кратко суммировал свои основные результаты, имеющие приоритетный характер, и которые впечатляют значительным объемом выполненной работы. Полученные в работе результаты являются новыми и достоверными, выводы и защищаемые положения достаточно обоснованы. Достоверность подтверждается 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.

Диссертация соответствует следующим направлениям исследований, отраженным в паспорте специальности 1.3.4. Радиофизика:

2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах;

4. Исследование флуктуаций, шумов, случайных процессов и полей в сосредоточенных и распределенных стохастических системах (статистическая радиофизика). Создание новых методов анализа и статистической обработки сигналов в условиях помех;

5. Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач, а также методах дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Радиоастрономические исследования ближнего и дальнего космического пространства.

Диссертация соответствует отрасли физико-математических наук.

По работе имеются следующие замечания:

- 1) Перед написанием соотношения (1.1.2) диссертанту следовало кратко разъяснить суть приближения, в котором удобно и возможно использование упрощённого выражения для элемента длины dS лучевой траектории.
- 2) Представление соотношением (1.2.15) эффективного показателя преломления как произведения известных показателей преломления в плазме и гравитационном потенциале, несмотря на ссылку, следовало также пояснить простеньким выводом общего характера, что не составило бы труда диссертанту, но обеспечило лёгкость прочтения.
- 3) Используемая в диссертации схема оценки распределения интенсивности не содержит учёта поглощения радиоволны в плазме. Игнорирование этого эффекта в рассмотренных примерах кажется вполне обоснованным. Тем не менее, дальнейшее развитие разработанной схемы расчёта в приложении к плазменным атмосферам Солнца и звёзд должно включать поглощение, в частности, кулоновское. При рефракционном отражении кулоновские потери высокочастотного сигнала могут существенно превышать потери низкочастотного.
- 4) К мелким замечаниям можно отнести неуказание размерности параметра N_e в формулах с численными коэффициентами раздела 1.2.1.

Перечисленные замечания не снижают общую положительную оценку работы, носят рекомендательный характер для дальнейшего развития темы исследования. Полученные результаты прошли необходимую апробацию, были представлены и доложены на многочисленных Всероссийских и Международных научных конференциях и симпозиумах. По материалам диссертации опубликовано 42 работы, в том числе 6 в журналах из списка ВАК: «Техника радиосвязи», «Современные наукоемкие технологии», «Математическая физика и компьютерное моделирование», «Компьютерные исследования

и моделирование», — 7, индексируемых Scopus и Web of Science: «St. Petersburg Polytechnic University Journal Physics and Mathematics», «Журнал технической физики», «Proceeding SPIE», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации, адекватно отражает полученные в работе результаты

Совокупность представленных научных результатов позволяет сделать заключение, что диссертационная работа Лукьянцева Д.С. «Влияние рефракционных эффектов гравитационных и плазменных неоднородностей на распространение электромагнитного излучения космических источников», является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в рамках актуального направления радиофизики. Диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Лукьянцев Дмитрий Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4-Радиофизика

Официальный оппонент:

18.06.2025

Уралов

Уралов Аркадий Михайлович

Уралов Аркадий Михайлович – Главный научный сотрудник отдела радиоастрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН), доктор физико-математических наук.

Диссертация защищена по специальности:

01.03.03 – гелиофизика и физика Солнечной системы

Адрес: Иркутск, ул. Лермонтова, д.335, кв.16

Телефон: +79148838611

e-mail: uralov@iszf.irk.ru

Подпись Уралова А. М. заверяю
ученый секретарь ИСЗФ СО РАН



Салахутдинова И.И.