

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ.П.Н.ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

*ЛАРЧЕНКОВА ТАТЬЯНА ИВАНОВНА*

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ГРАВИТАЦИОННЫХ  
ПОЛЕЙ НА НАБЛЮДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте имени П.Н. Лебедева Российской академии наук.

**Бисноватый-Коган Геннадий Семенович**

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института космических исследований РАН (ИКИ РАН)

**Долгов Александр Дмитриевич**

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией космологии и элементарных частиц ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

**Черепашук Анатолий Михайлович**

доктор физико-математических наук, академик РАН, научный руководитель Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

**Официальные  
оппоненты:**

**Ведущая  
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук

Защита диссертации состоится 9 июня 2021 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.01 Физического института имени П.Н. Лебедева РАН по адресу: г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд А2, Институт космических исследований РАН, зал семинаров – к. 707.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, и на сайтах ФИАН <http://www.lebedev.ru> и <http://www.asc-lebedev.ru> в разделе «Диссертационный совет». Заверенные отзывы направлять по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53, ФИАН (АКЦ), диссертационный совет Д 002.023.01.

Автореферат разослан 5 марта 2021 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

Ю.А.Ковалев

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

При исследовании космических объектов и явлений в электромагнитной области спектра наблюдателям, как правило, доступна пространственная, временная и спектральная информация. Получаемые данные позволяют измерять и изучать наблюдаемые объекты исследования, а также разрабатывать модели, необходимые для понимания происходящих в них физических процессов. При этом важно отметить, что доступная в измерениях информация содержит не только сведения непосредственно о самом изучаемом объекте или явлении, но и о среде, в которой распространяется его излучение. В частности, испущенные источником фотоны при движении к наблюдателю испытывают воздействие существующих вдоль луча зрения неоднородностей гравитационных полей, в том числе создаваемых движущимися массивными объектами. С одной стороны это воздействие искажает информацию о самом источнике, а с другой – позволяет получить информацию о свойствах расположенных вблизи луча зрения объектах. При этом эти объекты могут проявлять себя только посредством гравитационного взаимодействия, слабо излучая или вообще не излучая в электромагнитном диапазоне. Важно отметить, что гравитация является универсальным видом взаимодействия между объектами, имеющими массу. Это взаимодействие проявляется на всех масштабах – от малых небесных тел до массивных скоплений галактик, что позволяет использовать наблюдения гравитационных эффектов в широком диапазоне масс.

Наличие массивных объектов вблизи луча зрения способно приводить к изменению наблюдаемого положения источника излучения, появлению его множественных изображений, изменениям наблюдаемого спектра, усилению наблюдаемого потока излучения, вызывать временную модуляцию наблюдаемого периодического излучения, а также временную задержку между возникающими изображениями источника. Уже сегодня при анализе наблюдательных данных для восстановления собственных параметров изучаемых источников становится важным учет значительной части этих эффектов. Как было отмечено выше, помимо “негативного” (искажающего) воздействия, они могут быть использованы в качестве уникальных инструментов для получения информации о невидимых (или слабо излучающих) массивных космических объектах любой массы и природы.

Определение положений (координат) источников космического излучения, их собственных движений, тригонометрических параллаксов являются основными задачами астрометрии и важнейшими данными, которые используются во всех

областях наблюдательной астрономии. Корректность решения астрометрических задач во многом определяется наличием надежной небесной системы отсчета. Международная небесная система отсчета (International Celestial Reference Frame, ICRF), как и ее последующие модификации (ICRF2, ICRF3), построены на основе измерения положений опорных внегалактических источников, таких как, квазары и далекие галактики. Движущиеся вблизи луча зрения на эти опорные источники звезды и другие массивные объекты Галактики будут вызывать изменение их видимых положений во времени из-за отклонения лучей света в гравитационных полях, создаваемых этими массивными объектами. Возникает так называемый эффект «дрожания» координат наблюдаемых внегалактических источников, в том числе источников, на которых построена система ICRF. Адекватное определение параметров этого эффекта необходимо для понимания степени его влияния на точность реализации системы отсчета и необходимости его учета при долговременных астрометрических наблюдениях. Кроме астрометрического применения, измерение для разных направлений на небе эффекта дрожания позволит получить информацию о структуре Галактики и протестировать применимость ее разных моделей.

Помимо влияния на точность определения положения источников космического излучения движущиеся вблизи луча зрения массивные объекты способны оказывать также влияние на их временные характеристики, в частности, вызывать модуляцию моментов прихода импульсов пульсаров из-за эффекта Шапиро – релятивистской временной задержки распространения электромагнитного сигнала в статичном сферически-симметричном гравитационном поле точечной массы. В случае, когда пульсар находится в центральной области шарового звездного скопления, где наблюдается высокая плотность звезд и звездных остатков, возникает стохастический эффект Шапиро, который проявляется в виде низкочастотного шума в наблюдениях моментов прихода импульсов этого пульсара. Знание характеристик этого шума позволит его выделить в наблюдаемых данных, улучшить процедуру оценки параметров пульсара в данных его хронометрирования, а также получить информацию о структуре звездного скопления. Наблюдения единичных событий эффекта Шапиро с большими амплитудами могут быть использованы для обнаружения массивных компактных релятивистских объектов, например, черных дыр промежуточных масс, которые могут находиться в центрах некоторых массивных шаровых скоплений согласно ряду имеющихся наблюдательных данных.

В случае, когда массивный объект оказывается на луче зрения, могут наблю-

даться события так называемого сильного гравитационного линзирования. В этом случае у наблюдателя появляется созданный природой эффективный телескоп, позволяющий решать актуальные космологические и астрофизические задачи, в том числе, определение постоянной Хаббла. В случае сильного гравитационного линзирования наблюдаются множественные изображения фонового источника. Чем массивнее линза, тем больше будет наблюдаемое угловое расстояние между изображениями линзируемого источника при том же прицельном параметре. Поэтому легче обнаружить гравитационно-линзированные системы, в которых линзой является массивная галактика или массивное скопление галактик. Первым зарегистрированным событием сильного гравитационного линзирования было обнаружение двух изображений квазара B0957+561, которые явились результатом линзирования массивной галактикой. Если источником излучения является протяженный объект, например, галактика, то вокруг галактики-линзы может наблюдаться кольцо Эйнштейна-Хвольсона или часть этого кольца. Если в качестве линзы выступает скопление галактик, то галактики, расположенные за этим скоплением, наблюдаются в виде ярких протяженных дуг. Такие гигантские яркие дуги были впервые обнаружены в скоплении галактик A370 и позднее интерпретированные как изображения линзированных этим скоплением фоновых галактик.

Измерение потоков, положений линзы и линзированных изображений квазара, а также временного запаздывания между этими изображениями позволяет восстановить распределение массы в линзе, а также определить основные параметры космологической модели. К таким параметрам относится постоянная Хаббла, для которой в последние несколько лет появились свидетельства о различии ее значений для ранней и поздней Вселенной. Если это различие не связано с ошибками в измерениях, то возникает необходимость в пересмотре и модификации стандартной космологической модели, что в свою очередь, может привести к новому пониманию физических процессов происхождения структуры Вселенной. Таким образом, становятся актуальными любые независимые от лестницы расстояний методы определения постоянной Хаббла. Одним из наиболее перспективных методов является использование наблюдений событий сильного гравитационного линзирования переменных источников, для которых возможно с хорошей точностью измерить временное запаздывание между изображениями и их положение относительно линзы. Одним из подходящих объектов для таких измерений является гравитационно-линзированная система B0218+357, у которой наблюдаются два изображения компактного ядра и крупномасштабный струйный выброс,

центральная область которого также линзируется находящейся на луче зрения галактикой, что приводит к возникновению наблюдаемых кольцевых структур. Обсуждение вопросов построения модели линзирования этой системы с учетом струйного выброса, вырождения параметров, возможность использования дополнительных параметров для определения постоянной Хаббла является в настоящее время крайне актуальным. Не менее важно понимание перспектив обнаружения планируемыми обсерваториями событий сильного гравитационного линзирования в диапазоне от далекого инфракрасного до миллиметрового, которые также могут быть использованы для статистически значимого определения постоянной Хаббла и других космологических параметров.

Перечисленные выше эффекты Общей теории относительности: отклонение лучей света в гравитационном поле массивного объекта, эффект Шапиро, сильное гравитационное линзирование могут быть использованы для поиска невидимых по разным причинам объектов в широком диапазоне их масс.

Эта задача в последнее время приобретает все большую актуальность. В частности, на основании анализа наблюдательных данных было установлено, что наблюдаемое вещество составляет лишь несколько процентов от полной массы Вселенной и проблема наблюдения скрытого вещества и установления его природы является одной из ключевых в космологии. Из анализа кривых вращения спиральных галактик оказалось, что масса галактик, необходимая для объяснения этих кривых, в десять раз превосходит суммарную массу всех известных компонент спиральных галактик (звезд, газа, пыли). Кроме того, уже в 1970-х годах было известно, что диски галактик нестабильны в отсутствие массивного гало, состав которого все еще остается неизвестен. Эти выводы оказываются справедливыми и для нашей Галактики; при этом полагают, что ее дисковая составляющая не содержит значительного количества темного вещества, а вот более 90% вещества гало не наблюдаемо. Это невидимое гало может состоять как из барионного, так и небарионного вещества. В первом случае скрытую массу гало могут составлять компактные массивные объекты, такие как коричневые карлики, первичные черные дыры, белые карлики, подобные Юпитеру планеты и т.д. Во втором случае небарионное вещество может быть представлено слабо взаимодействующими массивными невидимыми частицами (WIMPs), также способными скучиваться в компактные объекты темной материи. Таким образом, оказывается важным использование всех возможных способов для обнаружения невидимого вещества.

В последние годы в наблюдениях обнаруживается все большее число карликовых и ультрадиффузных галактик, которые содержат мало звезд. Вероятно

эти объекты представляет собой некий промежуточный класс объектов между нормальными галактиками и массивными темными гало, содержащими мало барионов и в которых не произошло образование звезд. Обнаружить такие темные гало в наблюдениях возможно только по их гравитационному взаимодействию, а также, в случае попадания на луч зрения, с помощью регистрации линий поглощения нейтрального водорода в наблюдаемых спектрах далеких квазаров. Наблюдаемые параметры линий характеризуют свойства вещества в области поглощения, позволяют определить значение доплер-параметра, лучевую концентрацию нейтрального водорода, а также красное смещение поглощающего объекта. Еще более важным моментом является оценка физических параметров поглощающих объектов. Актуальной задачей в этом направлении становится разработка методов определения физических характеристик поглощающих объектов из анализа наблюдаемого в спектрах далеких квазаров леса линий поглощения Лайман-альфа. Использование таких методов является одним из немногих способов получения информации о параметрах темных гало с массами  $\sim (10^8 - 10^9)M_{\odot}$ .

Проблема обнаружения скрытого вещества существует и на более мелких пространственных масштабах. Половину массы шаровых звездных скоплений составляют маломассивные звезды и белые карлики, которые ненаблюдаемы из-за их малой светимости. В результате стратификации по массе тяжелые звезды имеют тенденцию опускаться к ядру скопления в отличие от популяции легких объектов. Следовательно, невидимую компоненту скопления можно ожидать обнаружить на его периферии. Обнаружение значительного числа пульсаров в шаровых скоплениях, например, в таких как 47 Tucanae, Terzan 5, M15 делают актуальным обсуждение вопроса об их использовании для изучения невидимого вещества как в самих шаровых скоплениях, так и в Галактике вдоль луча зрения в направлении этих скоплений. Представляется возможным также использовать хронометрирование пульсаров, расположенных непосредственно за скоплением.

Таким образом, актуальность рассматриваемой тематики обусловлена фундаментальным характером изложенных выше проблем и задач, а также развитием современных технологий и характеристик наблюдательных инструментов, позволяющих проводить высокоточные наблюдения во временной, пространственной и спектральной областях. Существующие в настоящее время инструменты уже позволяют измерять положения ультра-компактных ядер галактик методами радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами с точностью суб-нанорадиан, а астрометрические наблюдения в оптическом диапазоне (обсерватория Gaia) достигают точности измерения нескольких угловых микросекунд в год. Точность

определения моментов прихода импульсов миллисекундных пульсаров на длительных интервалах времени приближается к 50 нс. Спектральное разрешение спектрометров высокого разрешения уже сегодня достигает величины  $\sim 5$  км/с (например, спектрометр ультрафиолетового и видимого диапазонов VLT/UVE).

Настоящая диссертация посвящена изучению и использованию эффектов, возникающих при распространении излучения далеких космических источников в гравитационных полях, создаваемых небесными массивными объектами, движущимися вблизи луча зрения или расположенными вдоль луча зрения.

## Цели диссертации

1. Расчет и моделирование искажений наблюдаемых пространственных, временных и спектральных характеристик излучения космических объектов и явлений, возникающих вследствие неоднородностей гравитационных полей, вызываемых расположенными на луче зрения или вблизи него массивными объектами.
2. Разработка методов поиска, определения физических характеристик и установления природы скрытого вещества и объектов, не излучающих или слабо излучающих в электромагнитном диапазоне, но проявляющих себя посредством гравитационного взаимодействия.

## Научная новизна

В работе впервые:

1. Показано, что флуктуации гравитационного поля Галактики накладывают ограничения на точность определения координат внегалактических источников на уровне микросекунд – десятков микросекунд дуги в зависимости от их положения на небесной сфере (эффект дрожания). Впервые построены карты распределения по небесной сфере характерных величин эффекта дрожания координат для многокомпонентных моделей Галактики. Получены основные статистические и спектральные характеристики такого гравитационного «шума», в том числе наклон спектра мощности. Это может позволить отличить в наблюдениях данный вид шума от шумов, обусловленных другими физическими процессами.



2. С использованием дифференциальной астрометрии предложена оригинальная методика проведения эксперимента для регистрации эффекта дрожания координат источников, основанная на многочастотных наблюдениях двух выборок внегалактических источников: целевой, источники которой расположены в направлении на центральную область Галактики, и контрольной, источники которой находятся на высоких галактических широтах. Показано, что современные интерферометры могут обнаружить этот эффект на масштабе нескольких лет.
3. Получено выражение для временного запаздывания моментов прихода импульсов (МПИ) пульсара, находящегося в шаровом скоплении. С помощью аналитических расчетов показано, что случайный процесс, обусловленный стохастическим эффектом Шапиро, проявляется, главным образом, как шум наблюдаемой частоты вращения пульсара. Определены спектральные характеристики такого низкочастотного шума хронометрирования миллисекундных пульсаров в шаровых скоплениях. Для пульсаров в шаровых скоплениях 47 Tucanae, M15 и Terzan 5 рассчитана частота событий релятивистского временного запаздывания МПИ, вызываемых пролетом вблизи луча зрения массивных тел, как самого скопления, так и Галактики, а также количество таких событий на интервале пяти лет наблюдений.
4. Предложено использовать высокоточные долговременные наблюдения МПИ пульсаров, расположенных в центральных областях шаровых звездных скоплений, для поиска массивных объектов Галактики и шаровых скоплений, в том числе, черных дыр промежуточных масс, которые предположительно могут находиться в их центрах. Основываясь на современной точности хронометрирования и имеющейся выборке пульсаров в шаровых скоплениях, показана принципиальная возможность регистрации таких объектов с массами  $\sim 10^4 M_{\odot}$ .
5. Проведенный анализ долговременных наблюдений пульсара PSR B0525+21 позволил обнаружить модуляцию остаточных уклонений МПИ характерной формы, которая может быть интерпретирована как задержка Шапиро в гравитационном поле невидимого массивного объекта, расположенного вблизи луча зрения на пульсар. Это первая потенциальная регистрация темного массивного объекта по данным хронометрирования одиночного радиопулсара.
6. Предложен оригинальный метод анализа спектров поглощения квазаров и

далеких галактик, с помощью которого возможно связать наблюдаемые характеристики спектров с физическими параметрами поглощающих объектов, такими как, масса, размер и средняя плотность. Применение этого метода к анализу нескольких каталогов систем линий поглощения металлов и систем линий поглощения Лайман-альфа показало, что регистрируемые системы линий относятся к двум типам объектов с разными свойствами. Полученные оценки параметров поглощающих объектов в случае систем линий поглощения металлов согласуются с параметрами галактик с массами  $\sim (10^{11} - 10^{12})M_{\odot}$ . Для леса линий поглощения Лайман-альфа параметры поглощающих объектов значительно отличаются от галактических и оказываются близкими к параметрам темных гало с массой  $\sim 10^8 M_{\odot}$ , существование большого количества которых предсказывается в численных моделях.

7. В результате проведенного моделирования показано, что наблюдаемые в изображениях ряда активных ядер галактик крупномасштабные кольцевые структуры могут возникать из-за эффекта сильного гравитационного линзирования релятивистских струй на галактиках разных типов. Предложено использовать наблюдения линзированных релятивистских струй на сверхмалых угловых масштабах для построения корректных моделей спиральных галактик-линз, а наблюдаемый на этих масштабах угол выхода струи из центральной области для линзированных изображений в качестве дополнительного параметра для определения постоянной Хаббла.
8. Проведены детальные подсчеты сильно линзированных источников для разных длин волн в диапазоне от 70 до 2000 мкм, которые могут быть зарегистрированы в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах электромагнитного спектра будущими космическими обсерваториями с телескопом с охлаждаемым до криогенных температур зеркалом. Получены распределения таких линзированных источников в зависимости от красного смещения и коэффициента усиления, а также распределение линз по массам. Показано, что в результате реализации программы наблюдений событий сильного гравитационного линзирования в рамках научной программы космической обсерватории «Миллиметрон» могут быть обнаружены порядка 1000 гравитационно-линзированных систем при обзоре на небе площадки размером всего 1 квадратный градус, что более чем на порядок превосходит количество таких объектов, зарегистрированных обсерваторией *Herschel* за все время ее работы.

## Научная и практическая значимость

Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах. Полученные результаты могут быть использованы при анализе данных, полученных как на существующих наблюдательных инструментах, так и при планировании будущих космических и наземных обсерваторий.

Вычисленные в зависимости от направления на небесной сфере значения предела точности абсолютной астрометрии, обусловленного эффектом «дрожания» координат внегалактических источников, а также предложенная методика регистрации этого эффекта, имеют как фундаментальное, так и прикладное значение при использовании Международной небесной системы отсчета ICRF и ее последующих модификаций (ICRF2, ICRF3).

Предложенный метод поиска в данных хронометрирования пульсаров характерной модуляции их моментов прихода импульсов может использоваться для обнаружения невидимых компактных объектов Галактики и массивных шаровых звездных скоплений, в том числе черных дыр промежуточных масс, которые могут находиться в центрах таких скоплений. Регистрация с помощью этого метода события с характерной модуляцией МПИ одного из пульсаров в данных долгопериодического мониторинга является подтверждением его практической значимости.

Разработанный метод анализа леса линий поглощения Лайман-альфа в спектрах далеких квазаров позволяет получить оценки физических параметров поглощающих массивных объектов, которые мало изучены в силу проблематичности их непосредственной регистрации. Дальнейшее развитие предложенного метода совместно с численным моделированием позволят получить дополнительную информацию о плохо изученной в настоящее время области мелкомасштабной космологии.

Наблюдения событий сильного гравитационного линзирования как компактных, так и протяженных внегалактических источников, в том числе АЯГ со струйными выбросами, и их последующий анализ, в настоящее время активно используется в наблюдательной космологии и астрофизике в качестве независимого от других методов получения значений космологических параметров и распределения темного вещества. Использование дополнительных параметров, позволяющих снять вырождения в моделях гравитационно-линзированных объектов, способствуют повышению точности определения космологических параметров, в том числе постоянной Хаббла.

## Результаты, выносимые на защиту

1. Построены карты неба, показывающие, что локальные флуктуации гравитационного поля Галактики ограничивают точность определения координат внегалактических источников на уровне микросекунд – десятков микросекунд дуги в зависимости от направления на небе. Определены основные статистические и спектральные характеристики гравитационного шума, обусловленного такими флуктуациями.
2. Предложена методика проведения эксперимента для регистрации гравитационного шума, вызываемого неоднородностями гравитационного поля Галактики. Показано, что современные интерферометры могут обнаружить этот эффект на масштабе нескольких лет.
3. Определены спектральные характеристики низкочастотного шума хронометрирования миллисекундных пульсаров, вызываемого движением звезд в шаровых скоплениях. Для пульсаров в нескольких шаровых скоплениях рассчитаны вероятность и частота событий релятивистского временного запаздывания моментов прихода импульсов, вызываемых пролетом вблизи луча зрения массивных тел.
4. Предложен способ обнаружения массивных темных объектов, в том числе, черных дыр промежуточных масс, по регистрации запаздывания моментов прихода импульсов миллисекундных пульсаров. Для пульсара PSR B0525+21 обнаружена модуляция остаточных уклонений моментов прихода импульсов, предположительно связанная с близким к лучу зрения пролетом массивного темного тела.
5. Предложен оригинальный метод анализа наблюдаемого леса линий поглощения Лайман-альфа и линий металлов в спектрах квазаров для определения физических параметров поглощающих объектов. Показано, что эти объекты представляют две разные популяции: с параметрами типичных галактик с массой  $\sim (10^{11} - 10^{12})M_{\odot}$  и маломассивные темные гало с массой  $\sim 10^8 M_{\odot}$ .
6. Показано, что крупномасштабные кольцевые структуры в изображениях активных ядер галактик могут возникать из-за сильного гравитационного линзирования релятивистских струй на галактиках. Предложено использовать угол выхода струи для линзированных изображений на сверхмалых угловых

масштабах и скорость движения сгустков струи в качестве дополнительных параметров для независимого определения постоянной Хаббла.

7. Для космической обсерватории «Миллиметрон» проведен подсчет ожидаемых сильно линзированных источников, получены их распределения по красным смещениям и коэффициентам усиления. Получена оценка числа гравитационно-линзированных активных ядер галактик, подходящих для определения постоянной Хаббла.

## Список работ, опубликованных по теме диссертации

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

[A1]. *Larchenkova T.I., Lyskova N.S., Petrov L., Lutovinov A.A.* Influence of the Galactic Gravitational Field on the Positional Accuracy of Extragalactic Sources. II. Observational Appearances and Detectability // *The Astrophysical J.* 2020. V. 898, P. 51–57

[A2]. *Демянский М., Дорошкевич А.Г., Ларченкова Т.И.* Лес линий Лайман-альфа как индикатор элементов крупномасштабной структуры // *Письма в Астрон. журн.* 2020. Т. 46, № 6, С. 383–394 (Англоязычная версия: *Demianski M.I., Doroshkevich A.G., Larchenkova T.I.* The Lyman-Alpha Forest as an Indicator of Large-Scale Structure Elements // *Astronomy Letters.* 2020. V. 46, Issue 6, P. 359–369)

[A3]. *Ларченкова Т.И., Ермаш А.А., Дорошкевич А.Г.* Перспективы наблюдений гравитационно-линзированных источников космическими обсерваториями субмиллиметрового диапазона // *Письма в Астрон. журн.* 2019. Т. 45, № 12, С. 866–881 (Англоязычная версия: *Larchenkova T.I., Ermash A.A., Doroshkevich A.G.* Prospects for Observations of Gravitationally Lensed Sources by Submillimeter Space Observatories // *Astronomy Letters.* 2019. V. 45, Issue 12, P. 821–835)

[A4]. *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A., Lyskova N.S.* Influence of the galactic gravitational field on the accuracy of extragalactic sources // *The Astrophysical J.* 2017. V. 835 P. 51–60

[A5]. *Ларченкова Т.И., Лыскова Н.С., Лутовинов А.А.* Наблюдения линзированных релятивистских струй как способ ограничения параметров галактик-линз // *Письма в Астрон. журн.* 2011. Т. 37, № 7, С. 483–490 (Англоязычная версия:

*Larchenkova T.I., Lyskova N.S., Lutovinov A.A.* Observations of lensed relativistic jets as a tool for constraining lens galaxy parameters // *Astronomy Letters*. 2011. V. 37, Issue 7, P. 441–447)

[A6]. *Ларченкова Т.И., Лутовинов А.А., Лыскова Н.С.* Моделирование изображений релятивистских струй, линзированных галактиками с разным распределением поверхностной плотности вещества // *Письма в Астрон. журн.* 2011. Т. 37, № 4, С. 258–273 (Англоязычная версия: *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A., Lyskova N.S.* Modeling the images of relativistic jets lensed by galaxies with different mass surface density distributions // *Astronomy Letters*. 2011. V. 37, Issue 4, P. 233–247)

[A7]. *Ларченкова Т.И., Лутовинов А.А.* Могут ли известные миллисекундные пульсары помочь в обнаружении черных дыр промежуточных масс в центрах шаровых звездных скоплений // *Письма в Астрон. журн.* 2009. Т. 35, № 4, С. 265–271 (Англоязычная версия: *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A.* Can the known millisecond pulsars help in the detection of intermediate-mass black holes at the centers of globular clusters? // *Astronomy Letters*. 2009. V. 35, Issue 4, P. 235–240)

[A8]. *Ларченкова Т.И., Лутовинов А.А.* О возможности наблюдения эффекта Шапиро для пульсаров в шаровых скоплениях // *Письма в Астрон. журн.* 2007. Т. 33, № 7, С. 513–527 (Англоязычная версия: *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A.* On the possibility of observing the Shapiro effect for pulsars in globular clusters // *Astronomy Letters*. 2007. V. 33, Issue 7, P. 455–467)

[A9]. *Ларченкова Т.И., Копейкин С.М.* Эффект Шапиро – возможная причина низкочастотных шумов пульсаров в шаровых скоплениях // *Письма в Астрон. журн.* 2006. Т. 32, № 1, С. 20–31 (Англоязычная версия: *Larchenkova T.I., Kopeikin S.M.* Shapiro effect as a possible cause of the low-frequency pulsar timing noise in globular clusters // *Astronomy Letters*. 2006. V. 32, Issue 1, P. 18–28)

[A10]. *Larchenkova T.I., Doroshenko O.V.* Pulsars as a tool for detection of dark matter in the Galaxy // *Astronomy and Astrophysics* 1995. V. 297. P. 607–609

### **Другие публикации автора по теме диссертации**

[B1]. *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A., Lyskova N.S.* An influence of the matter distribution on the positional accuracy of reference sources // *Proceedings of the 49th Rencontres de Moriond (Cosmology 2014)*, edited by E.Auge, J.Dumarchez and J.Tran Thanh Van. 2014. P.381-382

- [B2]. *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A., Lyskova N.S.* Gravitational lens system B0218+357: constraints on lens model and Hubble constant // In Proceedings of the 48th Rencontres de Moriond (Very High Energy Phenomena in the Universe), edited by E.Auge, J.Dumarchez and J.Tran Thanh Van. 2013. P.337-338
- [B3]. *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A., Lyskova N.S.* The image jets modeling of gravitationally lensed sources // in Proceedings IAU Symposium No. 275, 2010 “Jets at all Scales”, edited by G.E.Romero, R.A.Sunyaev, T.Belloni. 2011. V.275. P.106-107
- [B4]. *Larchenkova T.I., Lutovinov A.A.* The precise timing of millisecond pulsars as a tool for the search of intermediate mass black holes in globular clusters // in Proceedings of XXIst Rencontres de Blois “Windows on the Universe”, June 21-26, 2009, edited by L.Celnikier, J.Dumarchez, J.Tran Thanh Van, THE GIOI Publishers. 2010. P.579-582. ISBN: 978-604-77-0148-3.
- [B5]. *Larchenkova T.I., Kopeikin S.M.* The Relativistic Time Delay of the Pulsar Radiation in the Non-Stationary Gravitational Field of the Globular Clusters // Relativistic Astrophysics Legacy and Cosmology - Einstein’s Legacy, ESO Astrophysics Symposia. ISBN 978-3-540-74712-3. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2007. P.92-94
- [B6]. *Larchenkova T.I., Kopeikin S.M.* The possible explanation of low-frequency noise of pulsars in globular clusters // Populations of High Energy Sources in Galaxies Proceedings of the 230th Symposium of the International Astronomical Union, Held in Dublin, Ireland 15-19 August 2005, Edited by E. J. A. Meurs; G. Fabbiano. Cambridge: Cambridge University Press. 2006. P.51-52
- [B7]. *Larchenkova T.I.* The microlensing probability of the pulsars located in globular clusters // Pulsar Astronomy - 2000 and Beyond, ASP Conference Series, Vol. 202; Proceedings of the 177th Colloquium of the IAU held in Bonn, Germany, 30 August - 3 September 1999. (San Francisco: ASP). Edited by M. Kramer, N. Wex, and N. Wielebinski. 2000. P.89
- [B8]. *Larchenkova T.I., Doroshenko O.V.* Possible Manifestation Of The Microlensing Effect In Single Pulsar Timing // Astrophysical applications of gravitational lensing: proceedings of the 173rd Symposium of the International Astronomical Union; held in Melbourne; Australia; 9-14 July; 1995. Edited by C. S. Kochanek and Jacqueline N. Hewitt. International Astronomical Union. Symposium no. 173. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht. 1996. P.239

## Личный вклад автора

Автор внёс определяющий вклад во все результаты диссертации, выносимые на защиту. В подавляющем большинстве опубликованных работ диссертант является первым автором, им предложена постановка задач, проведены теоретические и аналитические расчеты, проведена интерпретация полученных результатов, а также написаны основные тексты статей.

## Апробация работы

Результаты диссертации многократно докладывались и обсуждались на семинарах Астрокосмического центра ФИАН (Москва, Россия), отдела теоретической астрофизики Астрокосмического центра ФИАН (Москва, Россия), Отделения теоретической физики ФИАН (Москва, Россия), Института космических исследований РАН (Москва, Россия), отчетных сессиях АКЦ ФИАН и ПРАО АКЦ ФИАН (Пушино, Россия), заседаниях Ученого совета ФИАН (Москва, Россия), на следующих конференциях и симпозиумах:

Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2017) “Астрономия: познание без границ”, Ялта, Крым, 17-22 сентября 2017; XXXIV Всероссийская конференция “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пушино, Россия, 18-21 апреля 2017; The 593rd WE-Heraeus-Seminar Physics Center Bad Honnef (Germany) “Autonomous spacecraft navigation”, Бадхонеф, Германия, 08-11 июня 2015; Всероссийская конференция “Астрофизика высоких энергий вчера и сегодня”, Москва, Россия, 22-25 декабря 2014, 21-24 декабря 2010, 21-24 декабря 2009, 24-26 декабря 2008, 24-26 декабря 2007; Международная конференция “Science with a 10 m Cooled FIR Space Telescope. Workshop for the Millimetron Space Observatory”, Париж, Франция, 16-18 июня 2014; Международная конференция The 49th Rencontres de Moriond (Cosmology 2014), Ла Туиль, Италия, 22-29 марта 2014; Международная конференция “Физические интерпретации теории относительности”, МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия, 1-4 июля 2013; Международная конференция The 48th Rencontres de Moriond (Very High Energy Phenomena in the Universe), Ла Туиль, Италия, 9-16 марта 2013; The 275th Symposium of the International Astronomical Union “Jets at all Scales”, Буэнос-Айрес, Аргентина, 13-17 сентября 2010; The 38th COSPAR Scientific Assembly, Бремен, Германия, 15-18 июля 2010; XXVII General Assembly of the International Astronomical Union, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 3-14 августа 2009; Международная конференция XXIst



Rencontres de Blois “Windows on the Universe”, Блуа, Франция, 21-26 июня 2009; Second International Workshop ISSI “Observations and physics of accreting neutron stars”, Берн, Швейцария, 3-8 марта 2008; Международная конференция “Physics of Neutron Stars - 2008”, Санкт-Петербург, Россия, 24-27 июня 2008; First International Workshop ISSI “Observations and physics of accreting neutron stars”, Берн, Швейцария, 3-7 декабря 2007; Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007, Казань, Россия, 17-22 сентября 2007; Международная конференция “Structure formation of the Universe”, Шамони, Франция, 27 мая - 1 июня 2007; The 26th meeting of the International Astronomical Union “Neutron Stars and Black Holes in Star Clusters”, Прага, Чехия, 17-18 августа 2006; The 230th Symposium of the International Astronomical Union “Populations of High Energy Sources in Galaxies”, Дублин, Ирландия, 15-19 августа 2005.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, десяти глав, объединенных в четыре части и заключения. Диссертация имеет объем 210 страниц, содержит 47 иллюстраций, 11 таблиц. Список литературы включает 365 наименований.

## Содержание диссертации

Во *введении* приведено общее описание работы, обоснована актуальность и цель исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Особое место уделено описанию результатов, выносимых на защиту, а также их новизне, практической значимости, достоверности и апробации.

*Первая часть* диссертации состоит из двух глав и посвящена исследованию влияния случайных неоднородностей гравитационного поля Галактики на видимое положение внегалактических источников на небесной сфере и возможности обнаружения этого эффекта.

В *первой главе* рассмотрено влияние локальных неоднородностей гравитационного поля Галактики, обусловленных движением как видимых звезд Галактики, так и других невидимых компактных объектов, включая многочисленную популяцию коричневых карликов, на точность астрометрических измерений внегалактических источников. Показано, что такие неоднородности приводят к возникновению эффекта ‘дрожания’ координат внегалактических источников. Для описания отклонения светового луча в гравитационном поле случайно движущихся массив-

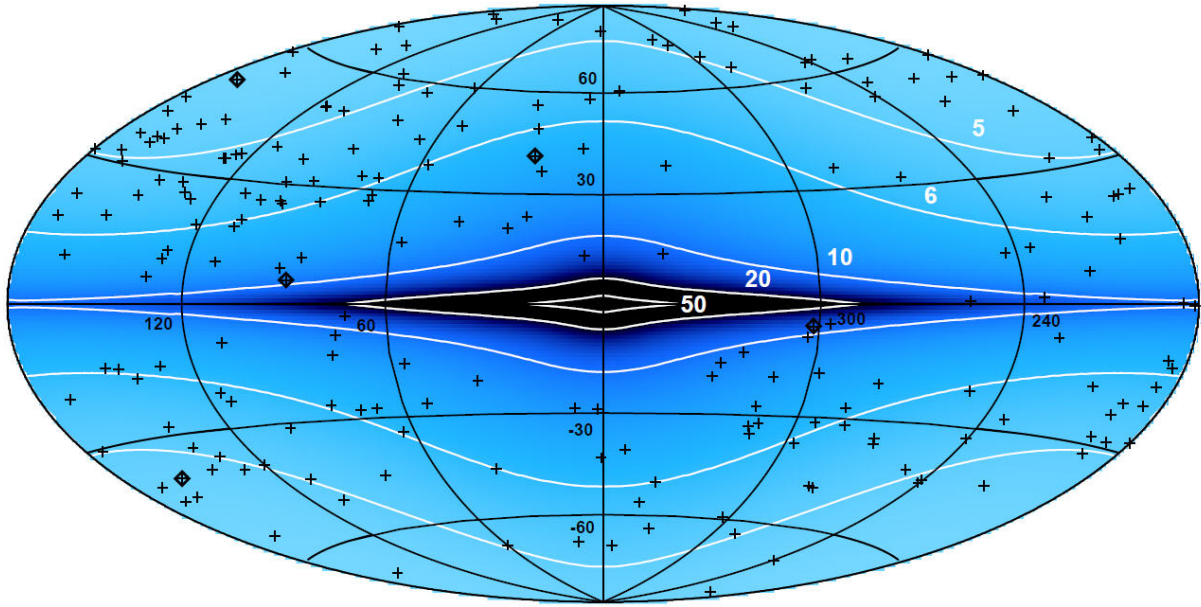


Рис. 1: Карта среднеквадратичного отклонения угла между измеренными и истинными положениями источников на небесной сфере для модели Галактики Денена–Бинни. Белыми линиями показаны контуры среднеквадратичного отклонения  $\sqrt{\langle \alpha^2 \rangle}$  (в мкс дуги). Положения опорных источников ICRF помечены крестиками. Результат диссертанта из работы [A4].

ных объектов в зависимости от положения источника (координат) на небесной сфере были использованы основные статистические характеристики случайного процесса, такие как моменты первого порядка, автокорреляционная функция и спектральная плотность мощности.

Построены двумерные карты распределения среднего квадратичного отклонения угла смещения положения далеких источников, включая реперные (опорные) источники международной небесной системы отсчета (ICRF), относительно их истинного положения. Для разных моделей распределения плотности вещества в Галактике показано, что в направлении на Галактический Центр среднеквадратичное отклонение может достигать нескольких десятков микросекунд дуги, уменьшаясь до 4-6 микросекунд дуги на высоких галактических широтах (см. рисунок 1).

С помощью вычисленной автокорреляционной функции, которая позволяет прогнозировать ожидаемое значение дрожания (условное среднеквадратичное отклонение) для любого временного интервала, показано, что на масштабе десяти лет величина дрожания может достигать нескольких десятков мкс дуги в направлении на центральную область Галактики, уменьшаясь до нескольких мкс дуги на высоких галактических широтах. (см. рисунок 2).

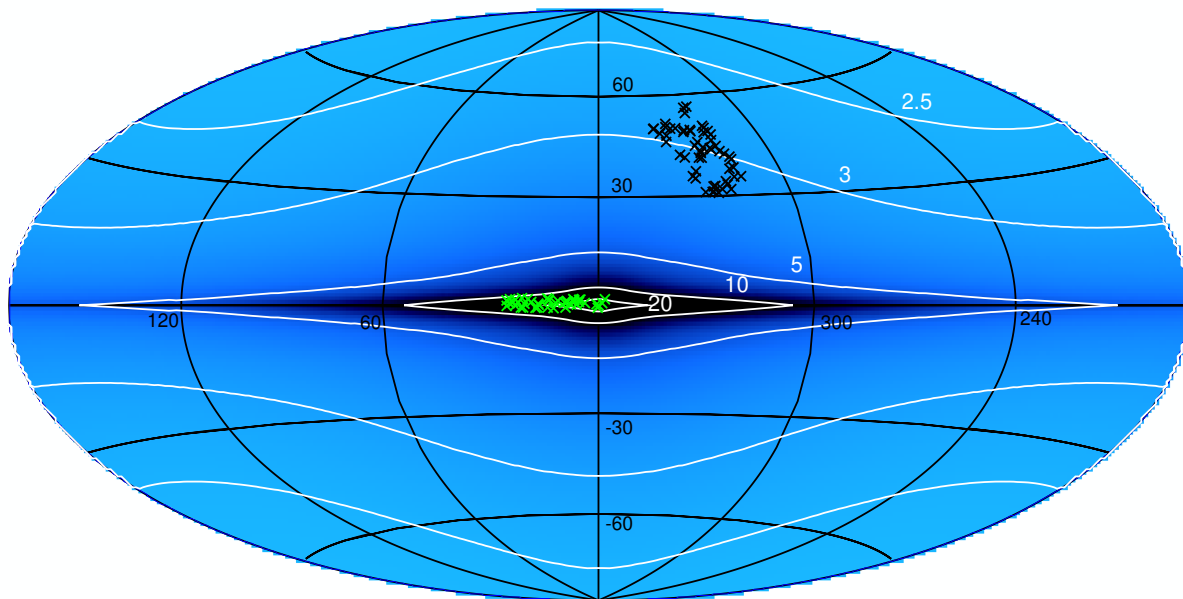


Рис. 2: Карта условного среднеквадратичного отклонения углового блуждания (в мкс дуги) для интервала наблюдений 10 лет. Белыми линиями показаны контуры для блуждания  $\alpha = 20, 10, 5$  and  $3$  мкс дуги. Положения источников целевой и контрольной выборок показаны зелеными (в центральной области) и черными крестами, соответственно. Результат диссертанта из работы [A1].

Во *второй главе* предложена методика проведения эксперимента по регистрации эффекта ‘дрожания’ координат внегалактических источников, вызываемого неоднородностями гравитационного поля Галактики, основанная на наблюдении двух выборок внегалактических источников, – целевой и контрольной. Проведено моделирование эксперимента и на основании его результатов разработана стратегия проведения наблюдений, позволяющая минимизировать другие возможные эффекты, влияющие на наблюдаемое положение источников. Предложено проводить долговременные измерения углового расстояния между тесными парами внегалактических источников в “целевой” и “контрольной” выборках с помощью высокоточных радиоинтерферометрических наблюдений. Источники целевой группы расположены в направлении на центральную область Галактики, где ожидаемая величина эффекта максимальна, в то время как источники контрольной группы расположены на высоких галактических широтах, где ожидаемая величина эффекта минимальна (см. рисунок 2). Минимизировать другие возможные эффекты, которые также способны оказывать влияние на точность измерения углового расстояния в парах источников, возможно при выполнении следующих условий:

1) источники должны быть выбраны с учетом того, чтобы угловое расстояние между ними в парах было в пределах  $1-2^\circ$ , 2) наблюдения следует проводить на высоких частотах (22 ГГц и выше) и 3) по крайней мере на двух частотах одновременно. В результате моделирования эксперимента показано, что современные интерферометры могут обнаружить этот эффект на масштабе нескольких лет.

**Вторая часть** диссертации включает в себя четыре главы, посвященные изучению влияния локальных неоднородностей гравитационного поля Галактики и шаровых звездных скоплений на хронометрирование пульсаров.

В **третьей главе** рассмотрен стохастический эффект Шапиро, обусловленный случайными пролетами звезд вблизи луча зрения на пульсары, расположенные в шаровых звездных скоплениях. Известно, что в результате длительного хронометрирования миллисекундных пульсаров остаточные отклонения моментов прихода импульсов (МПИ) некоторых из них показывают наличие низкочастотного некоррелированного (инфракрасного) шума, предположительно имеющего астрофизическое происхождение. Современные методы хронометрирования пульсаров позволяют достаточно уверенно измерять статистические характеристики таких шумов путем спектрального разложения функции остаточных отклонений моментов прихода импульсов по ортогональным фурье-гармоникам. Пульсары, находящиеся в шаровых звездных скоплениях, в большинстве случаев показывают наличие низкочастотной модуляции фазы и частоты их собственного вращения. Релятивистское запаздывание времени распространения сигнала пульсара в искривленном пространстве-времени случайно распределенных и движущихся звезд шарового скопления (стохастический эффект Шапиро) предлагается в качестве одной из возможных причин такой модуляции. Получена формула стохастического эффекта Шапиро для пульсара, находящегося в шаровом скоплении, с учетом малости абберационных поправок, возникающих из-за нестационарности гравитационного поля рассматриваемого случайно распределенного ансамбля звезд. Полученная формула используется для вычисления автокорреляционной функции низкочастотного пульсарного шума, наклона его спектра мощности и поведения  $\sigma_z$ -статистики, характеризующей спектральные свойства данного шума в виде функции времени. Показано, что влияние стохастического эффекта Шапиро проявляется, главным образом, как низкочастотный шум частоты вращения пульсара со спектральным индексом  $n \simeq -1.8$ , весьма слабо зависящий от конкретной модели распределения звезд в шаровом скоплении, а в случае малых значений прицельного параметра – фликкер-шум со спектральным индексом  $n \simeq -1.5$ .

В **четвертой главе** для пульсаров, расположенных в шаровых звездных скопле-

Таблица 1: Частота регистрации событий в год релятивистского временного запаздывания МПИ для пульсаров в шаровых скоплениях М15, 47 Tucanae и Terzan 5 для случая линзирования на объектах Галактики (суммарная величина для всех компонент) и на объектах самого скопления, а также число всех ожидаемых событий за время наблюдений 5 лет. Результат диссертанта из работы [A8].

	Галактика	Скопление	Число событий $N_5$
М15	$1.15 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-3}$	0.18
47 Tuc	$5.44 \times 10^{-4}$	$7.6 \times 10^{-4}$	0.14
Ter 5	$1.05 \times 10^{-2}$	$4.8 \times 10^{-3}$	2.45

ниях, предложено использовать наблюдения релятивистской временной задержки их излучения в гравитационном поле массивного тела (эффект Шапиро), расположенного близко к лучу зрения, для обнаружения невидимых компактных объектов и их идентификации, а также для изучения распределения как видимого, так и невидимого вещества в шаровых скоплениях и разных компонентах Галактики. Получены зависимости вероятности событий от галактической широты и долготы источников для двух моделей распределения вещества в Галактике. На примере трех шаровых скоплений (М15, 47 Tucanae, Terzan 5) показано, что отношения вероятности событий, обусловленных близкими к лучу зрения пролетами массивных объектов Галактики, к безразмерному прицельному параметру для пульсаров в шаровых скоплениях 47 Tucanae и М15 сравнимы со значениями данной величины при близких пролетах массивных объектов самих скоплений, и значительно выше в случае скопления Terzan 5. Получены оценки частоты таких событий, а также ожидаемое число событий на масштабе пяти лет наблюдений (см. таблицу 1). При этом впервые учтена популяция коричневых карликов в диске Галактики, концентрация которых сравнима с концентрацией звезд диска.

В *пятой главе* рассмотрена возможность регистрации черных дыр промежуточных масс ( $10^3 - 10^4$ )  $M_\odot$ , существование которых в центрах некоторых шаровых скоплений предполагается из оптических и инфракрасных наблюдений, используя хронометрирование времен прихода импульсов известных на сегодняшний день миллисекундных пульсаров в шаровых скоплениях. Для некоторых из них, расположенных наиболее близко к центрам скоплений, рассчитаны ожидаемые времена запаздывания импульсов излучения при их прохождении в гравитационном поле центральной черной дыры. Показано, что если масса центральной черной дыры порядка  $10^4 M_\odot$ , максимальное значение временного запаздывания для наиболее близко расположенных к центрам скоплений пульсаров может достигать 0.4-0.7

мкс, что в принципе достижимо при современной точности измерений, но требует значительной длительности наблюдений.

Всесте с тем важно отметить, что использование методов точного хронометрирования миллисекундных пульсаров уже сейчас, и в недалеком будущем (с улучшением точности и чувствительности измерительной аппаратуры, обнаружением пульсаров, расположенных на угловых расстояниях долей секунды от центров шаровых скоплений, обнаружением галактических пульсаров, находящихся позади скоплений, корректном анализе низкочастотного шума и т.д.) может оказаться одним из немногочисленных способов непосредственной регистрации черных дыр промежуточных масс в центрах шаровых скоплений.

В заключительной *шестой главе* второй части проведен анализ долговременно-го хронометрирования пульсара B0525+21, на основании которого впервые обнаружена долгопериодическая модуляция остаточных уклонений МПИ, возможно связанная с пролетом вблизи луча зрения массивного тела. Получены оценки массы этого объекта и характерного расстояния его наибольшего сближения с лучом зрения.

*Третья часть* диссертации состоит из одной главы и посвящена исследованию влияния крупномасштабных неоднородностей на спектральные характеристики квазаров. В *седьмой главе* предложен оригинальный метод анализа спектров поглощения квазаров и далеких галактик, с помощью которого возможно связать наблюдаемые характеристики спектров с физическими параметрами поглощающих объектов (облаков), такими как, масса, размер и средняя плотность. В результате анализа трех каталогов, включающих каталог систем линий поглощения металлов, каталог систем линий поглощения Лайман-альфа в диапазоне красных смещений  $3 \geq z \geq 2$  и каталог систем линий поглощения Лайман-альфа для красных смещений  $z \leq 0.5$ , получено указание, что регистрируемые системы линий поглощения относятся к двум типам объектов с разными свойствами (см. таблицу 2). Полученные оценки параметров поглощающих объектов в случае систем линий поглощения металлов согласуются с соответствующими оценками параметров галактик. В случае леса линий поглощения  $Ly_{\alpha}$  параметры поглощающих объектов значительно отличаются от галактических, но при этом близки к параметрам большого числа гало, представленных в численных моделях. Полученные результаты показывают, что гало в каталогах численных моделей, которые можно отождествить с поглощающими объектами в линиях леса  $Ly_{\alpha}$ , вероятно составляют значительную долю популяции невидимых и плохо видимых объектов, определяющих существенную часть плотности Вселенной.

Таблица 2: Среднее значение следующих вириальных параметров поглощающих облаков: массы  $\langle M_{vir}^*/M_{\odot} \rangle$  в единицах массы Солнца, размера  $\langle R_{vir}^* \rangle$  в кпк и безразмерной поверхностной плотности  $\langle \Sigma_{vir}^* \rangle$  для трех проанализированных каталогов систем линий поглощения из работы [A2]. Здесь  $N_{sys}$  – количество проанализированных систем линий поглощения и  $\langle z \rangle$  – среднее значение красного смещения линий поглощения в каталоге.

	Линии металлов	$Ly_{\alpha}, z \sim 3$	$Ly_{\alpha}, z < 1$
$N_{sys}$	160	780	1222
$\langle z \rangle$	3	3	0.3
$\langle M_{vir}^*/M_{\odot} \rangle$	$\sim 10^{12}$	$\sim 3 \times 10^8$	$\sim 4 \times 10^8$
$\langle R_{vir}^* \rangle_{\text{кпк}}$	$120(1 \pm 0.4)$	$15(1 \pm 0.5)$	$23(1 \pm 0.7)$
$\langle \Sigma_{vir}^* \rangle$	$18(1 \pm 0.8)$	$1 \pm 0.2$	$1 \pm 0.5$

Наряду с методами гравитационного линзирования предложенный метод анализа спектров поглощения квазаров представляется перспективным для обнаружения гало темной материи, содержащих слабоизлучающую барионную материю, а также для изучения их физических свойств.

**Четвертая часть** диссертации включает в себя три главы и посвящена рассмотрению влияния сильного гравитационного линзирования на наблюдаемые характеристики активных ядер галактик с крупномасштабными струями и использованию этого эффекта для уточнения постоянной Хаббла и других параметров космологических моделей.

В **восьмой главе** построены модельные изображения релятивистских струй внегалактических источников, возникающие в результате гравитационного линзирования на галактиках с разным распределением поверхностной плотности вещества. В частности, рассмотрены следующие модели распределения вещества гравитационной линзы: модель сингулярного изотермического эллипсоида, изотермического эллипсоида с ядром, двух- и трехкомпонентные модели, учитывающие галактический диск, гало и балдж. Проведено сопоставление полученных в результате моделирования изображений как между собой, так и с результатами наблюдений.

Проведено моделирование наблюдаемых структур для одной из наиболее хорошо изученных и перспективных для независимого определения постоянной Хаббла гравитационно-линзированных систем B0218+357, имеющей два изображения компактного ядра и крупномасштабный протяженный струйный выброс. В результате показано, что наблюдаемые в радиодиапазоне кольцевые структуры воз-

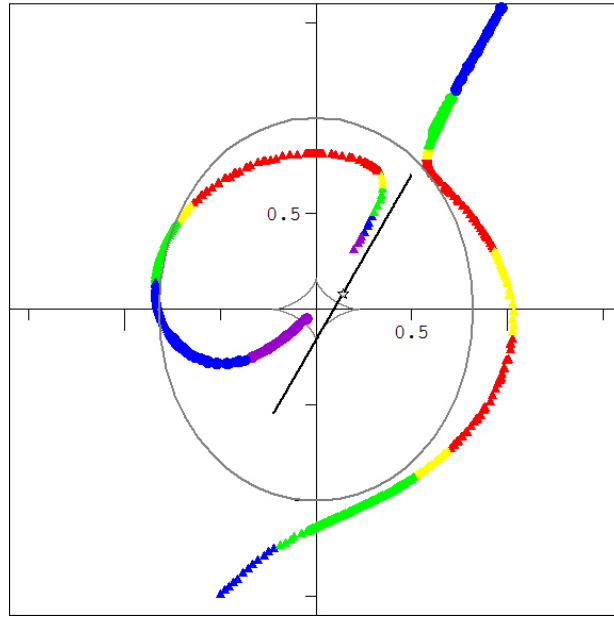


Рис. 3: Результат моделирования релятивистской струи и «контрвыброса» в рамках одной из рассмотренных моделей. Начальная точка струи, обозначенная звездочкой, расположена вне астроида и имеет координаты в плоскости линзы  $(0.14, 0.08)$ . Серым цветом показаны критические и каустические кривые; протяженная струя обозначена черной линией; изображения струи показаны кружками, изображения «контрвыброса» треугольниками, цвет которых зависит от коэффициента усиления. Хорошо видна кольцевая структура возникающего изображения струи. Результат диссертанта из работы [А6].

никают вследствие гравитационного линзирования струйного выброса спиральной галактикой, расположенной на луче зрения (см. рисунок 3).

В *девятой главе* рассмотрена возможность использования линзированных релятивистских струй на сверхмалых угловых масштабах для построения корректных моделей спиральных галактик-линз и независимого определения постоянной Хаббла. На примере системы B0218+357 показано, что существует большой выбор параметров моделей этой гравитационно-линзированной ситемы, адекватно воспроизводящих ее наблюдаемые крупномасштабные свойства (см. рисунок 4), но приводящие к существенному разбросу значений постоянной Хаббла. В качестве дополнительного параметра, позволяющего ограничить круг рассматриваемых моделей, предложено использовать позиционный угол изображений струи на сверхмалых угловых масштабах. Проанализированы возможности наблюдений геометрических свойств линзированных релятивистских струй и измерений скорости сверхсветовых движений изображений сгустков на временных масштабах нескольких месяцев с помощью космических интерферометров со сверхдлинными



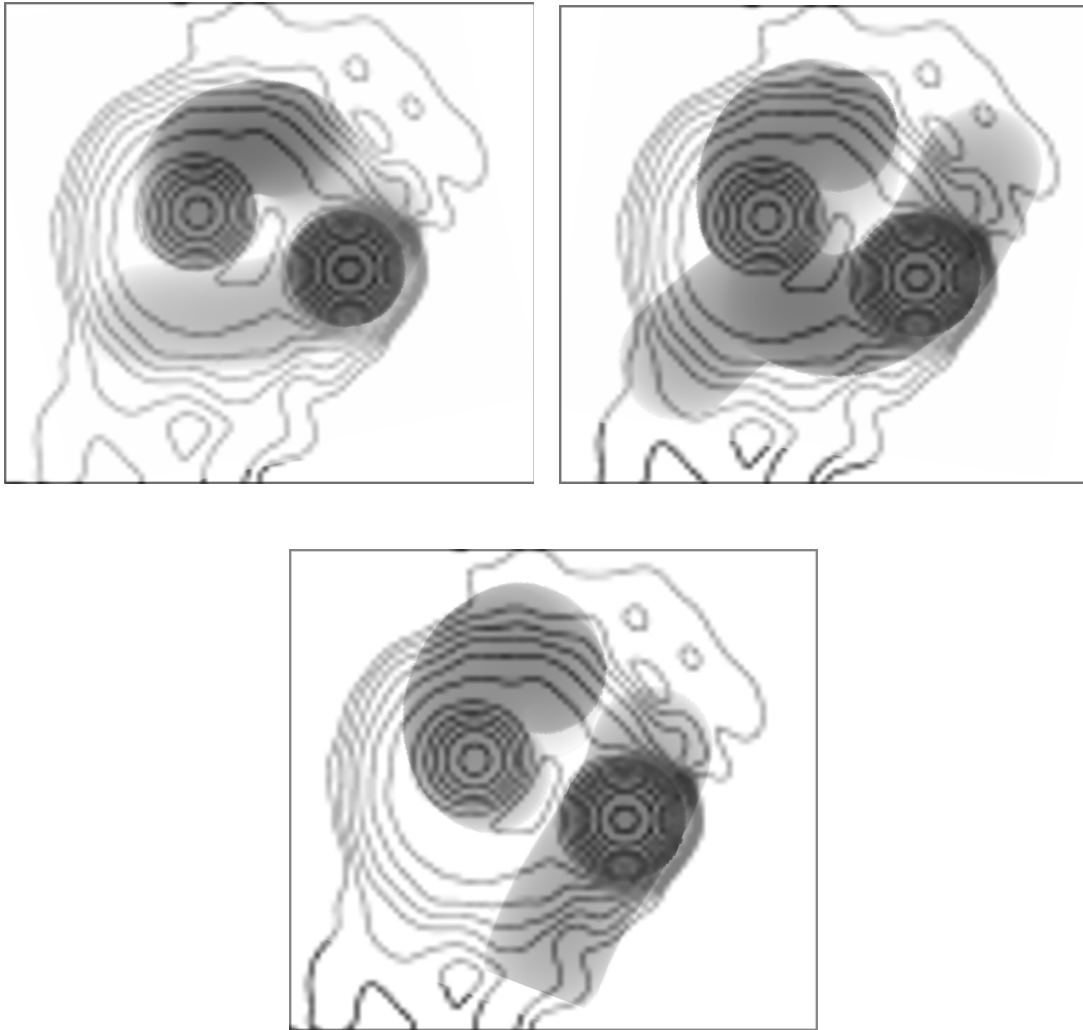


Рис. 4: Сравнение результатов моделирования релятивистской струи в источнике B0218+357 (показаны в градациях серого) с результатами наблюдений VLA на частоте 15 ГГц, взятыми из работы A.D.Biggs et al. MNRAS, v.304, p.349 (1999) (показаны контурами) для нескольких наборов параметров. Результат диссертанта из работы [A5].

базами.

В *десятой главе* обсуждаются перспективы наблюдений гравитационно-линзированных внегалактических источников в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах электромагнитного спектра планируемыми космическими обсерваториями с использованием телескопа с активным охлаждением зеркала до криогенных температур. Проведены детальные подсчеты сильно линзированных источников (с коэффициентами усиления большими или равными двум) для разных длин волн в диапазоне от 70 до 2000 мкм. Получены распределения таких

линзированных источников в зависимости от красного смещения и коэффициента усиления, а также распределение линз по массам. Последнее критически важно для оценки количества наблюдаемых активных ядер галактик с множественными изображениями, которые могут быть использованы, в том числе, для независимого определения постоянной Хаббла. Показано, что в результате реализации программы наблюдений событий сильного гравитационного линзирования в рамках научной программы космической обсерватории «Миллиметрон» могут быть обнаружены порядка 1000 гравитационно-линзированных систем при обзоре на небе площадки площадью всего один квадратный градус, что более чем на порядок превосходит количество таких объектов, зарегистрированных обсерваторией Herschel за все время ее работы.

Помимо возможности независимого определения постоянной Хаббла, ожидаемое существенное увеличение статистики позволит также изучать происхождение и свойства наиболее далеких галактик с активным звездообразованием и значительным количеством пыли (DSFGs), для которых в настоящее время остаются неизвестными их пространственная плотность и вклад в процесс звездообразования Вселенной на красных смещениях  $>2.5$ . Продемонстрирована возможность обнаружения и изучения самых первых галактик, таких как Лайман-альфа эмиттеры, излучение которых может быть усилено на порядок в случае их гравитационного линзирования как непосредственно массивными скоплениями галактик, так и отдельными галактиками, населяющими эти скопления.

Наблюдения и последующий анализ свойств гравитационно-линзированных систем в далеком инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах электромагнитного спектра позволят получить уникальную информацию о природе далеких источников, излучающих в этом диапазоне, и решить перечисленные выше актуальные космологические и астрофизические задачи.

В *заключении* приводятся положения, выносимые на защиту. Приведен перечень опубликованных работ по теме диссертации.

055(02)2

ИКИ РАН  
117997, Москва, Профсоюзная 84/32

---

Подписано к печати 18.02.2021

---

Заказ

Формат  $70 \times 108^{1/32}$

Тираж 100

1,01 уч.-изд.л.