

0-735571

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи



Бухмастова Юлия Леонидовна

**Гравитационное линзирование объектами кингвского  
типа и ассоциации квазар—галактика**

01.03.02 астрофизика и радиоастрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель— доктор физико—математических наук  
профессор Нагирнер Дмитрий Исидорович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
Комберг Борис Валентинович  
доктор физико математических наук  
Цыган Анатолий Иванович

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории  
РАН

Защита состоится "24" июня 2003 г. в "14" часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504 Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д.28, ауд.2143 (математико механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан " 16 " мая 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Орлов В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность работы*

Искривление лучей света в поле тяжести небесных тел, предсказанное А.Эйнштейном, было экспериментально подтверждено Эддингтоном в 1919 году. Это явление составляет физическую основу гравитационного линзирования. Открыть первую гравитационную линзу удалось лишь в 1979 году, и с тех пор астрономами достигнуты значительные успехи в исследовании гравитационно-линзовых эффектов. Были открыты радиокольца, дуги и дужки, кратные изображения квазаров. За последние 30 лет была широко развита общая теория линзирования. По словам физика теоретика Редже: "Мы находимся в преддверии новой эпохи в астрофизике, когда сведения о далеких галактиках будут получены путем исследования влияния их гравитации на свет, идущий от еще более далеких объектов."

Когда мы рассматриваем конкретную ситуацию с гравитационной линзой, то оказываемся перед широким выбором астрофизических параметров. Задача оказывается настолько сложна, что трудно построить однозначную модель линзы. С ростом точности наблюдений ситуация улучшается, однако, по словам А.Ф.Захарова [11], "ощущается дефицит дополнительных проявлений гравитационно-линзовых эффектов. Поэтому поиск таких эффектов, как в теоретическом, так и в наблюдательном плане весьма актуален." Существование крупномасштабных корреляций квазар галактика является одним из возможных проявлений гравитационно линзовых эффектов.

Проблема физической связи некоторых квазаров с близкими к наблюдателю галактиками обсуждается уже более 30 лет ([1-3], см. также гл.12 в [4]). В одной из работ на эту тему [5] проведен автоматизированный поиск тесных пар квазар—галактика с угловым разделением менее  $10'$ . В этой работе делается вывод о том, что квазары имеют тенденцию располагаться в области гало нормальных галактик намного чаще, чем это ожидается для случайных

проекций, и эта физическая связь требует объяснения.

Интерпретация тесных пар квазар—галактика как результата гравитационного линзирования на звездах гало галактик (микролинзирование) была впервые предложена в работе [6]. Однако в более поздних работах [7, 8, 4] было показано, что гипотеза гравитационного микролинзирования не может объяснить наблюдаемого эффекта вследствие чрезвычайной малости поверхностной плотности слабых квазаров, которые должны быть усилены микролинзами. По мнению Арпа, существует несколько аргументов, которые находятся в сильном противоречии с гипотезой гравитационного микролинзирования:

(1) В парах с близкими галактиками квазары преимущественно располагаются на расстояниях в несколько диаметров самой галактики. Таким образом микролинзы должны заполнять огромное пространство вокруг галактик, и для обеспечения наблюдаемого числа ассоциаций требуется аномально большая масса гало.

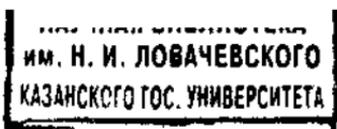
(2) В группах галактик пары квазар галактика чаще встречаются не у главных галактик, а у галактик-компаньонов.

(3) Квазары с наибольшими красными смещениями ассоциируются с галактиками с наименьшими красными смещениями.

(4) Подсчеты слабых квазаров показали, что их количества недостаточно для обеспечения наблюдаемого эффекта. В работах [8, 4] сделан вывод, что функция светимости квазаров имеет более пологий наклон, чем требуется в случае сильного гравитационного линзирования.

(5) Анализ архивных данных по переменности квазаров в парах [9] показал отсутствие переменности на масштабах вплоть до нескольких десятков лет, что противоречит гипотезе микролинзирования.

Однако, как показано в настоящей работе, все эти доводы вообще говоря не противоречат гипотезе гравитационного линзирования. Если принять, что гравитационными линзами являются не звезды, а объекты типа шаровых скоплений, карликовых галактик или кластеризованной скрытой массы, то удастся избежать всех перечисленных выше противоречий. Кроме того, чтобы дать количествен-



ное объяснение тесных пар квазар–галактика в рамках гипотезы гравитационного линзирования, необходимо в качестве источников рассмотреть не квазары, а далекие ядра активных галактик, а также учесть неоднородное распределение линз вдоль луча зрения.

Тесные пары квазар–галактика интересны не только сами по себе. Крупномасштабные корреляции между квазарами и галактиками могут стать своеобразным астрофизическим инструментом для определения параметров гравитационных линз. С их помощью можно оценить параметры скрытого вещества, уточнить постоянную Хаббла, решить проблему повышенной светимости квазаров, создать тесты на космологические модели Вселенной, проверить, как распределены галактики в пространстве. Все это определяет актуальность настоящей работы.

### *Цель работы*

**Целью настоящей диссертационной работы является анализ некоторых существующих ныне каталогов квазаров и галактик, выявление новых тесных пар квазар–галактика и объяснение крупномасштабных корреляций между галактиками и квазарами с помощью эффектов гравитационного линзирования объектами, находящимися в гало галактик.**

### *Научная новизна и практическая ценность*

Основные результаты данной работы следующие:

1. Составлен новый каталог тесных пар квазар–галактика, в который вошло 8382 пары. Для его составления использовался каталог квазаров и активных ядер галактик, состоящий из 11358 объектов, а также выборка из каталога галактик LEDA, содержащая 77483 галактики. Поиск пар осуществлялся таким образом, чтобы линейное

расстояние между центром галактики и проекцией квазара в картинную плоскость галактики не превышало 150 кпк. Каталог позволяет исследовать различные крупномасштабные корреляции между квазарами и галактиками.

2. На основе данных двух каталогов тесных пар (далее-ассоциаций) квазар галактика впервые найдена наблюдательная зависимость числа пар от отношения красных смещений галактик и квазаров  $a = Z_d/Z_q$ , показавшая большое число пар с  $a < 0.1$  и  $a > 0.9$ . Это значит, что галактики из ассоциаций предпочитают располагаться вблизи наблюдателя ( $a < 0.1$ ) и вблизи квазара ( $a > 0.9$ ), избегая, или почти избегая, располагаться посередине между наблюдателем и квазаром (т.е. отсутствуют пары с  $a \sim 0.5$ ).

3. На основе компьютерного моделирования показано, что однородное распределение объектов в пространстве не может объяснить большое число пар с  $a < 0.1$  и  $a > 0.9$ .

4. Предложен новый метод исследования пространственного распределения объектов - метод выделенных цилиндров. Данный метод применен к галактикам каталога LEDA.

5. На основе наблюдаемых данных удалось установить эмпирическую зависимость распределения галактик вдоль отрезков с произвольно закрепленными концами. Новая формула указывает на "двугорбый" характер этого распределения.

6. Показано, что учет фрактального распределения галактик усиливает эффект корреляции квазаров с близкими и далекими к наблюдателю галактиками.

7. Проанализирована модель линзы с кинговским распределением массы. Учтено влияние конической каустики модели прозрачной гравитационной линзы с кинговским распределением масс. Это привело к естественному объяснению корреляции квазаров с близкими галактиками ( $Z_d/Z_q < 0.1$ ) и предсказанию подобной корреляции квазаров с галактиками, близкими к источнику ( $Z_d/Z_q > 0.9$ ).

8. Рассчитана вероятность гравитационного линзирования с учетом статистики квазаров и активных ядер галактик. Результат позволяет предположить, что возможно  $\sim 10^5$  квазаров являются линзированными объектами, в среднем усиленными на  $3^m$ .

9. Исследовано возможное влияние гравитационного линзирования на определение функции светимости фоновых источников. Получены новые формулы, которые указывают на возможную связь между наблюдаемыми функциями светимости галактик и квазаров.

10. В процессе исследования параметров шаровых скоплений, являющихся хорошими кандидатами в гравитационные линзы, впервые удалось установить, что распределение шаровых скоплений Млечного Пути по центральной поверхностной плотности подчиняется логарифмически нормальному закону.

11. Предложен для наблюдения список неправильных галактик типов 9,10, в гало которых может находиться повышенное число объектов типа шаровых скоплений.

12. Выделены квазары, вошедшие в пары, доступные наблюдению в радиодиапазоне. Изображения данных квазаров могут оказаться расщепленными на миллисекундном уровне.

В рамках модели гравитационного линзирования активных ядер галактик объектами галактических гало с массами  $10^4 - 10^9 M_{\odot}$  находят естественное объяснение многие наблюдаемые свойства квазаров. В частности, существование ассоциаций квазар—галактика не требует привлечения нестандартной физики.

### *Структура диссертации*

Диссертация состоит из Введения, трех глав, списка цитируемой литературы, содержащего 87 наименований. Общий объем диссертации 119 страниц, в том числе 34 рисунка и 11 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе 1 "Наблюдения крупномасштабных корреляций квазар—галактика"** вводится понятие ассоциации квазар-галактика. Приводится описание основных методик поиска пар квазар галактика, обзор существующих на настоящее время каталогов ассоциаций квазар—галактика, обзор научных мнений относи-

тельно реальности существования подобных пар.

Разрабатывается новый алгоритм поиска тесных пар квазар-галактика на основе 4 критериев:

1) выбираются те квазары и галактики, для которых имеются данные об их пространственных координатах  $\alpha, \delta, z$ , для квазаров известна их видимая звездная величина  $m_Q$ ;

2) каждый квазар в паре должен быть дальше галактики (т.е.  $z_Q > z_G$ );

3) квазары должны проецироваться в гало галактик размером до 150 кпк;

4) галактики должны иметь  $z_G > 4 \cdot 10^{-4}$ , т.е. исключаются слишком близкие объекты.

Используется каталог квазаров и активных ядер галактик, содержащий данные о 11358 объектах, а также выборка из каталога галактик LEDA, содержащая данные о 77483 галактиках.

Организуется компьютерный отбор близких пар квазар-галактика. В пары вошло 1054 галактики и 3164 квазара, что составило 8382 пары квазар—галактика. Анализируются свойства полученных пар.

Показывается, что галактики из ассоциаций предпочитают располагаться либо близко к наблюдателю, либо близко к квазарам, избегая центрального положения на отрезке наблюдатель-квазар.

Обсуждается вопрос, однородно или фрактально распределены галактики в пространстве, и могут ли особенности такого распределения повлиять на взаимное расположение галактик и квазаров в ассоциациях.

Обсуждается понятие фрактальной размерности. Упоминаются существующие методы оценки фрактальной размерности пространственных структур, указывается на ограниченную применимость данных методов.

Предлагается новый метод оценки фрактальной размерности- метод выделенных цилиндров. Указывается на преимущества этого метода.

Создается искусственный однородный каталог точечных объектов, и исследуется распределение объектов в выделенных цилиндрах.

По результатам компьютерной обработки выборки из каталога LEDA определяется аналитическая зависимость числа галактик от их относительного положения на отрезке между двумя фиксированными точками. Определяются параметры полученного распределения.

Определяется минимальный масштаб структуры, исследуется связь параметров метода корреляционной функции и метода выделенных цилиндров.

Говорится о согласии результатов, полученных новым методом, с результатами обработки ряда различных каталогов методом корреляционной функции. Делается вывод, что галактики в пространстве распределены фрактально с фрактальной размерностью, близкой к 2.

**В главе 2 "Теоретическое обоснование появления ассоциаций квазар—галактика"** обсуждаются различные гипотезы относительно существования тесных пар далекий квазар близкая галактика.

Рассматривается гипотеза о гравитационном усилении блеска далеких источников. В качестве источников постулируются активные ядра далеких галактик. В качестве гравитационных линз постулируются компактные объекты, находящиеся в гало галактик, входящих в ассоциации. Линзы имеют массы  $\sim 10^4 - 10^6 M_{\odot}$  (мезолинзы). В качестве усиленных изображений ядер галактик рассматриваются квазары из ассоциаций.

Исследуются параметры прозрачной гравитационной линзы с кинговским распределением масс.

Приводится анализ сводной таблицы основных параметров шаровых скоплений (ШС) Млечного Пути. Показано, что распределение ШС Млечного Пути по центральным поверхностным плотностям подчиняется логарифмически-нормальному закону.

Приводятся параметры карликовых галактик. Показывается, что карликовые галактики гало, рассматриваемые в качестве гравитационных линз, могли бы объяснить преимущественное расположение галактик из ассоциаций близко к наблюдателю или к квазару, если допустить наличие большого количества скрытого вещества в цен-

тральных частях.

Обсуждаются другие кандидаты в гравитационные линзы. Затрагивается проблема скрытого вещества.

Рассматриваются физические принципы гравитационного линзирования.

Рассматривается ход лучей в приближении геометрической оптики.

Рассматриваются физические принципы расщепления и усиления изображений, полученных с использованием гравитационной линзы.

Проводится теоретическое исследование модели линзы с кинговским распределением масс: уравнение луча, коэффициент усиления, расщепление изображения, дополнительное условие сильного усиления источника, поперечное сечение линзы, функция вероятности линзирования.

Делается попытка теоретического обоснования появления большого числа тесных пар квазар галактика, а также превышения числа пар с  $a < 0.1$  и  $a > 0.9$  для двух каталогов ассоциаций. Показывается, что линзирование и фрактальность могут как дополнять друг друга, так и действовать независимо при объяснении зависимости  $N(a)$  для ассоциаций.

Исследуется диаграмма Хаббла для галактик и квазаров. Показывается, что в рамках гипотезы о гравитационном линзировании, смещение квазаров влево от прямой, соответствующей закону "0.2т", может объясняться эффектом усиления блеска при линзировании в среднем на 3 звездные величины. Вычисляется предполагаемая доля линзированных источников.

Предполагается, что известное увеличение числа абсорбционных линий с  $Z_{em} \sim z_{abs}$  при наблюдении квазаров может быть обусловлено фрактальным распределением линз на луче зрения. Предполагается, что должно существовать также повышенное число квазаров с  $Z_{abs}/Z_{em} < 0.1$ .

**В главе 3 "Наблюдательные следствия теории гравитационного линзирования"** исследуется функция светимости фоновых источников.

Делается предположение, что эффект гравитационного усиления

изображения может повлиять на определение кажущейся функции светимости далеких источников. Предлагается метод, позволяющий получить аналитический вид функции распределения источников по видимой яркости с учетом влияния гравитационного линзирования. Функцию светимости источников предлагается рассмотреть в виде шехтеровской функции или в виде двухстепенного закона.

В качестве примера предлагается применить данный метод при анализе функции светимости квазаров.

Приводится функция распределения квазаров по видимой яркости, найденная на основе предположения, что квазары, хотя бы частично, являются гравитационно усиленными изображениями активных ядер далеких галактик. Использован шехтеровский вид функции светимости ядер и двухстепенной закон для функции светимости ядер, а также вероятностный закон усиления изображения для различных моделей гравитационных линз. При нахождении теоретической функции распределения квазаров по видимой яркости использована теорема о плотности вероятности произведения случайных величин.

Показано, что наклон этой функции в случае слабых квазаров колеблется в пределах от  $-1$  до  $-2$ , как у обычных галактик. В случае ярких квазаров наклон функции распределения по видимой яркости определяется в основном эффектом линзирования, и ограничивается снизу значением  $-3$ . Хорошее согласие теории и наблюдений позволяет предположить, что квазары статистически являются гравитационно усиленными изображениями активных ядер далеких галактик. Если верны исходные предположения, то функции светимости галактик и видимой яркости квазаров не являются независимыми, а связаны посредством гравитационного линзирования на объектах гало галактик (типа шаровых скоплений).

Обсуждаются возможные кандидаты в гравитационные линзы при объяснении крупномасштабных корреляций квазар галактика.

Приводятся аргументы в пользу того, что шаровые скопления, находящиеся в гало галактик, являются наилучшими кандидатами в гравитационные линзы.

На основе каталога ассоциаций квазар галактика исследуется,

вокруг галактик каких типов следует искать шаровые скопления-линзы.

Приводится список неправильных галактик типов 9 и 10, входящих в ассоциации, вокруг которых ожидается повышенное число шаровых скоплений (или других кластеризованных объектов скрытой массы). Приводится наблюдательный материал, который подтверждает данные настоящей работы о том, что в гало неправильных галактик содержатся кластеризованные объекты с массами, характерными для шаровых скоплений. Авторы [10] на основе данных, полученных с телескопа им. Хаббла, исследовали неправильную галактику NGC1569. В этой галактике было найдено 47 скоплений, радиусы ядер которых находятся в диапазоне, характерном для ШС. Приводятся данные о еще 7 неправильных галактиках, в которых обнаруживаются компактные звездные скопления. В неправильной галактике NGC4449 выделено 60 компактных звездных скоплений, 49 из которых предположительно являются шаровыми скоплениями. Галактика NGC4214 (PGC039225) является неправильной галактикой с активным звездообразованием. Вокруг нее выделено 29 компактных звездных скоплений, которые по мнению авторов [10], являются молодыми. Аналогично вокруг галактики DDO 50 (PGC023324) найдено 3 скопления, вокруг NGC1705 (PGC016282)- 16 скоплений, DDO 168 (PGC046039)- 3 скопления, DDO 165 (PGC045372) 4 скопления, DDO 75 (PGC029653) и в WLM по одному компактному скоплению. Все эти компактные объекты с радиусами  $r < 15$  пк и с  $M_v$  ярче -10. Большинство звездных скоплений являются молодыми с размерами и массами, характерными для шаровых скоплений. Таким образом, число шаровых скоплений в неправильных галактиках может оказаться значительно выше, чем принято думать.

Приводится список эллиптических и спиральных галактик, входящих в ассоциации, в гало которых к настоящему времени обнаружены как шаровые скопления, так и квазары.

Формулируются наблюдательные тесты модели линзирования активных ядер галактик и делаются основные выводы работы.

*На защиту выносятся:*

1. Новый каталог тесных пар квазар галактика.
2. Установление наблюдательной зависимости числа пар квазар галактик от положения галактики между наблюдателем и квазаром  $N(a)$ . Теоретическое обоснование этой зависимости на основе гипотезы о фрактальном распределении галактик в пространстве и на основе гипотезы о гравитационном линзировании активных ядер галактик объектами с кинговским распределением масс, находящимися в гало близких галактик.
3. Новый метод оценки фрактальной размерности пространственных структур и его применение к галактикам каталога LEDA.
4. Теоретическое обоснование возможной связи между функцией светимости галактик и функцией поверхностной яркости квазаров.
5. Вывод о логарифмически-нормальном распределении шаровых скоплений Млечного Пути по центральной поверхностной плотности.
6. Вывод о существовании большого числа кластеризованных объектов типа шаровых скоплений в гало иррегулярных галактик.

**По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых журналах.**

1. Ю.В.Барышев, Ю.Л.Езова (Бухмастова), "Гравитационное мезолинзирование объектами кинговского типа и ассоциации квазар-галактика" // *Астрономический журнал*, 1997, том 74, № 4, с.497-508.

2. Ю.Л.Бухмастова, "Свойства ассоциаций квазар-галактика и гравитационное мезолинзирование объектами гало"// *Астрономический журнал*, 2001, том 78, №8, с.675-685.

3. Ю.Л.Бухмастова, "Влияние гравитационного линзирования на определение функции светимости фоновых объектов"// Астрофизика, 2002, том 45, выпуск 2, с.231-239.

4. Ю.Л.Бухмастова, "Шаровые скопления как кандидаты в гравитационные линзы для объяснения ассоциаций квазар—галактика" Письма в Астрономический журнал, 2003, том 29, №4, с.253-263.

### *Личный вклад автора*

Начальная постановка задачи о гравитационном мезолинзировании квазаров из ассоциаций квазар—галактика была сделана Ю.В.Барышевым. Автором была проведена дальнейшая разработка этой теории, произведены все расчеты и получены все представленные в диссертации результаты. Обсуждение основных идей и полученных автором результатов проводилось совместно с Ю.В.Барышевым. Обсуждение уравнения, показывающего возможную связь между функцией светимости галактик и функцией поверхностной яркости квазаров, велось совместно с Д.И.Нагирнером. Моделирование однородного распределения галактик в пространстве велось при участии П.А.Тараканова.

### *Апробация работы*

Основные результаты, полученные в диссертации, представлены в тезисах конференций:

1. 9 Российская гравитационная конференция "Теоретические и экспериментальные проблемы гравитации" (Новгород, 24-30 июня 1996 г., тезисы)

- "Роль гравитационного линзирования в феномене квазаров".

2. Всероссийская Астрономическая Конференция (Санкт-Петербург, 6-12 августа 2001 г.)

"Шаровые скопления как наилучшие кандидаты в гравитационные линзы для объяснения ассоциаций квазар—галактика". (Устный доклад.)

- "Функция светимости квазаров в рамках теории гравитационного линзирования". (Тезисы.)

- "Метод определения фрактальной размерности пространственных структур". (Постерный доклад.)

3. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пушино, Россия, 23-26 апреля 2001 г., устный доклад.)

4. "Седьмая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов" (Санкт-Петербург, Россия, 2002 г., тезисы.)

5. "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пушино, Россия, 22-25 апреля 2003 г.)

- "Пространственное распределение галактик базы данных LEDA". (Устный доклад.)

Были сделаны доклады на семинаре кафедры астрофизики СПбГУ, физико-техническом институте им.А.Ф.Иоффе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arp И.// *Astrophys.J.*, 1966, v.148, p.321.
2. Arp Н.// "Quasars, Redshift and Controversies", Interstdlar Media, Berkeley, Ca., 1987.
3. Arp Н.// *Astron. Astrophys.*, 1990, v.229, p.93.
4. Schneider P., Ehlers J., Falco E.E.// "Gravitational Lenses", Springer-Verlag, N.Y., 1992.
5. Burbidge G., Hewitt A., Narlikar J.V., Das Gupta P.// *Astrophys.J. Suppl. Ser.*, 1990, v.74, p.675.
6. Canizares C.R.// *Nature*, 1981, v.291, p.620.
7. Vietri M., Ostriker J.P.// *Astrophys.J.*, 1983, v.267, p.488.
8. binder E.V., Schneider P.// *Astron. Astrophys.*, 1988, v.204, p.L8.
9. Keel W.C.// *Astrophys.J.*, 1982, v.259, p.L1.
10. Hunter D.A., Billet O.H. and Elmegreen B.G.// (2001); (astro-ph/0112260).
11. Захаров А.Ф.// Гравитационные линзы и микролинзы, Москва, "Янус-К", 1997.