

На правах рукописи

ЛЫСКОВА Наталья Сергеевна

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАСС ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ГАЛАКТИК,
ПРИМЕНИМЫЕ ДЛЯ БОЛЬШИХ ОБЗОРОВ**

Специальность: 01.03.02 — Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Handwritten signature of Lytkova in cursive script, followed by a horizontal line.

Москва — 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, ИКИ РАН

ЧУРАЗОВ Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Федеральное государственное бюджетное учреждение Государственный научный центр Российской Федерации Институт теоретической и экспериментальной физики (НИЦ «КИ» ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»), Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), Федеральное государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова (ФГУП ВНИИА им. Н. Л. Духова)

БЛИННИКОВ Сергей Иванович

кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

ВАСИЛЬЕВ Евгений Александрович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

Защита диссертации состоится **25 декабря 2015 года в 11 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2015/lyskova.htm>

Автореферат разослан _____ ноября 2015 года

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.113.02



А. Ю. Ткаченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

С начала XX в. определение масс галактик и скоплений галактик — активно развивающаяся и обсуждаемая область астрофизики. Именно интерес к «взвешиванию» галактик и скоплений фактически привёл к открытию тёмной материи. В 1933 г. Фриц Цвикки (*нем.* Fritz Zwicky) применил вириальную теорему к скоплению галактик Сомы и обнаружил, что вириальная масса скопления в ~400 раз превышает значение «видимой» массы, оценённой из полной светимости скопления [Zwicky, 1933]. Вычисления Цвикки наводили на мысль, что существует какая-то форма невидимой, не светящейся материи («тёмной материи»), способной удерживать галактики скопления от «разлетания». Первые наблюдения кривых вращения спиральных галактик [Vabcock, 1939; Mayall, 1951] вопреки ожиданиям показали отсутствие кеплеровского убывания скорости вращения во внешних областях. Однако эти наблюдения практически не имели влияния на научное сообщество, лишь детали анализа (как, например, принятые расстояния до объектов) были поставлены под сомнение. Большинство астрономов в 1950–1960 гг. верили, что дисковые галактики должны иметь кеплеровские скорости на умеренных и больших расстояниях от центра галактики. Благодаря технологическому прогрессу, наблюдения сотен кривых вращения стали доступными приблизительно в 1980-х гг., большинство из которых шли вразрез с предсказаниями кеплеровской динамики. Этот факт сыграл важнейшую роль в осознании научным сообществом существования невидимой (тёмной) материи. Потребовалось почти 50 лет для принятия парадигмы тёмной материи. Согласно простейшей модели, тёмная материя взаимодействует с обычным веществом только посредством гравитационных сил. К сожалению, пока что не удалось надёжно детектировать частицы тёмной материи в земных экспериментах, что сохраняет за галактиками и скоплениями галактик статус основных лабораторий по исследованию свойств тёмной материи.

Определение масс галактик играет также ключевую роль в понимании процессов формирования и эволюции со временем этих объектов. Современная стандартная космологическая модель Λ CDM предсказывает иерархический рост структуры во Вселенной. Первыми

коллапсируют маленькие сгустки повышенной плотности, затем получившиеся «комки» тёмной материи сливаются и образуют большие гало, которые служат «колыбелью» для формирования галактик. Одно из предсказаний модели Λ CDM состоит в том, что структурные параметры галактик коррелируют со свойствами массивного родительского гало тёмной материи, которые, в свою очередь, тесно связаны со значением массы гало (например, [Macciò et al., 2008; Mo et al., 1998], а также ссылки в этих работах).

Масса спиральных галактик может быть измерена практически напрямую из наблюдений. В первом приближении можно считать, что звёзды и газ в диске движутся по круговым орбитам и, измеряя лучевые скорости на разных радиусах и зная угол наклона спиральной галактики, можно восстановить кривую вращения галактики $V_c(r)$ и распределение полной массы $M(< r) = rV_c^2(r)/G$. К сожалению, подобный подход к измерению массы не может быть напрямую применён к эллиптическим галактикам, так как орбиты звёзд последних неизвестны, и существует вырождение между массой галактики и анизотропией распределения орбит звёзд. Последние десятилетия активно разрабатываются подходы для определения массы эллиптических галактик различных уровней сложности и общности. Метод динамического моделирования Шварцшильда, основанный на суперпозиции орбит, считается на сегодняшний день самым точным и передовым для исследования галактик раннего типа. Он позволяет получить детальное распределение массы в зависимости от радиуса, изучить вклад отдельных компонент, таких как тёмное гало, звёзды и сверхмассивная чёрная дыра, в потенциал галактики, а также исследовать структуру орбит звёзд галактики. Среди недостатков данного подхода помимо высокой стоимости вычислений (десятки тысяч часов процессорного времени) следует отметить его чувствительность к качеству наблюдаемых данных — необходимы детальные кинематические профили с высоким отношением сигнала к шуму, позволяющие определить не только радиальные скорости и дисперсии скоростей, но и моменты Гаусса-Эрмита третьего и четвёртого порядков. Кроме того, численные эксперименты показывают, что даже самые лучшие кинематические карты, полученные при помощи современных панорамных спектрографов, не позволяют однозначно ограничить все параметры модели из-за внутренних вырождений (например, [Thomas et al., 2007a; van den Bosch, van de Ven, 2009]).

Крупные обзоры невысокого углового и/или спектрального разрешения становятся основным инструментом для изучения галактик, поскольку они делают возможными статистические исследования свойств всей популяции галактик. Точное определение масс большого коли-

чества галактик (современные обзоры содержат информацию о миллионах объектов) на разных красных смещениях имеет важнейшее значение для понимания процессов их формирования и эволюции со временем. Имея лишь фотометрические и кинематические данные невысокого разрешения, использовать детальное динамическое моделирование не всегда оправданно, а порой и вовсе невозможно. Для подобных задач целесообразно иметь простые и надёжные методы, которые позволяют из минимального набора наблюдательных данных получить несмещённую оценку массы с известным и умеренным разбросом. Для эллиптических галактик самыми базовыми наблюдательными параметрами в оптическом диапазоне являются профили поверхностной яркости $I(R)$ и дисперсии лучевых скоростей $\sigma_p(R)$. К сожалению, этих данных недостаточно для однозначного определения профиля массы галактики из-за вырождения между массой и анизотропией распределения орбит звёзд. Тем не менее, при разумных предположениях оказывается возможным получить надёжную оценку массы галактики, не привлекая дополнительных данных.

Самый простой подход к оценке массы эллиптических галактик основан на теореме о вириале. Для замкнутой стационарной сферической системы в изотермическом гравитационном потенциале круговая скорость связана со средней, взвешенной по светимости дисперсией лучевых скоростей как $V_c^2 = 3\langle\sigma_p^2\rangle$. При этом масса $M(< r) = rV_c^2(r)/G$ строго не зависит от анизотропии орбит звёзд. На практике эллиптические галактики не являются идеально изотермическими и усреднённая по всей галактике дисперсия лучевых скоростей $\langle\sigma_p^2\rangle$ не всегда доступна. Недавно были предложены два простых метода [Churazov et al., 2010; Wolf et al., 2010], которые позволяют обойти вырождение между массой и анизотропией и оценить массу эллиптической галактики из профилей поверхностной яркости и наблюдаемой дисперсии скоростей, но только на определённом радиусе. Причём априорные предположения о функциональной зависимости профиля массы и/или анизотропии не требуются. Существование такого радиуса, на котором оценка массы оказывается практически нечувствительной к неизвестной анизотропии распределения орбит, было отмечено ещё в работах [Richstone, Tremaine, 1984; Gerhard, 1993]. Один из подходов (глобальный [Wolf et al., 2010]) по-прежнему использует среднее значение наблюдаемой дисперсии скоростей $\langle\sigma_p^2\rangle$ для оценки массы галактики на радиусе r_3 , на котором объёмная плотность звёзд $j(r)$ спадает как r^{-3} . Утверждается также, что $r_3 \approx 4/3R_{\text{eff}}$, где R_{eff} — эффективный радиус, т.е. радиус круга, внутри которого сосредоточена половина полной светимости галактики. Таким образом, для применения данного метода

необходимо определить глобальные характеристики системы — $\langle \sigma_p^2 \rangle$ и R_{eff} . Локальный подход, предложенный в работе [Churazov et al., 2010], напротив, использует локальные свойства галактики — логарифмические наклоны профилей поверхностной яркости $I(R)$ и дисперсии лучевых скоростей $\sigma_p(R)$ — для оценки массы на специальном радиусе R_{sweet} , на котором чувствительность метода к анизотропии орбит звёзд минимальна.

Цель работы

В данной работе основной акцент сделан именно на исследовании и тестировании подобных методов оценки массы эллиптических галактик, поставленная цель была разбита на несколько подзадач:

- Тестирование и сравнение простых методов оценки массы на объектах с заранее известным распределением массы.
- Адаптация метода к реальным наблюдениям, в частности, к наблюдениям в длиннощелевом режиме.
- Демонстрация возможных областей применения простых методов на реальных объектах. Сравнение различных независимых методов измерения масс.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

В настоящей работе впервые проведено комплексное изучение простых методов оценки масс эллиптических галактик и исследована область их применения. На большой выборке модельных галактик, полученных в результате численного моделирования космологической эволюции структуры Вселенной, продемонстрирована результативность методов в режимах, имитирующих панорамные и длиннощелевые наблюдения. Попутно разработан алгоритм анализа модельных галактик, позволяющий в автоматическом режиме удалять галактики — спутники с изображения поверхностной яркости. Впервые проведены оценки полной массы, вклада нетепловой компоненты в полное давление газа и доли тёмной материи в NGC 708, NGC 1129, NGC 1550, UGC 3957 и NGC 4125, являющиеся центральными в скоплениях/группах галактик. Обсуждается также перспектива использования локального значения дисперсии лучевых скоростей на радиусе R_2 , на котором наблюдаемый профиль поверхностной яркости спадает как R^{-2} , в качестве индикатора полной массы галактик.

Научная и практическая ценность

Несмотря на то, что рассматриваемые простые методы позволяют оценить массу галактики на одном только специально выбранном радиусе, их простота, «неприхотливость» к наблюдательным данным, несмещённость оценки и известный умеренный разброс позволяют применять данные методы для широкого круга задач. Например,

- 1) для быстрой оценки массы большой выборки эллиптических галактик или скоплений галактик;
- 2) кросскалибровки других методов;
- 3) оценки вклада нетепловой составляющей в полное давление горячего газа эллиптической галактики/скопления при сравнении с рентгеновским профилем массы;
- 4) определения доли тёмной материи при сравнении с оценкой вклада звёздной компоненты в полную массу галактики;
- 5) вычисления наклона профиля полной массы эллиптической галактики при сравнении со значением массы, полученной из гравитационного линзирования;
- 6) оценки полной массы галактики, используя в качестве индикатора полной массы локальное значение дисперсии лучевых скоростей на радиусе R_2 , где профиль поверхностной яркости убывает как R^{-2} .

Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведено тестирование локального метода оценки масс эллиптических галактик на достаточно большой выборке индивидуальных галактик, полученных в результате численного космологического моделирования, схожих по своим свойствам с наблюдаемыми галактиками раннего типа в близкой Вселенной. Для выборки массивных галактик, из которой исключены быстро вращающиеся объекты, наблюдаемые вдоль оси вращения, среднее отклонение от истинной круговой скорости составляет $\Delta \approx 0\%$, а среднеквадратичный разброс $RMS \approx 5,4\%$. Простота данного подхода, несмещённость оценки круговой скорости и умеренный среднеквадратичный разброс делает его подходящим для анализа больших выборок галактик как на маленьких, так и на больших красных смещениях.
2. Область применения обсуждаемого простого метода оценки массы не ограничивается эллиптическими галактиками. Он также может быть применён к скоплениям галактик. Согласно тестам на

модельных скоплениях галактик, средняя оценка круговой скорости оказывается практически несмещённой, а среднеквадратичный разброс остаётся умеренным. В частности, для богатых скоплений, содержащих более 100 галактик — членов скопления с измеренными лучевыми скоростями, $RMS = 6,4 \%$.

3. Применение простого подхода к оценке массы проиллюстрировано на примере выборки из пяти массивных эллиптических галактик, ярких в рентгеновском диапазоне, оптические профили для которых получены при помощи шестиметрового телескопа БТА САО РАН (Большой телескоп азимутальный Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук). Проведено сравнение оптической оценки массы с рентгеновской и массой звёздного компонента. Получены ограничения на вклад нетепловой составляющей в полное давление горячего газа галактик, конфигурацию звёздных орбит, долю тёмной материи.
4. Проведено сравнение локального и глобального подходов к оценке массы эллиптических галактик на аналитических моделях, выборке модельных галактик, полученных в результате численного моделирования космологической эволюции структуры Вселенной, а также на выборке галактик раннего типа, которые уже были проанализированы передовыми методами.
5. Предложен новый индикатор полной массы эллиптической галактики. Согласно тестам на модельных изолированных галактиках локальное значение дисперсии лучевых скоростей $\sigma_p(R)$ на радиусе R_2 , где наблюдаемый профиль поверхностной яркости убывает как R^{-2} , может быть использовано в качестве индикатора полной массы галактики.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на семинарах ИКИ РАН (Москва, Россия), семинаре института Макса Планка по Астрофизике (Гархинг/Мюнхен, Германия), а также на следующих конференциях:

- Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», декабрь 2011 г., Москва (Россия).
- XMM-Newton Workshop “Galaxy Clusters as Giant Cosmic Laboratories”, май 2012 г., Мадрид (Испания).
- Международная конференция “X-ray Sky: from Stars and Black Holes to Cosmology”, сентябрь 2012 г., Казань (Россия).
- Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», декабрь 2012 г., Москва (Россия).

- Международная конференция “The Mass Profile of Galaxy Clusters from the Core to the Outskirts: the Need for a Multi-Wavelength Approach”, март 2013 г., Мадонна-ди-Кампильо (Италия).
- Международная конференция “Physical link between galaxies and their halos”, июнь 2013 г., Гархинг/Мюнхен (Германия).
- Конференция “3D2014: Gas and Stars in Galaxies: A Multi-Wavelength 3D Perspective”, март 2014 г., Гархинг/Мюнхен (Германия).
- XI Конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные космические исследования”, апрель 2014 г., Москва (Россия).
- Международная конференция “Zeldovich 100: Cosmology and Relativistic Astrophysics”, июнь 2014 г., Москва (Россия).
- IAU Symposium 311 “Galaxy Masses as Constraints of Formation Models”, июль 2014 г., Оксфорд (Великобритания).

Объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объём диссертации 135 страниц, диссертация содержит 49 рисунков и 11 таблиц. Список литературы состоит из 109 публикаций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* описываются проблемы, на решение которых направлена диссертационная работа, обосновывается её актуальность и ставятся цели работы.

В *первой главе* обсуждаются основные методы определения масс эллиптических галактик, их достоинства и недостатки. Рассматриваются, в том числе, простые подходы, основанные на вириальной теореме и/или на сферическом уравнении Джинса, которые могут оказаться полезными для анализа больших выборок галактик. Особое внимание уделено локальному и глобальному методам, позволяющим восстановить массу на специальном радиусе, на котором оценка оказывается практически не чувствительной к анизотропии скоростей звёзд (или других пробных частиц), и предположениям, в рамках которых эти методы получены. Подобные методы могут оказаться полезными для определения масс больших выборок галактик с данными невысокого разрешения/качества, когда детальное исследование не практично или не применимо.

Вторая глава посвящена тестированию локального метода оценки масс на достаточно большой выборке модельных эллиптических галактик, полученных в результате численного моделирования космологической эволюции Вселенной. Описана выборка модельных галактик, а также алгоритм её анализа. Продемонстрирована важность учёта спутников на изображении поверхностной яркости (распределения звёзд, спроектированного на плоскость). Описан алгоритм анализа модельных галактик, позволяющий в автоматическом режиме удалять галактики-спутники с изображения поверхностной яркости. Показано, что наиболее массивные модельные галактики, для которых значение дисперсии лучевых скоростей $\sigma_p(R_{eff})$ на эффективном радиусе превышает 200 км/с, имеют практически плоскую кривую вращения в широком радиальном диапазоне (среднеквадратичное отклонение RMS круговой скорости от постоянного значения в диапазоне $0,5R_{eff} < r < 3R_{eff}$ составляет $\sim 5\%$). Для таких галактик данный метод позволяет получить несмещённую оценку круговой скорости (или массы $M(<r) = rV_c^2/G$) с точностью $RMS \approx 5...8\%$ вплоть до $R \approx 5R_{eff}$.

Для выборки достаточно массивных ($\sigma_p(R_{eff}) > 150$ км/с) модельных галактик на красном смещении $z = 0$, из которой исключены сливающиеся, а также быстро вращающиеся объекты, наблюдаемые вдоль оси вращения, локальный подход позволяет восстановить несмещённое значение круговой скорости. Усреднённое по выборке отклонение от истинной круговой скорости составляет менее 1%, а среднеквадратичный разброс $RMS = 5,4\%$. Локальный подход не следует применять к сливающимся галактикам, так как круговая скорость может быть значительно переоценена, а также к вращающимся галактикам, наблюдаемым вдоль оси вращения, в этом случае круговая скорость может оказаться значительно недооценённой.

Локальный подход к оценке массы может быть применён также к галактикам на больших красных смещениях. Оценка круговой скорости, усреднённая по подвыборке массивных и медленно (или совсем не) вращающихся галактик (сливающиеся объекты исключены), на красном смещении $z = 1$ составляет $\bar{\Delta} \approx (-0,3 \pm 1,1)\%$ с $RMS = 6,0\%$; на $z = 2$ среднее отклонение $\bar{\Delta} \approx (0,9 \pm 2,2)\%$, а разброс $RMS = 8,0\%$. Таким образом, оценки круговой скорости оказываются также практически несмещёнными и с разумным разбросом 6...8%, как и для галактик на $z = 0$.

Показано, что специальный радиус R_{sweet} , на котором оценка круговой скорости подвержена минимальному влиянию анизотропии распределения орбит звёзд, сравним с радиусом R_2 , на котором профиль поверхностной яркости спадает примерно как $I(R) \propto R^{-2}$. В свою оче-

редь, R_2 достаточно близок (в пределах фактора 2) к эффективному радиусу галактики R_{eff} . Используя тот же набор модельных галактик, была протестирована точность рентгеновской оценки круговой скорости, полученной из уравнения гидростатического равновесия горячего газа в массивных галактиках. Было обнаружено смещение в сторону отрицательных значений на уровне 3...4 % и разброс ~ 5 %. Наличие смещения обусловлено остаточными движениями газа.

Также на выборке модельных скоплений галактик было продемонстрировано, что область применения обсуждаемого метода не ограничивается эллиптическими галактиками, он также может быть применён к скоплениям галактик. В случае скоплений оказывается целесообразным использовать упрощённую версию анализа, т.е. пренебречь логарифмическим наклоном профиля наблюдаемой дисперсии скоростей, так как количество пробных частиц (роль пробных частиц играют отдельные галактики — члены скопления) значительно меньше, чем для эллиптических галактик. Усреднённая по выборке оценка круговой скорости оказывается практически несмещённой как для богатых, так и для бедных скоплений, а среднеквадратичный разброс остаётся умеренным. В частности, $RMS = 11,3$ % для скоплений, содержащих $N \approx 25...30$ галактик (точнее, для которых доступны 25...30 измерений лучевых скоростей), и разброс уменьшается до 6,4 % для скоплений с $N > 100$.

В *третьей главе* локальный метод оценки массы эллиптических галактик был адаптирован к наблюдениям в режиме длинной щели и применён к реальным объектам. Показано, что значение круговой скорости, полученной на основе $I(R)$ и $\sigma_p(R)$, измеренных вдоль щели, расположенной вдоль фотометрической большой оси галактики, в среднем недооценено на 4...5 %, среднеквадратичный разброс при этом составляет примерно 6 %. Смещение практически исчезает, когда при оценке круговой скорости $\sigma_p(R)$ заменена на

$V_{RMS}(R) = \sqrt{\sigma_p^2(R) + V_{rot}^2(R)}$, где V_{rot} — скорость вращения, измеренная вдоль щели. Разброс при этом остаётся прежним. Если же доступны наблюдения вдоль большой и малой осей галактики, то может быть уменьшен разброс, возникающий из-за триаксиальности эллиптических галактик. В этом случае, RMS уменьшается до 5 %.

В качестве иллюстрации применения локального метода оценки массы к реальным галактикам проведён анализ массивной эллиптической галактики M87, распределение массы которой уже оценено множеством методов, в том числе передовыми, такими как моделирование Шварцшильда. Мы сравнили наши простые оценки круговой скорости с профилями $V_c(r)$, полученными из рентгеновского анализа и из моделирования Шварцшильда (рис. 1).

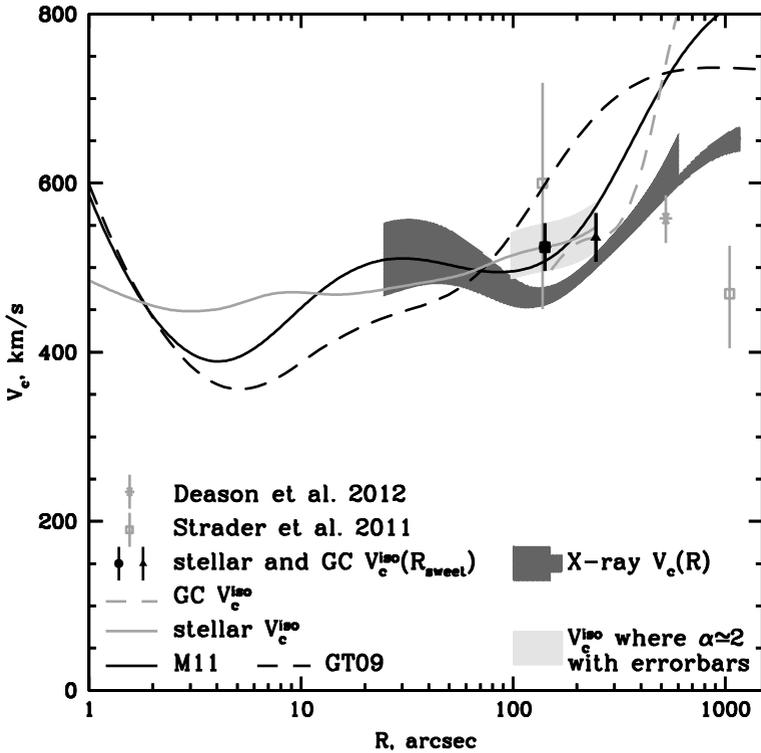


Рис. 1. Сравнение простых локальных оценок круговой скорости для M87 с профилями V_c , полученными передовыми методами. Чёрная сплошная линия — модель, полученная в работе [Murphy et al., 2011], чёрная штриховая — профиль круговой скорости из статьи [Gebhardt, Thomas, 2009]. Скорость V_c^{iso} , полученная на основе того же набора данных (в основном, фотометрия и кинематика звёзд), который использовался в работе [Murphy et al., 2011], показана серой сплошной линией. Профиль V_c^{iso} , рассчитанный из тех же данных по шаровым скоплениям, что использовались в статье [Gebhardt, Thomas, 2009], показан серой штриховой линией. Чёрным кружком и чёрным треугольником представлены простые локальные оценки круговой скорости. Тёмно-серым цветом показана круговая скорость с ошибками, полученная из анализа рентгеновских данных обсерваторий Chandra и XMM. Оценки V_c из недавних работ [Deason et al., 2012; Strader et al., 2011] показаны серыми точками

На «специальном» радиусе $R_{sweet} = 141$ угл. с простая оценка круговой скорости даёт $V_c^{opt} = 524$ км/с, что хорошо согласуется с круговой скоростью, полученной в работе [Murphy et al., 2011]. Сравнив оптическую и рентгеновскую оценки, приходим к выводу, что на специальном

радиусе R_{sweet} вклад нетепловой компоненты в полное давление газа составляет $\sim 25\%$. Истинное значение нетеплового вклада может быть даже ниже, так как рентгеновские данные в окрестности R_{sweet} искажены ударной волной [Forman et al., 2007].

С помощью шестиметрового телескопа БТА САО РАН для выборки ярких в рентгеновском диапазоне эллиптических галактик (NGC 708, NGC 1129, NGC 1550, UGC 3957 и NGC 4125) были получены профили поверхностной яркости, лучевой скорости и дисперсии лучевых скоростей звёзд вплоть до двух эффективных радиусов вдоль одной или двух щелей. Было произведено сравнение нашего подхода к оценке круговой скорости с рассчитанной из анализа рентгеновских данных обсерватории Chandra. Полученные оптические и рентгеновские оценки V_c согласуются достаточно хорошо друг с другом, особенно для NGC 1550 и NGC 1129, что указывает на динамическое равновесие этих галактик, практически изотропное распределение орбит звёзд в пределах 1-2 эффективных радиусов и что горячий газ этих объектов в гидростатическом равновесии. Единственная вращающаяся галактика в нашей выборке — NGC 4125 оказалась также единственной с заметным вкладом нетеплового давления (на уровне $\sim 36\%$). Однако вклад нетеплового давления, усреднённый по выборке, составляет $\sim 4 \pm 20\%$, т. е. сопоставим с нулём.

Исходя из оценок массы звёздного компонента, была определена доля тёмной материи f_{DM} в пределах R_{sweet} для каждой галактики. Типичное значение f_{DM} составило $\sim 60\%$ для начальной функции масс Салпитера и $\sim 75\%$ для функции масс Крупы [Кroupa, 2001].

Четвёртая глава посвящена сравнению простых методов оценки масс эллиптических галактик, а именно локального и глобального подходов. Методы были протестированы на объектах с заранее известным распределением массы, а именно: 1) на аналитических моделях; 2) на модельных галактиках, сходных по своим свойствам с галактиками раннего типа в близкой Вселенной и 3) на выборке реальных галактик раннего типа, которые уже были проанализированы передовыми методами. Были сделаны следующие выводы.

1. Применительно к сферическим аналитическим моделям оба подхода восстанавливают истинную круговую скорость с хорошей точностью. Для набора $\sim 30\,000$ исследованных моделей с различными профилями массы и анизотропии среднее отклонение простой локальной оценки V_c от истинного значения круговой скорости составляет $\bar{\Delta} \approx 2\%$, при этом среднеквадратичный разброс $RMS \approx 4\%$. Для глобального метода $\bar{\Delta} \approx -4\%$ и $RMS \approx 6\%$. Несмотря на то, что точные значения среднего отклонения и среднеквадратичного разброса зависят от дискретизации пространства параметров, локальный

подход оказывается менее чувствительным к предположениям, при которых он был получен, чем глобальный подход.

2. Были применены также простые методы к выборке массивных (значение σ_p на эффективном радиусе превышает 150 км/с) модельных галактик, из которой исключены быстро вращающиеся объекты, наблюдаемые вдоль оси вращения ($\sim 15\%$ от общего числа). Как уже отмечалось выше, для этой выборки локальный подход позволяет получить (практически) несмещённую оценку круговой скорости со среднеквадратичным разбросом $\sim 5\text{--}6\%$. Глобальный метод также даёт практически несмещённое измерение V_c на радиусе, на котором трёхмерная плотность светимости убывает как r^{-3} , среднеквадратичный разброс при этом $RMS \approx 7\%$. На $4/3R_{eff}$ (где R_{eff} определён из подгонки профиля Серсика к наблюдаемой поверхностной яркости) средняя глобальная оценка круговой скорости оказывается завышенной на $3,4\%$, и $RMS \approx 8\%$. Определение R_{eff} реальных объектов связано с дополнительной неопределённостью, особенно для эллиптических галактик с большим индексом Серсика, так как величина эффективного радиуса зависит от используемого для анализа диапазона радиусов и деталей применяемых методов, и этот факт является ещё одним преимуществом локального подхода.
3. Для выборки из 8 реальных медленно вращающихся эллиптических галактик с $\sigma_p(R_{eff}) > V_{rot}(R_{eff})$, уже детально изученных передовыми методами (7 галактик из работы [Thomas et al., 2007b] и M87), оба подхода демонстрируют отличное согласие с круговой скоростью V_c^{Schw} , полученной в результате динамического моделирования. При усреднении по выборке локальный подход даёт завышенную на 5% оценку круговой скорости. Это смещение связано в основном с одной галактикой — IC 3947 — с самым маленьким значением R_{eff} в исследуемой выборке. Если исключить эту галактику из рассмотрения, то локальная оценка $V_c(R_{sweet})$ завышает значение круговой скорости (по отношению к V_c^{Schw}) на $3,2\%$, при этом среднеквадратичный разброс равен $\sim 3,1\%$. Среднеквадратичный разброс между простыми локальными оценками для исследуемой выборки из 8 галактик составляет $\sim 6,6\%$, что сравнимо с ошибками измерений. Глобальный подход для той же выборки даёт завышенное в среднем на $\sim 2\%$ значение круговой скорости с несколько большим разбросом в $\sim 7,4\%$. Были проанализированы также галактики раннего типа с заметным вращением из выборки [Thomas et al., 2007b]. Если наблюдательные данные доступны только вдоль большой оси галактики, то для галактик с $V_{rot}(R_{eff}) > \sigma_p(R_{eff})$ (4 объекта) простые методы дают значительно

смещённую оценку круговой скорости. Исследуемые галактики с заметным вращением — это, как правило, сплюснутые у полюсов галактики, наблюдаемые с ребра [Thomas et al., 2007b]. Неудивительно, что для таких объектов с кинематическими данными только вдоль большой оси, оценка круговой скорости вида $V_c^2(R_{char}) = k(\sigma_p^2 + \xi V_{rot}^2)$ с $\xi \approx 0,5$ даёт более разумный результат. Вращение оказывается основным фактором, ухудшающим точность простой оценки. Массивные медленно вращающиеся галактики являются идеальными кандидатами для применения простых методов.

Локальное значение дисперсии лучевых скоростей на R_2 представляется хорошим индикатором вириальной массы галактики. M_{vir} (в единицах $M_{sun} h^{-1}$) может быть аппроксимирована выражением

$M_{vir} [M_{sun} h^{-1}] \approx 6 \cdot 10^{12} \left(\frac{\sigma_p(R_2)}{200 \text{ км/с}} \right)^4$, где $h = H_0/100$, H_0 — постоянная Хаббла, со среднеквадратичным разбросом $RMS \approx 40 \%$ (рис. 2). Раз-

брос сравним с таковым для случая, когда величина $\sqrt{\langle \sigma_p^2 \rangle}$ используется в качестве индикатора вириальной массы гало.

Был протестирован также «смешанный» подход, предложенный в работе [Agnello et al., 2014], который представляет собой в некотором смысле обобщение локального метода на степенные профили полной плотности ($\rho_{tot} \propto r^{-a}$).

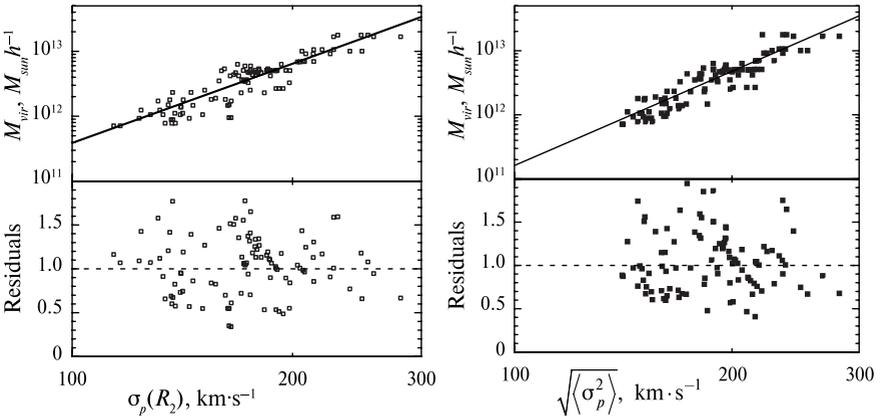


Рис. 2. Вириальные массы модельных галактик как функция локального значения дисперсии лучевых скоростей на R_2 (слева) и как функция взвешенной по светимости дисперсии лучевых скоростей (справа)

«Смешанная» оценка круговой скорости имеет вид $V_c^2(R_M) = K\sigma_p^2(R_\sigma)$, где R_σ — это радиус, на котором зависимость от показателя a минимальна; R_M выбирается таким образом, чтобы минимизировать зависимость R_σ от профиля анизотропии; K — безразмерная константа. К примеру, если поверхностная яркость описывается профилем де Вокулера, и анизотропия — профилем Осипкова-Меритта, то круговая скорость такой галактики может быть оценена как $V_c(3,4R_{eff}) \approx 1,67\sigma_p(1,15R_{eff})$. Для тестирования данного метода на нашей сетке аналитических моделей и выборке модельных галактик, были получены значения триплета (R_σ, R_M, K) для соответствующих профилей Серсика и профилей анизотропии Осипкова-Меритта в виде $\beta(r) = r^2 / (r^2 + r_a^2)$ с $r_a = 1R_{eff}, 3R_{eff}$ и $10R_{eff}$. Для выборки аналитических моделей усреднённое по выборке отклонение оценки круговой скорости от истинного её значения составило $\sim -7,4\%$ со среднеквадратичным разбросом $\sim 3,4\%$. Смещение в сторону отрицательных значение наблюдается также и для модельных галактик: $\bar{\Delta} \approx -10\%$, $RMS \approx 5\%$. Для реальных галактик раннего типа профиль круговой скорости, полученный из моделирования Шварцшильда, на больших расстояниях от центра становится плохо определённым, что делает сравнение оценки $V_c(R_M)$ на $R_M \geq 3R_{eff}$ с «истинной» скоростью малоинформативной. Таким образом, основываясь на результатах тестов на сферических аналитических моделях и модельных галактиках, мы пришли к выводу, что оценка круговой скорости в виде $V_c^2(R_M) = K\sigma_p^2(R_\sigma)$ вряд ли имеет очевидные преимущества перед локальным и глобальным подходами.

В *заключении* перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Список публикаций по теме диссертации

В реферируемых журналах по теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Lyskova N., Churazov E., Zhuravleva I., Naab T., Oser L., Gerhard O., Wu X.* Testing a simple recipe for estimating galaxy masses from minimal observational data // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS). 2012. V. 423. P. 1813. (*Лыскова Н., Чуразов Е., Журавлёва И., Нааб Т., Озер Л., Герхард О., Ву Кс.* Тестирование простого метода оценки масс галактик из минимального набора наблюдательных данных.)
2. *Lyskova N.* A simple recipe for estimating masses of elliptical galaxies and clusters of galaxies // Astronomische Nachrichten (AN). 2013. V. 334.

- P. 360. (*Лыскова Н.* Простой метод оценки масс эллиптических галактик и скоплений галактик.)
3. *Lyiskova N., Churazov E., Moiseev A., Sil'chenko O., Zhuravleva I.* Stellar kinematics of X-ray bright massive elliptical galaxies // MNRAS. 2014. V. 441. P. 2013. (*Лыскова Н., Чуразов Е., Моисеев А., Сильченко О., Журавлёва И.* Звёздная кинематика массивных эллиптических галактик, ярких в рентгеновском диапазоне.)
 4. *Lyiskova N., Thomas J., Churazov E., Tremaine S., Naab T.* Comparison of simple mass estimators for slowly rotating elliptical galaxies // MNRAS. 2015. V. 450. P. 3442. (*Лыскова Н., Томас Ё., Чуразов Е., Тремейн С., Нааб Т.* Сравнение простых методов оценки массы для медленно вращающихся эллиптических галактик.)

Список литературы

- [Agnello et al., 2014] *Agnello A., Evans N.W., Romanowski A.J.* Dynamical models of elliptical galaxies – I. Simple methods // MNRAS. 2014. V. 442. P. 3284.
- [Babcock, 1939] *Babcock H.W.* The rotation of the Andromeda nebula // Lick Obs. Bull. 1939. V. 19. No. 498. P. 41–51.
- [Churazov et al., 2010] *Churazov E., Tremaine S., Forman W., Gerhard O., Das P., Vikhlinin A., Jones C., Böhringer H., Gebhardt K.* Comparison of approximately isothermal gravitational potentials of elliptical galaxies based on X-ray and optical data // MNRAS. 2010. V. 404. P. 1165.
- [Deason et al., 2012] *Deason A.J., Belokurov V., Evans N.W., McCarthy, I.G.* Elliptical Galaxy Masses Out to Five Effective Radii: The Realm of Dark Matter // ApJ. 2012. V. 748. P. 2–12.
- [Forman et al., 2007] *Forman W., Jones C., Churazov E., Markevitch M., Nulsen P., Vikhlinin A., Begelman M., Böhringer H., Eilek J., Heinz S., Kraft R., Owen F., Pahre M.* Filaments, Bubbles, and Weak Shocks in the Gaseous Atmosphere of M87 // ApJ. 2007. V. 665. P. 1057–1066.
- [Gebhardt, Thomas, 2009] *Gebhardt K., Thomas J.* The Black Hole Mass, Stellar M/L, and Dark Halo in M87 // Astrophysical J. (ApJ). 2009. V. 700. P. 1690.
- [Gerhard, 1993] *Gerhard O.E.* Line-of-sight velocity profiles in spherical galaxies: breaking the degeneracy between anisotropy and mass // MNRAS. 1993. V. 265. P. 213.
- [Kroupa, 2001] *Kroupa P.* On the variation of the initial mass function // MNRAS. 2001. V. 322. P. 231.
- [Macciò et al., 2008] *Macciò A.V., Dutton A.A., van den Bosch F.C.* Concentration, Spin and Shape of Dark Matter Haloes as a Function of the Cosmological Model: WMAP1, WMAP3 and WMAP5 Results // MNRAS. 2008. V. 391. P. 1940.
- [Mayall, 1951] *Mayall N.U.* Comparison of Rotational Motions Observed in the Spirals M 31 and M 33 and in the Galaxy // The Structure of the Galaxy. Ann Arbor: Univ. Michigan Press, 1951. V. 10. P. 19.

- [Mo et al., 1998] *Mo H.J., Mao S., White S.D.M.* The formation of galactic discs // MNRAS. 1998. V. 295. P. 319–336.
- [Murphy et al., 2011] *Murphy J.D., Gebhardt K., Adams J.J.* Galaxy Kinematics with VIRUS-P: The Dark Matter Halo of M87 // ApJ. 2011. V. 729. P. 129.
- [Richstone, Tremaine, 1984] *Richstone D.O., Tremaine S.* A general method for constructing spherical galaxy models // ApJ. 1984. V. 286. P. 27.
- [Strader et al., 2011] *Strader J. Romanowsky A.J., Brodie J.P., Spitler L.R., Beasley M.A., Arnold J.A., Tamura N., Sharples R.M., Arimoto N.* Wide-field Precision Kinematics of the M87 Globular Cluster System // ApJS. 2011. V. 197. P. 33.
- [Thomas et al., 2007a] *Thomas J., Jesseit R., Naab T., Saglia R.P., Burkert A., Bender R.* Axisymmetric orbit models of N-body merger remnants: a dependency of reconstructed mass on viewing angle // MNRAS. 2007. V. 381. P. 1672–1696. doi: 10.1111/j.1365-2966.2007.12343.x.
- [Thomas et al., 2007b] *Thomas J., Saglia R.P., Bender R., Thomas D., Gebhardt K., Magorrian J., Corsini E.M., Wegner G.* Dynamical modelling of luminous and dark matter in 17 Coma early-type galaxies // MNRAS. 2007. V. 382. P. 657.
- [van den Bosch, van de Ven, 2009] *van den Bosch R.C.E., van de Ven G.* Recovering the intrinsic shape of early-type galaxies // MNRAS. 2009. V. 398. P. 1117.
- [Wolf et al., 2010] *Wolf J., Martinez G.D., Bullock J.S., Kaplinghat M., Geha M., Muñoz R.R., Simon J.D., Avedo F.F.* Accurate masses for dispersion-supported galaxies // MNRAS. 2010. V. 406. P. 1220.
- [Zwicky, 1933] *Zwicky F.* Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln // Helvetica Physica Acta. 1933. V. 6. P. 110–127.

Содержание

Общая характеристика работы	1
Актуальность темы	1
Цель работы	4
Научная новизна	4
Научная и практическая ценность	5
Основные положения, выносимые на защиту	5
Апробация работы	6
Объём диссертации	7
Содержание работы	7
Список публикаций по теме диссертации	14
Список литературы	15