

Московский Государственный Университет
им. М.В. Ломоносова
Государственный Астрономический Институт
им. П.К. Штернберга

На правах рукописи
УДК 524.7

Сабурова Анна Станиславовна

**Относительная масса темной материи в дисковых
галактиках**

01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

а в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Москва 2012

Работа выполнена на Кафедре астрофизики и звездной астрономии Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова в отделе внегалактической астрономии Государственного Астрономического Института им. П.К. Штернберга МГУ

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Кафедры астрофизики и звездной астрономии Физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова
Засов Анатолий Владимирович,

Официальные оппоненты:

Тутуков Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, отдел физики и эволюции звезд, ИНАСАН, ведущий научный сотрудник

Дамбис Андрей Карлович, доктор физико-математических наук, отдел изучения Галактики и переменных звезд, ГАИШ МГУ, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Астрокосмический центр Физического института Академии Наук

Защита состоится “10” мая 2012 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга МГУ по адресу: 119992, г. Москва, Университетский проспект, дом 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ.

Автореферат разослан “6” апреля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

С. О. Алексеев

1 Актуальность проблемы

Проблема оценки относительной массы темной материи в галактиках актуальна, поскольку она напрямую связана с вопросами формирования и эволюции галактик. Под темной материей в диссертации понимается как небарионная материя, так и барионное вещество, не вносящее заметного вклада в светимость. Из стандартной космологической модели следует, что галактики формировались в гравитационном поле темного гало, состоящего из бесстолкновительных частиц, которое, возможно, и в последующей истории галактики влияло на их эволюцию. Об этом может свидетельствовать связь относительной массы темной материи с другими наблюдаемыми свойствами галактик. Оценки масс темного гало в пределах оптических границ галактики необходимы также для того, чтобы иметь возможность вычислить массу и плотности галактических дисков, содержащих барионную материю (звезды и газ). Проблема заключается в сложности и подчас неоднозначности оценок массы темного гало и диска в пределах оптических границ галактик, обусловленной недостатками используемых с этой целью методов, каждый из которых исходит из определенных допущений. В некоторых случаях разные подходы приводят к сильно различающимся выводам как о массе гало, так и о составе галактических дисков, что продемонстрировано в диссертации на примере галактик низкой яркости. Поэтому важно иметь оценку массовой доли темного гало, произведенную независимыми методами. Самостоятельный интерес и актуальность имеют также вопросы о применимости тех предположений, что лежат в основе различных методов оценки относительных масс диска и гало, таких, как универсальность начальной функции масс звезд, близость звездных дисков к границе гравитационной устойчивости, или наличие темной материи в дисках.

2 Цели работы

В основе настоящей работы лежат следующие задачи:

1. Оценка относительной массы темного гало и диска для дисковых галактик различных типов и поверхностных яркостей с использованием различных методов.
2. Поиск галактик, обладающих аномальным для данного показателя цвета значением M/L , и их изучение: проведение поверхностной

фотометрии (для 11 объектов) и наблюдения двух галактик в линии HI на Westerbork Synthesis Radio Telescope (далее WSRT).

3. Изучение гигантской галактики низкой яркости Malin 2: обработка данных по поверхностной фотометрии и построение динамической модели, основанной на них.
4. Исследование близкой галактики M33: построение ее динамической модели с использованием критерия маргинальной устойчивости, учитывающего влияние холодной газовой подсистемы. Оценка радиального распределения эффективного выхода кислорода на основе полученных данных.

3 Научная новизна

1. Используя большой массив данных по оценкам скоростей вращения и светимостей, были выделены объекты с аномальными значениями отношения M/L диска и показано, что в большинстве случаев они связаны с ошибками оценок скоростей вращения или светимости.
2. Впервые были получены оценки масс дисков 4 галактик низкой яркости методом, основанным на условии маргинальной гравитационной устойчивости. Полученные оценки оказались сильно отличающимися от оценок, основанных на фотометрии, и близкими к оценкам максимального диска, что, по-видимому, свидетельствует в пользу того, что диски низкой яркости значительно тяжелее, чем это обычно принимается, альтернативное объяснение – динамический перегрев дисков.
3. В диссертации впервые были оценены массы дисков для выборки из 121 галактики с известными значениями дисперсии скоростей звезд на галактоцентрическом расстоянии в 2 радиальные шкалы диска с использованием критерия гравитационной устойчивости. Сопоставление этих оценок с фотометрическими, а также построение барионной зависимости Талли-Фишера говорит о хорошем согласии между ними (за исключением части галактик с высокими показателями цвета). Это свидетельствует об отсутствии сильного динамического перегрева дисков большинства спиральных и части линзовидных галактик, а, следовательно, об отсутствии слияния с крупными спутниками в их истории. В то же время примерно

половина линзовидных галактик обладают динамически перегретыми дисками на выбранном расстоянии от центра.

4. В настоящей работе впервые была получена динамическая модель МЗЗ, основанная на критерии маргинальной устойчивости звездного диска с учетом влияния газовой подсистемы. На основе оцененной поверхностной плотности диска и имеющихся в литературе распределений обилия кислорода впервые был получен ход эффективного выхода кислорода по радиусу для МЗЗ.
5. В диссертации впервые были получены результаты наблюдений в линии H I на радиоинтерферометре WSRT для двух галактик с аномальными оценками отношения массы к светимости: NGC6824 и UGC11919.
6. В диссертации получены данные многоцветной фотометрии в фильтрах B, V, R для 11 галактик с аномальными для данного показателя цвета оценками отношения массы к светимости (для 9 галактик это выполнено впервые).
7. В настоящей работе впервые была проведена поверхностная фотометрия гигантской галактики низкой яркости Malin 2 в фильтрах g, r, i, z. Эти результаты были использованы для построения динамической модели Malin 2.

4 Практическая и научная ценность

1. Оценки масс дисков низкой яркости, полученные в диссертации, позволяют сделать важный вывод о структуре этих объектов: галактики низкой поверхностной яркости, по-видимому, далеко не всегда являются системами с дисками малой плотности и доминирующим на всех радиусах темным гало. В этом случае различие между галактиками низкой и высокой поверхностной яркости может отражать не преобладание темного гало над диском в системах с низкой яркостью, как это принимается во многих работах, а особенность эволюции диска при наличии гало умеренной массы.
2. Вывод об отсутствии сильного динамического перегрева большинства спиральных и некоторых линзовидных галактик, сделанный в главе 2, свидетельствует о том, что они не испытали за свою историю слияний с крупными спутниками, и позволяет таким об-

разом получить определенные ограничения на условия формирования дисковых галактик.

3. Динамическая модель M33, построенная в главе 3 свидетельствует об отсутствии динамического перегрева центральной части этой галактики, и позволяет уточнить оценку массы ее диска. А радиальное распределение эффективного выхода кислорода, рассчитанное с использованием полученной оценки поверхностной плотности диска подтверждает вывод о большой роли аккреции в химическом обогащении среды в центральной области диска.
4. Исследование галактик с аномальными значениями отношения массы к светимости показывает, что существует небольшая доля галактик, по-видимому, обладающих нестандартной начальной функцией масс (НФМ) звезд и требующих более подробного исследования. Однако в большинстве случаев нет основания предполагать наличие сильных различий в НФМ звезд, образовавшихся в дисках.
5. Исследование структуры гигантской галактики низкой яркости Malin 2 позволяет продвинуться в понимании природы этого объекта.
6. Фотометрические и кинематические оценки, полученные в диссертации, содержат в себе новую информацию об изучаемых объектах и могут быть использованы другими авторами в их исследованиях.

5 Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих научных семинарах и конференциях:

1. Всероссийская школа для молодых ученых «Галактические и аккреционные диски», Н. Архыз, 2009.
2. Международная конференция «17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics», Киев, 2010.
3. Семинар по гравитации и космологии им. А.Л. Зельманова под руководством проф. Сажина М.В. и чл.-корр. РАН Старобинского А.А. № 201, Москва, 2010.
4. Международная конференция «Dynamics and evolution of disc galaxies», Москва, 2010.

5. Международная конференция «Evolution of galaxies, their central black holes and their large-scale environment», Потсдам, 2010.
6. Семинар в рамках международной инициативы «Dark Matter Awareness Week», Москва, 2010.
7. Всероссийская конференция «Современная звездная астрономия», Москва, 2011.
8. Международная конференция JENAM, Санкт-Петербург, 2011.
9. Неформальный научный семинар lunch-colloquium института ASTRON, Двингелоо, Нидерланды, 2011
10. «Конференция пользователей крупных телескопов России», Н. Архыз, 2011
11. Семинары отдела внегалактической астрономии, Москва, 2009, 2011.

6 На защиту выносятся следующие результаты

1. Получены результаты поверхностной BVR- фотометрии 11 галактик с аномально низкими оценками отношения массы к светимости для наблюдаемого показателя цвета. Для трех из них (NGC4826, NGC5347 и NGC6814) подтверждены аномально низкие для данного показателя цвета значения M/L , что свидетельствует о низкой массе гало и/или аномальной функции масс звезд в этих галактиках.
2. Представлены результаты исследований в линии H α , проведенных на радиоинтерферометре WSRT (Голландия), для двух галактик с отношениями массы к светимости, не соответствующими имеющимся оценкам их интегральных показателей цвета. Получены PV-диаграммы галактик, и определена кривая вращения NGC6824. В результате декомпозиции последней найдены значения масс диска, балджа и темного гало, причем масса гало оказалась много меньше массы видимых компонент.
3. Представлены результаты поверхностной многоцветной фотометрии гигантской галактики низкой яркости Malin 2 и проведено моделирование кривой ее вращения с учетом полученных данных. Массовая доля, приходящаяся на темное гало, составляет 0.17 и

0.70 в пределах одной и четырех радиальных шкал диска соответственно. Полученная модель близка к модели максимального диска.

4. Получены оценки массы и поверхностной плотности дисков четырех галактик низкой яркости с известными кинематическими характеристиками, основанные на использовании условия маргинальной гравитационной устойчивости дисков. Результаты дают основание считать, что диски рассматриваемых галактик в 4-6 раз тяжелее, чем это следует из фотометрии, что может быть связано с аномально высокой долей звезд малой массы или концентрацией темного вещества в диске.
5. Получены теоретические оценки поверхностных плотностей и масс дисков 121 галактики, для которых известны кривые вращения и дисперсии скоростей звезд на расстоянии $r \approx 2h$ от центра (где h — радиальная шкала плотности диска), в предположении маргинальной гравитационной устойчивости дисков. Показано, что для большинства спиральных галактик относительная масса диска внутри оптических границ лежит в пределах 0.4-0.8. Отсутствует систематическое расхождение полученных оценок масс дисков с фотометрическими оценками, базирующимися на эволюционной модели звездного населения. Это дает основание считать, что большинство рассмотренных галактик не испытало сильного динамического нагрева внутренних областей дисков. Галактики в парах и галактики с барами не выделяются по массовой доле дисков.
6. Динамически перегретые диски встречаются, однако, примерно у половины галактик с высоким показателем цвета $(B - V)_0 > 0.7$ (т.е. со слабым звездообразованием), относящихся в основном к типам S0-S0/a, что указывает на не одинаковую историю формирования линзовидных (S0) галактик.
7. Предложена динамическая модель M33, построенная в предположении маргинальной устойчивости ее газо-звездного диска, которая согласуется как с кинематическими, так и с фотометрическими свойствами галактики. С использованием этой модели рассчитаны массы диска и темного гало галактики, а также радиальный профиль эффективного выхода кислорода, показывающий отклонение от ожидаемого для модели мгновенного обогащения. Подтверждается вывод о массивном темном гало в галактике, получен-

ный Corbelli [2]: начиная с 7 кпк от центра, темное гало преобладает над диском по массе.

8. Показано, что отношение масс темного гало и диска галактик в пределах нескольких радиальных шкал диска варьируется в широком интервале (0-0.8) и очень слабо коррелирует с фотометрическими параметрами галактик. При этом скорость вращения периферийных областей дисков теснее коррелирует с массой диска, чем с массой темного гало, в гравитационном поле которого находится диск.

7 Личный вклад автора

По пунктам 1 и 3 автором была произведена обработка данных по поверхностной фотометрии всех рассмотренных объектов и построение динамической модели Malin 2. По пункту 2 автору принадлежит создание наблюдательной заявки на WSRT, автор принимала активное участие в обработке и интерпретации полученных результатов. По пунктам 4-8: автор принимала равное участие с остальными соавторами.

8 Основные результаты диссертации содержатся в следующих работах

1. Сабурова А.С., Шалденкова Е.С., Засов А.В., **Астрономический журнал**, 53, No 9, 861-873 (2009) «Спиральные галактики с «нетипичными» значениями отношения массы к светимости.»
2. Сабурова А.С., **Астрономический журнал**, 88, No 5, 446-453 (2011) «Диски LSB - галактик: легкие или массивные?»
3. Засов А.В., Хоперсков А.В., Сабурова А.С., **Письма в Астрономический журнал**, 37, No 6, 410-421 (2011) «Гравитационная устойчивость и динамическая перегретость звездных дисков галактик»
4. Сабурова А.С., Бизяев Д.В., Засов А.В., **Письма в Астрономический журнал**, 37, No 11, 811-826 (2011) «Существуют ли дисковые галактики с аномально низкими значениями отношения массы к светимости?»

5. Сабурова А.С., Засов А.В., **Письма в Астрономический журнал**, 38, No 3, 163-171 (2012) «Масса и плотность звездного диска в галактике М33»
6. Saburova A.S., **Proceedings of the 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics**, 19-22 (2011) «On the massive disks in low surface brightness galaxies»
7. Saburova A.S., **Astronomical and Astrophysical Transactions**, 27, No 2, 71-76 (2012) «On the possibility of massive disks in low surface brightness galaxies»

9 Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, одного приложения и списка цитируемой литературы.

«Введение» можно условно разделить на две основные части: в первой подробно описываются различные аспекты проблемы темной материи в галактиках, а во второй внимание уделяется таким важным пунктам, касающимся самой работы, как актуальность изучаемой проблемы, цели работы, ее научная новизна, практическая и научная ценность, структура и содержание работы, апробация работы, выводы, выносимые на защиту, перечисление работ, в которых содержатся результаты диссертации, и личный вклад автора. Во введении рассматриваются следующие аспекты проблемы темной материи на галактических масштабах:

- краткая история ее возникновения;
- проблема неопределенности оценки вкладов диска и темного гало в кривую вращения, в этом разделе разъясняются причины, по которым сложно однозначно определить массовую долю темного гало в отсутствие дополнительной информации, описываются различные подходы к определению массовых долей диска и гало и их недостатки;
- модель максимального диска: аргументы за и против, модель максимального диска зачастую используется при разделении вкладов диска и гало в кривую вращения, в данном разделе обсуждается насколько это оправданно;
- связь между массовой долей темного гало и другими наблюдаемыми свойствами спиральных галактик, в разделе приводится лите-

ратурный обзор этой проблемы, вопрос корреляции между относительной массой диска или темного гало и наблюдаемыми свойствами спиралей будет также затронут в главах 1 и 2 диссертации.

Первая глава «Интегральные значения отношения массы к светимости для дисковых галактик» состоит из 6 разделов. В ней приводится диаграмма $M/L - (B - V)_0$ для выборки из ~ 1300 галактик по базе данных Hyperleda. Вид диаграммы может свидетельствовать о статистической связи между массовой долей темной материи и цветом звездного населения. Галактики скопления Virgo на этой диаграмме не выделяются. Отдельное внимание уделяется галактикам с аномальными для данного показателя цвета отношениями массы к светимости, разъясняется, почему эти объекты представляют интерес, обсуждается проблема универсальности начальной функции масс звезд. В этой главе также приводятся результаты многоцветной фотометрии, полученные для 9 галактик с аномально низкими оценками отношения массы к светимости, обсуждаются возможные причины этой аномалии для каждого объекта, делается вывод о том, что для 5 из 9 рассмотренных объектов фотометрические данные дают основание предположить существование аномальной начальной функции масс звезд с дефицитом звезд малой массы. Помимо этого, в первой главе приводятся и анализируются результаты наблюдений в линии H I на WSRT для двух галактик с нетипичными значениями отношения массы к светимости звездного населения. Приводятся результаты поверхностной фотометрии для этих объектов.

Вторая глава «Гравитационная устойчивость звездных дисков» включает в себя 4 раздела. В ней описывается выборка из 121 объекта с известными значениями дисперсии скоростей звезд на расстоянии двух радиальных шкал диска от центра (по опубликованным данным), для которых нами были оценены массы дисков. Описывается метод оценки, основанный на критерии маргинальной устойчивости звездных дисков. Приводятся численные значения поверхностных плотностей и массовых долей звездных дисков для рассмотренной выборки. Полученные оценки массы дисков сопоставляются с фотометрическими на диаграмме « $M/L - \text{цвет}$ », делается вывод о хорошем согласии между ними (за исключением части объектов с красными показателями цвета звездного населения). Приводятся диаграммы c_r/v_c -тип, $v_c - c_r$, $M_d/M_t - (B - V)_0$, $\sigma(2h)$ -тип и барионная зависимость Талли-Фишера. Здесь c_r/v_c - отношение радиальной дисперсии скоростей звезд к круговой скорости на расстоянии двух

радиальных шкал ($r = 2h$), M_d/M_t – массовая доля диска, $\sigma(2h)$ – поверхностная плотность диска на расстоянии $r = 2h$. Показано, что: корреляция между типом и c_r/v_c практически отсутствует, то же относится и к зависимости между v_c и c_r . Галактики с динамически перегретыми дисками чаще всего встречаются среди объектов с высокими показателями цвета, большинство которых относится к линзовидным галактикам; галактики в парах не выделяются на диаграммах. То же можно сказать и о галактиках с барами. Массовые доли дисков сопоставляются с центральными поверхностными плотностями, определенными фотометрически, и с поверхностными яркостями дисков. Делается вывод о наличии статистически значимой корреляции между массовой долей диска и центральной поверхностной плотностью для выборки галактик позднего типа с надежными оценками дисперсии скоростей звезд и скорости вращения. Однако этот вывод требует проверки, ввиду малости выборки (9 галактик).

Третья глава «Масса и плотность звездного диска в галактике М33» посвящена оценкам массы и плотности звездного диска М33 по дисперсии скоростей планетарных туманностей и состоит из 5 разделов. В главе описывается метод, используемый для оценки поверхностной плотности диска М33, в котором учитывается дестабилизирующее влияние газового компонента на устойчивость системы. Сравниваются профили поверхностной плотности диска, полученные в рамках настоящей работы и работы Ciardullo и др. [3]. Отношение массы к светимости в фильтре К, определенное с использованием этих профилей сопоставляется со значением, найденным по фотометрии (исходя из наблюдаемых показателей цвета), делается вывод о хорошем согласии оценок плотности, сделанных в рамках настоящей работы с фотометрическими оценками. В третьей главе также приводится профиль изменения толщины звездного диска по радиусу для различных отношений дисперсий скоростей c_z/c_r и декомпозиция кривой вращения М33 на компоненты, относящиеся к газовому и звездному дискам, балджу и темному гало. Делается вывод о том, что темное гало начинает доминировать по массе над видимым веществом с расстояния $r = 7$ кпк от центра. Рассчитывается изменение эффективного выхода кислорода с расстоянием от центра с использованием оценок поверхностной плотности диска и обилия кислорода из работ [4], [5]. Эффективный выход кислорода возрастает с радиусом. Это может свидетельствовать о систематическом уменьшении роли аккреции бед-

ного металлами газа с расстоянием от центра.

Четвертая глава «Галактики низкой яркости» включает в себя 4 раздела. В этой главе получены оценки масс и плотностей дисков четырех галактик низкой поверхностной яркости с использованием метода, основанного на критерии их маргинальной устойчивости и распределений дисперсии скоростей звезд по радиусу, взятых в работе [6]. Отношения массы к светимости дисков низкой яркости, найденные на основе этих оценок, в несколько раз превышают значения, следующие из фотометрии (согласно наблюдаемому цвету звездного населения и теоретическим зависимостям « M/L – цвет» со стандартной НФМ), однако хорошо согласуются с кривыми вращения галактик. Отношения массы к светимости дисков были использованы при декомпозиции кривых вращения, полученные модели оказались близки к моделям максимального диска. Данные по дисперсии скоростей звезд позволили также оценить полутолщины звездных дисков, соответствующие условию их маргинальной устойчивости и сравнить их с оценками, следующими из фотометрических измерений поверхностной плотности дисков. Сравнение этих величин показывает, что случаю маргинально устойчивых дисков соответствует толщина в 2–2.5 раза меньшая, чем в случае фотометрической оценки плотности. Делается вывод, что диски галактик низкой яркости могут быть гораздо массивнее, чем это следует из фотометрии, если только они динамически не перегреты. Высокие отношения массы к светимости дисков низкой яркости могут быть связаны или с нестандартной НФМ (с избытком звезд малой массы), или с наличием темного вещества в дисках. В четвертой главе также приводятся результаты многоцветной фотометрии гигантской галактики низкой яркости Malin 2, и декомпозиция ее кривой вращения, с учетом полученных данных. Рассчитанная модельная кривая вращения свидетельствует в пользу того, что во внутренней части этого объекта доминирует по массе видимое вещество, в то же время внутри $r = 4h$ преобладает темное гало. Также в главе 4 приведены данные по кинематике звезд и ионизованного газа Malin 2, полученные, исходя из спектра, доступного в архиве GMOS-N, в совместной работе с Каспаровой, Катковым и Чилингаряном. Щель была ориентирована вдоль малой оси, поэтому кривой вращения получить не удалось, но на PV-диаграмме заметно противовращение центральной части звездного и газового дисков, которое может свидетельствовать о слиянии этой галактики с малым спутником. Поверхностные плотности

молекулярного и атомарного водорода из работ [7], [8] вкупе с результатами динамического моделирования позволили нам рассчитать равновесное гидростатическое давление турбулентного газа. Наблюдаемая степень молекуляризации газа по данным Das и др. [8] в этой галактике значительно выше, чем ожидается для галактик высокой поверхностной яркости, не входящих в состав скоплений, при данных значениях давления межзвездной среды. Возможным объяснением этого явления может послужить долгоживучесть молекулярных облаков в областях с низким темпом звездообразования.

В главе «Выводы и обсуждения диссертации» массовые доли дисков, оцененные разными методами, сопоставляются с показателями цвета и светимостями, даются корреляции между массами диска и гало в пределах оптического радиуса и скоростью вращения, делается вывод о том, что скорость вращения теснее связана с массой диска, а не гало. Приводится зависимость между массой темного гало в пределах оптических границ и вириальной массой, делаются основные выводы работы.

В приложении содержится расчет влияния внутреннего поглощения на положение точек на диаграмме « M/L – цвет» и делается вывод о том, что ослабление света, связанное с пылью, одновременно уменьшает оценку светимости и увеличивает оценку показателя цвета. Таким образом, точки на диаграмме M/L – цвет оказываются на все той же модельной зависимости.

Список использованных источников

1. Lelli F., Fraternali F., Sancisi R., A&A, 516A, 11 (2010)
2. Corbelli E., MNRAS, 342, 199 (2003)
3. Ciardullo R., Durrell P. R., Laychak M. B. et al., ApJ, 614, 167 (2004)
4. Pilyugin L. S., Vílchez J. M., Contini T., A&A, 425, 849 (2004)
5. Magrini L., Stanghellini L., Corbelli E., Galli D., Villaver E., A&A, 512, 63 (2010)
6. Pizzella A., Corsini E. M., Sarzi M. et al., MNRAS 387, 1099 (2008)
7. Pickering T. E., Impey C. D., van Gorkom J. H., Bothun G. D., AJ, 114, 1858 (1997)
8. Das M., Boone F., Viallefond F., A&A, 523A, 63 (2010)