

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П.К. Штернберга

На правах рукописи

Зайцева Наталия Александровна

**Скорости вращения галактических дисков:
связь со светимостью галактик и массой газа**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:

д. ф.-м. н., проф. Засов А.В.

д. ф.-м. н., проф. Макаров Д.И.

Москва - 2018

Оглавление

Введение	4
I. Общая характеристика работы	4
II. Актуальность работы	4
III. Цели работы	5
IV. Научная новизна	6
V. Практическая и научная значимость работы	6
VI. Положения, выносимые на защиту	7
VII. Основные публикации по теме диссертации	8
VIII. Апробация результатов работы	9
IX. Структура и объем диссертации	9
X. Вклад автора в совместных работах	13
1. База данных HYPERLEDA	14
1.1 Важность астрофизических баз данных	14
1.2 Общие характеристики базы данных HYPERLEDA	16
1.3 Шкалы расстояний	20
1.3.1 Структура каталога	21
1.3.2 Таблица измерений	21
1.3.3 Таблица калибровок	22
1.3.4 Методы прямого определения расстояния	22
1.3.5 Применение звездных объектов в качестве стандартной линейки или стандартной свечи	22
1.3.6 Методы, основывающиеся на масштабных соотношениях для галактик	25
1.3.7 Содержание каталога расстояний	26
1.3.8 Гомогенизация расстояний	30
1.4 Параметры линии HI	34
1.4.1 Проблема базы данных (некорректная оценка поглощения в линии HI)	34
1.5 Заключение и выводы	37
2. Соотношение Талли-Фишера	39
2.1 Введение	39
2.1.1 История вопроса	39
2.1.2 Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра	42
2.2 Наблюдательная выборка	43
2.2.1 Каталог EGIS	47
2.2.2 Каталог EDD	48
2.2.3 Галактики, исключенные из рассмотрения	48
2.3 Стандартное соотношение Талли-Фишера	50
2.3.1 Излом на зависимости	50
2.3.2 Вопрос учета поглощения и сравнение с работами других авторов	52
2.4 Многопараметрическое соотношение Талли-Фишера	54
2.4.1 Выборка параметров на роль дополнительных	54
2.4.2 Методы отборки конечных параметров и полученные соотношения	55
2.4.3 Калибровка нуля-пункта	58
2.4.4 Финальные соотношения (в разных фильтрах) и величина H ₀	60
2.5 Заключение	60
3. Кинематика дисков и содержание газа в галактиках	63
3.1 О предполагавшейся связи темной материи с содержанием HI	63
3.1.1 Введение	63
3.1.2 История вопроса	64
3.1.3 Проверка существования связи между DM и HI по данным THINGS	65
3.2 Нейтральный водород и устойчивость	70

3.2.1 Как обойтись без “тяжелого” газа	70
3.2.2 Сравнение моделей с “тяжелым” газом и темным гало	74
3.2.3 Сравнение модельных толщин дисков с наблюдениями	80
3.3 Зависимость “Масса - удельный угловой момент” для газа и эволюция содержания газа в диске	83
3.3.1 Содержание газа в дисках галактик.....	83
3.3.2 Соотношение “масса водорода – удельный момент вращения” ($MHI - VD$) ..	86
3.3.3 Зависимость $MHI-VD$ или чем определяется количество $H I$ в диске	89
3.3.4 Эволюция соотношения $MHI-VD$	97
3.3.5 Галактики с аномально высокой массой водорода на диаграмме $MHI-VD$...	100
3.4 Заключение и выводы	105
Заключение.....	107
Список литературы.....	108

Введение

I. Общая характеристика работы

Данная работа направлена на изучение масштабных соотношений между интегральными параметрами галактик поздних типов, в первую очередь, между скоростью вращения дисков, их фотометрическими характеристиками и содержанием нейтрального водорода (HI). Соотношение Талли-Фишера, построенное для галактик, видимых с ребра, позволяет связать скорость вращения дисков, не требующую корректировку за наклон к лучу зрения, со светимостью галактик, что дает возможность уточнить шкалу внегалактических расстояний. Взаимосвязь содержания нейтрального водорода в галактиках с их глобальными параметрами, такими как скорость вращения и линейный размер диска, позволяет получить информацию об особенностях эволюции галактик и их газовой составляющей.

Диссертация включает как работу с существующими каталогами, так и анализ и физическую интерпретацию полученных результатов.

II. Актуальность работы

Уточнение шкалы расстояний во Вселенной является важной задачей современной астрономии. Знание точного расстояния необходимо как для оценки современных характеристик галактик, так и для изучения их эволюции, а также эволюции Вселенной как целого. Если для ближайшей Вселенной есть возможность получать оценки расстояний исходя из наблюдений, так называемых, стандартных свечей в галактиках, то для более удаленных объектов ситуация менее определенная. Здесь на помощь приходят масштабные соотношения, известные как соотношения Фабера-Джексона и Талли-Фишера. Эти соотношения связывают наблюдаемые параметры галактик, такие как дисперсия скоростей и скорость вращения соответственно, с интегральной светимостью галактик. Но на современном уровне развития наблюдений, все еще остаются значительные ошибки, связанные с определением вышеперечисленных параметров. В частности, сохраняется проблема выборки галактик со сходными параметрами, неоднозначность оценки внутреннего поглощения, а также неопределенность в измерении угла наклона диска, что приводит к значительным расхождениям в определении скорости вращения. В связи с этим, галактики, видимые с ребра, рассматриваемые в настоящей работе, как нельзя лучше подходят для уменьшения разброса точек на диаграмме Талли-Фишера, поскольку угол наклона диска, близкий к 90° , позволяет минимизировать ошибки в определении скорости вращения. Ввод дополнительных параметров (например, показателей цвета, потока в линии

HI (21 см)), дополнительно уменьшает дисперсию соотношения Талли-Фишера, а также позволяет сделать косвенные оценки поглощения света для галактик, видимых с ребра.

Другим важным вопросом является интерпретация известной корреляции между кинематическими параметрами дисков и содержанием газа в них и ее связь с гравитационной устойчивостью галактических дисков и особенностями их эволюции. Если во внутренних областях диска доминирующую роль в устойчивости, как правило, играет звездное население, то во внешних областях значительной становится гравитация газового слоя. Существует большое число процессов, определяющих содержание газа в диске, которые могли играть различную роль на разных этапах жизни галактики. Тем не менее, масса газа в диске коррелирует с медленно эволюционирующими параметрами, такими, как размер или удельный угловой момент диска, что говорит о существовании некоторого регулирующего механизма. Этот вопрос подробно обсуждается в диссертации.

Анализ содержания газа в дисках позволил также проверить гипотезу о связи темной материи с HI (гипотеза Bosma [1]), согласно которой с межзвездным газом связана не наблюдаемая непосредственно темная материя. Нами было показано, что для такого утверждения нет никаких оснований, а распределение газа в большинстве галактик отражает условие пороговой гравитационной устойчивости газового слоя в современную эпоху или установившееся при переходе к “спокойной” стадии формирования диска.

III. Цели работы

Главной целью работы является изучение масштабных соотношений между глобальными параметрами галактик (в основном – спиральных галактик поздних типов), как для уточнения шкалы расстояний до внегалактических объектов, так и для изучения содержания газа и особенностей эволюции галактических дисков.

Поставленная цель подразумевает решение следующих задач:

- Создание выборки галактик, видимых с ребра (на базе каталогов EGIS [2] и EDD [3]), для которых имеются высокоточные данные по фотометрии и структурным параметрам. Уточнение недостающих параметров из анализа литературных и каталожных данных.
- Построение численных алгоритмов для поиска и включения дополнительных параметров, обеспечивающих минимальную дисперсию финального многопараметрического соотношения Талли-Фишера.
- Проверка гипотезы Bosma [1] о пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода в галактиках на основе данных обзора THINGS [4].

- Сопоставление выборки плоских и изолированных галактик (AMIGA), построение соотношений между массой нейтрального водорода и структурными параметрами галактик.
- Анализ и интерпретация связи между содержанием водорода и удельным угловым моментом галактических дисков.

IV. Научная новизна

- В данной работе создана выборка галактик поздних типов, видимых с ребра, с имеющейся высокоточной фотометрией по данным обзора SDSS [5], для которой построена “классическая” зависимость Талли-Фишера.
- Для уменьшения дисперсии зависимости Талли-Фишера, в неё были включены дополнительные параметры, значимость которых оценена статистическими методами. Построено многопараметрическое соотношение Талли-Фишера.
- Выдвинута и подтверждена теория, согласно которой корреляция между поверхностными плотностями нейтрального водорода и темной материи может быть объяснена исходя из условия гравитационной устойчивости галактического диска в предположении примерного постоянства параметра устойчивости Тумре Q_T вдоль радиуса.
- Показано, что общее содержание HI в галактике отражает условие пороговой гравитационной устойчивости диска, которое непосредственно связано с глобальной эволюцией галактики.

V. Практическая и научная значимость работы

- Получено соотношение Талли-Фишера для трех SDSS фильтров g, r и i. Путем добавления дополнительных параметров получена более тесная зависимость, позволяющая повысить точность оценок расстояний до галактик. Показано, что наклон логарифмической зависимости “скорость-светимость” меняется при переходе через пороговое значение $V_{rot} \sim 91$ км/с, что может отражать как чисто статистические эффекты, так и различие в характере распределения пыли в галактиках разных масс. Сравнение итогового соотношения Талли-Фишера с литературными данными дало возможность получить косвенные оценки поглощения в галактиках, видимых с ребра.
- Показана несостоятельность гипотезы о том, что темная материя сосредоточена в диске, а не в массивном сфероидальном гало. Подобная форма темной материи приводила бы к нереалистично большим значениям толщин диска, что противоречит наблюдениям. При этом кажущаяся связь между темной материей и нейтральным водородом может быть

объяснена приблизительно постоянным значением параметра устойчивости Тумре (Q_T) вдоль радиуса галактики.

- Построены масштабные соотношения между массой HI и линейным размером, скоростью вращения галактики и удельным моментом вращения диска (DV). Аргументирован вывод о том, что эти соотношения отражают роль гравитационной неустойчивости в эволюции дисковых галактик. Полученные зависимости также позволяют диагностировать галактики с аномально высоким содержанием водорода. Помимо этого, сравнение положения на общих зависимостях галактик, видимых с ребра, с изолированными галактиками (видимых под произвольными углами), позволили оценить поглощение в линии HI в сильно наклоненных дисках.

VI. Положения, выносимые на защиту

- **Работа с базой данных HYPERLEDA и каталогом расстояний:** Проанализированы и занесены в базу данных HYPERLEDA [6] полученные результаты обработки имеющихся литературных данных по измерению расстояний до галактик различными методами. Проведено сравнение систематических различий в определении расстояний до объектов, полученных разными способами.

- **Соотношение Талли-Фишера для плоских галактик в оптическом диапазоне:** На основе каталогов EDD [3], RFGC [7] и EGIS [2] создана выборка галактик, видимых с ребра, для которой построено классическое соотношение Талли-Фишера с использованием SDSS фотометрии в фильтрах g , r , i и данных о потоке в линии HI. Проведено сравнение полученных соотношений с данными других авторов, на основании которого оценена величина поглощения в галактиках, видимых с ребра.

- **Построение многопараметрического соотношения Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра:** Построено многопараметрическое соотношение Талли-Фишера с использованием показателей цвета и содержания водорода в качестве дополнительных параметров. Показано, что, вопреки ожиданиям, учет относительной толщины “плоских” галактик не влияет на разброс точек на диаграмме Талли-Фишера. Применение многопараметрического соотношения Талли-Фишера позволяет получить более точные оценки расстояний.

- **Оценка Постоянной Хаббла для выборки плоских галактик:** Основываясь на итоговых соотношениях Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра, уточнено значение Постоянной Хаббла $H_0 = 73.9 \pm 0.6$ км/с/Мпк в интервале лучевых скоростей $1000 \text{ км/с} \leq V_{CMB} \leq 14000 \text{ км/с}$, с использованием в качестве опорных объектов 5 “плоских” галактик

с известным модулем расстояния по TRGB-методу. Путем статистического анализа были выбраны оптимальные корректировки для учета движения совокупности галактик относительно космологического фона.

- **Проверка гипотезы о связи темной материи с нейтральным водородом в спиральных галактиках:** На основе данных из каталога THINGS [4] была проведена проверка гипотезы о том, что темная материя в галактиках связана с холодным газом в диске. Хотя эта гипотеза может давать удовлетворительное объяснение наблюдаемым кривым вращения, диски, содержащие темную материю, будут иметь толщину, намного превышающую наблюдаемую. Показано, что связь между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода может быть объяснена, если принять примерное постоянство параметра гравитационной устойчивости Тумре Q_T на большом интервале радиальных расстояний.

- **Связь массы газа с угловым моментом диска:** Для рассмотренных в работе выборок галактик поздних типов предложена интерпретация зависимости между массой HI и удельным угловым моментом галактического диска и показано, что она соответствует параметру устойчивости газового слоя $Q_T \gtrsim 2$. Предложены два возможных объяснения: либо гравитационная устойчивость соответствует более высоким значениям параметра Тумре, чем это обычно принимается, либо современные газовые диски обладают запасом устойчивости, а пороговый уровень устойчивости для большинства галактик имел место в прошлом, когда масса газа в дисках была в 2–4 раза выше, чем в настоящее время. Из последнего варианта следует, что расход массы газа на звездообразование последние миллиарды лет не компенсировался аккрецией газа на диск.

VII. Основные публикации по теме диссертации

- Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах:

- 1) Makarov D., Prugniel Ph., Terekhova (Zaitseva) N., Courtois H., Vauglin I., *HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances*, 2014, **Astronomy&Astrophysics**, vol. 570, id. A13
- 2) Терехова (Зайцева) Н.А., *О связи темной материи с нейтральным водородом в спиральных галактиках*, **Астрономический Журнал**, 2012, том 89, №7, с. 560-567
- 3) Засов А.В., Терехова (Зайцева) Н.А., *О связи распределения нейтрального водорода с темной массой в галактиках*, **Письма в Астрономический Журнал**, 2013, том 39, №5, с.323-331
- 4) Засов А.В., Зайцева Н.А., *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной*

неустойчивости, **Письма в Астрономический Журнал**, 2017, том 43, №7, с. 485-499

- Статьи в сборниках трудов конференций:

1) Засов А.В., Зайцева Н.А., *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной неустойчивости*, Тезисы докладов XXXIV Всероссийской конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017, с. 38

2) Макаров Д.И., Зайцева Н.А., Бизяев Д.В., *Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра*, Тезисы докладов XXXIV Всероссийской конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017, с. 39

3) Makarov D.I., Zaitseva N.A., Bizyaev D.V., *Tully-Fisher relation of flat galaxies*, International Conference COSMOLOGY ON SMALL SCALES 2018: Dark Matter Problem and Selected Controversies in Cosmology, Prague, Czech Republic, 26-29 September 2018

VIII. Апробация результатов работы

- Доклады на международных конференциях

1) Life-cycle of gas in galaxies: A Local Perspective, Dwingeloo, Нидерланды, *Total mass of HI and dynamical parameters of starforming galaxies* (Стендовый), 31 августа - 4 сентября 2015

- Доклады на всероссийских конференциях

2) Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Россия, *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной неустойчивости*. (Устный), 18-21 апреля 2017

3) Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пуштинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Россия, *Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра*. (Устный), 18-21 апреля 2017

4) Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент, Москва, Россия, *Содержание HI в спиральных галактиках и звездообразование*. (Устный), 13-15 ноября 2017

IX. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 3 глав, Заключения и Библиографии. Общий объем диссертации 122 страницы, включая 30 рисунков и 12 таблиц. Библиография включает 226 наименований на 15 страницах.

Во Введении приведен краткий обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная

и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту, и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена вопросу важности астрофизических баз данных на примере базы данных HYPERLEDA [6]. В современной литературе существует огромное число данных по расстояниям до внегалактических объектов, однако для построения однородной шкалы расстояний во Вселенной необходимо иметь измерения, проведенные сходными или согласованными между собой методами. Сбор и упорядочивание подобных астрофизических данных предоставляет возможность более эффективно формировать выборки объектов и их характеристик (таких, как линейные размеры, космологические скорости и скорости вращения, потоки в различных диапазонах) для дальнейших исследований.

Далее в **Главе 1** приводится краткий обзор методик определения расстояний в ближней и дальней Вселенной. Рассматриваются плюсы и минусы каждого из методов и границы их применимости. Особую роль во внегалактической астрономии играет эмпирическое соотношение Талли-Фишера (связь между светимостью дисковой галактики и скоростью вращения, обычно измеряемой по полуширине линии нейтрального водорода), которое рассматривается в диссертации в связи с возможностью его использования для оценки шкалы расстояний.

Результаты проведенной работы были отражены в базе данных HYPERLEDA [6] для уточнения параметров, зависящих от принятого расстояния. Оценки, собранные в HYPERLEDA [6], изначально представляют собой неоднородный набор данных, где каждый отдельный источник использует свою шкалу расстояний и имеют свои ошибки, что подразумевает сложный процесс “гомогенизации” данных. В **Главе 1** приводится описание проведенных нами процедур усреднения и упорядочивания данных о расстояниях до галактик.

Отдельно рассматривается вопрос об оценке поглощения в линии H I 21 см для сильно наклоненных дисков. Показано, что для “плоских” галактик в HYPERLEDA [6] имеет место существенный переучет степени поглощения, что ведет к завышенной оценке полной массы водорода для них.

Глава 2 посвящена исследованию соотношения Талли-Фишера. В работах многих авторов рассматривается построение и уточнение данного соотношения с целью увеличить точность внегалактической шкалы расстояний. За основу нашей выборки были взяты сверхтонкие галактики из каталога плоских галактик Караченцева RFGC (Revised Flat Galaxy Catalog, [7]), для которых имеется фотометрия в SDSS фильтрах g, r и i, проведенная

Бизяевым [2] (данные по фотометрии представлены в каталоге EGIS) и данные по ширине линии HI из каталога All Digital HI [8].

Первая часть главы отводится под обзор истории получения и использования соотношения Талли-Фишера и описание формирования начальной выборки “плоских” галактик, используемой в данной работе. Аргументируется выбор галактик, видимых с ребра, как объектов исследования. Для этих галактик ошибки в определении угла наклона минимальны, что приводит к минимальным же ошибкам в определении скорости вращения диска. Однако, появляется проблема адекватного учета поглощения света в таких объектах, хотя имеющиеся исследования показали, что влияние поглощения на полную светимость “плоских” галактик плавно меняется в зависимости от характеристик галактик и не приводит к значительному увеличению дисперсии точек на диаграмме.

Вторая часть **Главы 2** посвящена работе с литературными и каталожными данными по созданию однородной выборки галактик. Приводится описание основных каталогов, которые предоставили большую часть данных для исследования (каталоги RFGC [7], EGIS [2], EDD [3]). Здесь же дана окончательная выборка объектов для построения соотношения Талли-Фишера, из числа которых были исключены галактики с разногласиями в определении параметров, а также очень близкие галактики ($V_{CMB} \leq 1000$ км/с), галактики-члены групп и скоплений, взаимодействующие галактики.

В третьей части **Главы 2** описывается непосредственно процедура построения соотношения Талли-Фишера, как классического (связь между светимостью галактики и ее скоростью вращения), так и многопараметрического, что позволило увеличить точность измерения расстояния. Приводится краткое описание численных методов, использовавшихся для выбора параметров в качестве дополнительных. Мы обнаружили присутствие “излома” на зависимости на значении скорости вращения $V_{rot} \sim 91$ км/с. Данный излом может иметь чисто статистический характер, вызванный тем, что галактик-карликов в финальной выборке присутствует в несколько раз меньше, чем галактик-гигантов. Однако, более вероятна другая причина: как было показано в более ранних работах, имеет место различное распределение пыли в карликовых и гигантских галактиках, что неизбежно сказывается на оценках их светимости. Поэтому детальный учет поглощения для галактик-карликов и галактик-гигантов может привести к исчезновению данного излома.

В конце главы мы приводим финальные многопараметрические соотношения Талли-Фишера, построенные как по всей выборке целиком, так и по выборке галактик-гигантов с учетом экстраполяции зависимости в область карликов.

Глава 3 посвящена вопросу о содержании нейтрального водорода и его связи с кинематическими характеристиками галактик и их эволюцией.

В первой части главы речь идет о гипотезе, предложенной Bosma [1] и рассмотренной также рядом других авторов, о существовании связи между нейтральным водородом и темной материей в галактиках. Эта гипотеза базируется на сходном характере распределения колонковых плотностей темной материи и HI, и предполагает, что темная материя может быть представлена не в виде массивного темного гало, окружающего галактику, а заключена в диск, вероятно, в форме небольших газовых облаков, слишком холодных, чтобы быть заметными при наблюдениях. На базе обзора THINGS [4] были проанализированы кривые вращения галактик и показано, что наблюдаемые кривые вращения действительно могут быть объяснены и при отсутствии темного гало. Однако, если считать, что “холодная” темная материя сосредоточена в диске, то расчетная толщина диска, исходя из условия его гравитационной устойчивости, оказывается чрезмерно велика, и противоречит наблюдениям реальных объектов. Далее показано, что наблюдаемая пропорциональность поверхностной плотности темной материи и нейтрального водорода может быть объяснена в предположении того, что параметр гравитационной устойчивости Тумре для газового Q_T на большом интервале радиальных расстояний остается примерно постоянным.

Вторая часть **Главы 3** посвящена связи нейтрального водорода с такими глобальными параметрами галактики, как линейный размер, скорость вращения и удельный момент вращения. Уточнена корреляция между M_{HI} и удельным моментом вращения, который считался пропорциональным произведению скорости вращения диска на его линейный размер (D_{25} или радиальная шкала R_0). Полученная корреляция позволяет диагностировать галактики с аномально высоким содержанием водорода, газовые диски которых, по-видимому, близки к состоянию пороговой устойчивости. Указанные выше зависимости согласуются с примерным постоянством параметра устойчивости Тумре Q_T для газового слоя на значительном интервале радиальных расстояний, в пределах которого содержится основная масса HI. Однако значение Q_T для большинства галактик при этом должно превышать фактор 2, то есть, газовый слой, по-видимому, обладает запасом устойчивости. Рассмотрены два варианта, объясняющие высокое значение Q_T : либо его критическое значение, определяющее устойчивость газового слоя для азимутально усредненной плотности газа в несколько раз превышает обычно принимаемое значение $Q_T \approx 1 - 2$, либо рассматриваемая зависимость возникла в ту эпоху, когда “бурная” фаза формирования звездного диска завершилась, и плотность газового диска оказалась близкой к пороговому значению для дисперсии скоростей газа около 10 км/с.

В заключении **Главы 3** обсуждаются основные выводы.

Х. Вклад автора в совместных работах

Соискатель принимал равное участие с соавторами в формулировке выводов из проделанных и опубликованных работ. Автором диссертации был проведен статистический анализ характеристик выборки галактик, видимых с ребра, и изолированных галактик, а также анализ литературных данных по кривым вращения и построение модельных кривых вращения в предположении о пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода. Соискателем также была выполнена оценка параметров дисков галактик при различных предположениях о содержании темной материи в пределах звездного диска. Идея о возможном объяснении связи содержания HI с темной материей, как и с удельным угловым моментом диска, была ранее предложена А.В. Засовым, работа над доказательной базой и приведенные в диссертации оценки сделаны совместно. Соискателем самостоятельно проведены численный анализ и построение моделей для вычисления классического и многопараметрического соотношения Талли-Фишера для выборки плоских галактик и выполнено сравнение с имеющимися работами других авторов. Подготовка к публикации полученных результатов в виде статей проводилась совместно с соавторами.

1. База данных HYPERLEDA

1.1 Важность астрофизических баз данных

Измерение расстояний уже давно стало одной из ключевых задач астрономии. Важными этапами развития этого направления стали измерения расстояния до Луны Гиппарха (около 150 г. до н.э), и определение расстояний по цефеидам в наши дни, что помогло раскрыть истинную природу галактик [9]. Хотя обнаружение связи между расстоянием и лучевой скоростью галактик [10] и легло в основу парадигмы расширяющейся Вселенной, а также дало возможность ввести “простой” способ оценки внегалактических расстояний, независимые от красного смещения определения расстояний по-прежнему чрезвычайно важны. Например, отклонение лучевых скоростей от закона Хаббла предоставляет нам информацию о космических потоках [11] и пространственном распределении галактик ([12], [13]). Знание шкалы расстояний также дает возможность установить величину постоянной Хаббла, H_0 , и играет ключевую роль для ограничения космологических параметров. Использование далеких сверхновых в качестве стандартных свечей позволило обнаружить ускорение расширения Вселенной ([14], [15]). На базе этих наблюдений вместе с другими современными исследованиями сформировалась современная стандартная космологическая модель, где наша Вселенная является, в основном, “темной”. Она состоит из около 73% темной энергии, 22% темной материи, и только ~ 5% остается на долю барионной материи [16].

Разработано много методов для измерения расстояний до галактик. Наиболее точные из них, например, Цефеиды, как правило, дороги в наблюдательном плане и ограничены ближней Вселенной. Для больших расстояний основная масса оценок расстояний до галактик получается на основе масштабных соотношений, например, хорошо известного соотношения Галли-Фишера.

Поскольку на данный момент ни один из методов не может одинаково точно работать на любых масштабах, построение общей шкалы расстояний производится шаг за шагом, от близлежащих к удаленным объектам. В ходе этого процесса, каждый индикатор расстояния калибруется по отношению к тем, которые доступны на более близких масштабах. Поэтому для этих целей необходимо иметь базу точных измерений, которые могут быть приведены к общей шкале для использования в качестве стандартов.

Целью настоящей работы является описание каталога расстояний до галактик на базе данных каталога HYPERLEDA. В нем собраны данные по расстояниям, опубликованные в литературе, и предоставляются точные описания этих измерений.

Помимо каталожных величин, HYPERLEDA содержит литературные данные по фотометрии, ширинам линии H α , сведения о внутренней звездной кинематике и других характеристиках. Все эти данные были собраны вместе и исправлены с учетом систематических эффектов, чтобы обеспечить гомогенизированное описание параметров галактик. В частности, расстояния до галактик, определенные с помощью данного каталога, были дополнены с привлечением других индикаторов расстояния (соотношения Талли-Фишера и Фабера-Джексона, построение Фундаментальной плоскости).

HYPERLEDA (в том числе каталог расстояний) также используется в других проектах. Один из них является Catalogue of the Local Volume galaxies [17-18], который предоставляет расстояния, скорости и физические характеристики для галактик в пределах 11 Мпк (в настоящее время 869 галактик). Каталог LVG является результатом детального и тщательного анализа данных, собранных из различных баз данных и литературы. Артефакты, Галактические объекты и сомнительные измерения идентифицируются и отбрасываются. Это позволяет говорить об LVG как о гораздо большем, чем просто подвыборке объектов из базы данных. Текущие усилия позволили LVG стать самой полной выборкой близких галактик, для которых есть наиболее точные данные.

Еще один проект с использованием данного каталог, The Extragalactic Distance Database (EDD, [3]), предназначен для сбора информации, связанной с определением расстояний в пределах 100-200 Мпк. Он сочетает в себе оригинальные наблюдения с опубликованными литературными данными. На его базе путем единого анализа ширины линий H α [8] и фотометрии [19] было построено соотношение Талли-Фишера. Калибровка нуль-пункта была выполнена на основе первоначального определения расстояний с помощью диаграмм цвет-величина для соседних галактик по наблюдениям космического телескопа Хаббл [20]. Подборка калибровок для близких галактик дополняется настоящим каталогом.

NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) поддерживает онлайн компиляцию независимых от красного смещения внегалактических расстояний из литературы (NED-D). Эта база данных включает в себя огромный набор опубликованных измерений на основе основных методов определения расстояний, таких как цефеиды и сверхновые типа Ia (SNIa), а также второстепенных показателей, таких как соотношение Талли-Фишера или соотношения, относящиеся к Фундаментальной плоскости. Настоящая база данных ориентирована на ближайшие галактики, чтобы обеспечить лучшие стандарты для калибровки индикаторов расстояния.

1.2 Общие характеристики базы данных HYPERLEDA

HYPERLEDA [21-22] берет свое начало от Lyon-Meudon Extragalactic database [23], которая была создана в 1983 году, и от Hypercat, который создавался как наблюдательный каталог по кинематике галактик ранних типов [24]. Эти базы данных были объединены в 2000 году. Исторически база данных LEDA была использована для подготовки Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC3, [25]). Теперь HYPERLEDA развивается при поддержке Обсерватории Лиона (Франция) и Специальной астрофизической обсерватории (Россия).

Основные подкаталоги HYPERLEDA:

- **Астрометрия и названия:** Эти каталоги содержат 8177892 небесные позиции и 6878482 названия для 3730169 объектов.
- **Газовая кинематика:** Этот набор данных по HI берет свое начало из базы данных LEDA [22]. В настоящее время каталог включает 113 086 измерений ширины линии HI или максимум кривой вращения для 37377 галактик. Вместе с данными по фотометрии этот набор используется для определения расстояний до спиральных галактик с помощью соотношения Талли-Фишера [26].
- **Членство в группе:** HYPERLEDA также индексирует кратные системы, в том числе пары, тройки, группы и скопления. Каталог собирает информацию о группах и членах групп из литературы.
- **Индексы линии Mg₂:** Каталог опубликованных индексов линий поглощения Mg₂ для галактик и шаровых скоплений [27] в настоящее время содержит 9883 измерений для 3271 объектов.
- **Морфология:** Каталог собирает числовые индексы RC3, t, по шкале de Vaucouleur [25], которые в сочетании с информацией о присутствии бара, кольца, кратности или взаимодействия позволяют построить стандартную морфологическую классификацию. На данный момент, HYPERLEDA предоставляет 232305 морфологических индексов для 112572 объектов.
- **Природа:** Хотя HYPERLEDA и позиционируется как база данных по внегалактическим объектам, остается невозможным ограничить ее только галактиками. Часто физическая природа объекта неизвестна на момент открытия.
- **Классификация активности ядра:** Этот каталог собирает информацию об обнаружении признаков активности в центрах галактик (активные галактические ядра, AGN или

звздообразование) для 88421 объектов [28]. В частности, он содержит Veron catalogue of quasars и AGN6 [29].

- **Фотометрия:** В каталоге представлены данные о потоках для 3605940 объектов из литературы и обзоров. Чаще всего это оптические, ближние инфракрасные и HI-величины.

- **Красное смещение:** Каталог содержит 2387020 величин красных смещений в гелиоцентрической системе покоя для 1296804 объектов. Данные представлены в единицах км/с, как cz , где z - красное смещение и $c = 299792.458$ км/с - скорость света.

- **Размеры и позиционные углы:** Эти каталоги объединяют информацию о линейных размерах объектов, а также о позиционных углах большой оси, рассчитанных с севера к востоку. Данные собраны для различных фильтров, изофот и методов измерений. Каталог включает в себя измерения 11016356 диаметров для 3009469 объектов. Позиционный угол известен для 2763881 объектов. Пересчет велся в стандартную систему, что соответствует размеру при 25 зв.вел./угл.сек² в В-изофоте [30-31].

- **Кинематика галактик:** Это библиографический каталог, который собирает информацию о 15197 публикациях по наблюдениям кривых вращения для 3860 галактик [32].

- **Звездная кинематика:** На данный момент, каталог, представленный Prugniel&Simien [24], содержит 23797 наблюдений центральной дисперсии скоростей для 16927 объектов и 1668 измерений скорости вращения звездных дисков для 832 галактик ранних типов.

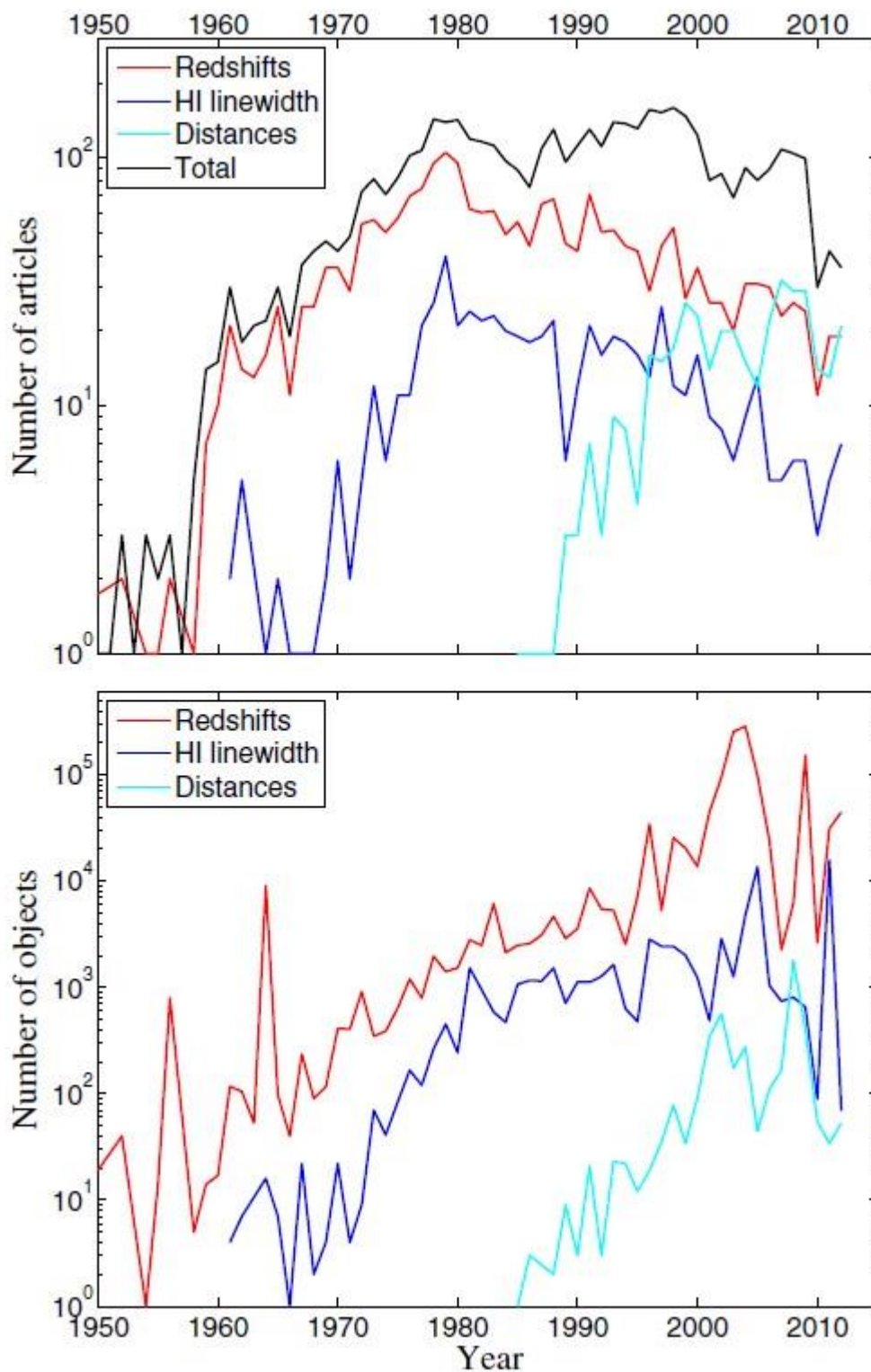


Рис. 1.1. Годовая статистика приема и обработки данных в HYPERLEDA. На верхней панели показано количество обработанных статей в год. Черная линия соответствует всей базе данных, в то время как отдельные каталоги показаны разными цветами: каталог красных смещений красного цвета, ширина линии HI - синяя, а каталог расстояний - голубой. На нижней панели показано количество отдельных объектов, обработанных в конкретном году.

Рис. 1.1 иллюстрирует статистику изменений от года к году количества пополняемых и обрабатываемых данных в HYPERLEDA. На верхней панели отображается

количество использованных статей в зависимости от года издания для всей базы данных и для некоторых из подкаталогов, а именно красного смещения, газовой кинематики и расстояний, что является объектом настоящей работы. Нижняя панель показывает количество объектов, для которых данные добавляются.

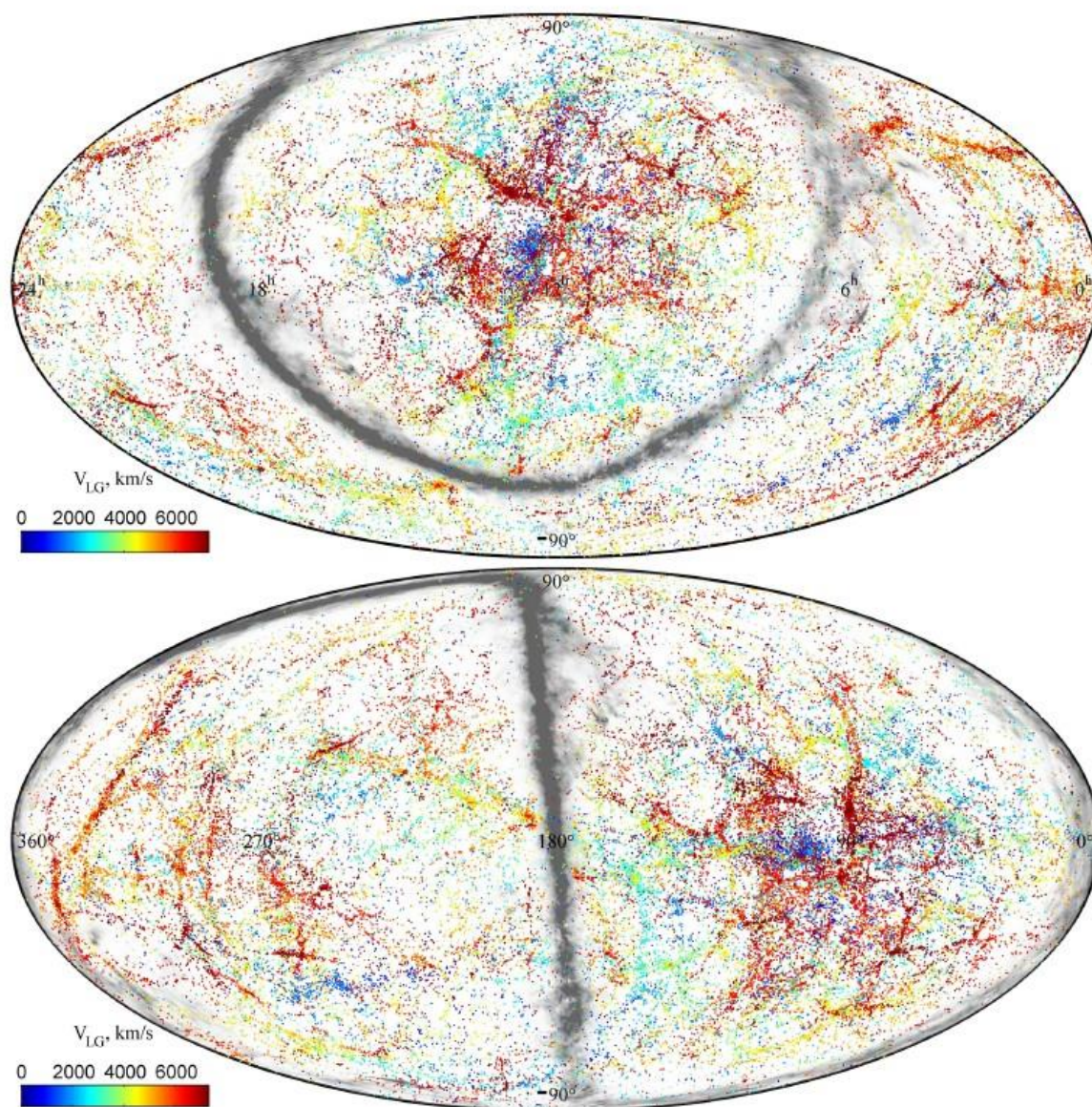


Рис. 1.2. Распределение на небе около 60 000 галактик в пределах 100 Мпк от HYPERLEDA в экваториальных (верхняя панель) и сверхгалактических (нижняя панель) координатах. Красные смещения галактик окрашены в синий цвет для близких объектов и в коричневый для отдаленных. Зона Млечного Пути показана серыми областями. Самые темные области соответствуют наибольшему поглощению.

Рис. 1.2 иллюстрирует распределение на небе галактик с известными величинами красного смещения вплоть до $V_{LG} < 7300$ км/с, что соответствует расстоянию около 100 Мпк. V_{LG} обозначает радиальную скорость по отношению к центру масс Местной группы,

как это определено в электронной документации HYPERLEDA. Цвет символов указывает красное смещение. Карта иллюстрирует известную волокнистую структуру распределения галактик, которая имеет и области с массивными скоплениями, и регионы низкой плотности. Следует отметить, что, несмотря на современные обзоры, наблюдается огромная неполнота данных в зоне избегания на низких Галактических широтах, которая показана в виде клочковатой серой области на Рис. 1.2. Следы различных обзоров галактик не очень заметны, что подтверждает, что в ближней Вселенной охват неба обзорами для различных красных смещений является достаточно однородным (т.е. полнота примерно одинакова в любом направлении за исключением плоскости Галактики). В противоположность этому, на расстояниях больше 100 Мпк, покрытие неба не является однородным, потому что некоторые области изучаются более глубоко, чем другие. В частности, каталог значительно более полон в регионе Sloan Digital Sky Survey [33], чем в остальной части неба. Несмотря на это, общие структуры, такие как стены, нити, скопления и пустоты все еще видны, но при статистическом использовании базы данных следует учитывать эти особенности.

1.3 Шкалы расстояний

На сегодняшний день предложено много методов определения внегалактических расстояний. Они различаются как по классу используемых объектов (например, Цефеиды), так и по физике процессов (например, период-светимость). Соответствующая информация кодируется в поле “method” таблицы измерений. Ниже приводится краткое описание этих методов.

Мы делим список на три части: (I) *методы прямого определения расстояния*, (II) *применение звездных объектов в качестве стандартной линейки или стандартной свечи*, и (III) *методы, базирующиеся на масштабных соотношениях для галактик*. Прямые методы определения расстояний получают непосредственно из измеренных данных и не зависят от внешних калибровок. Они являются основой для построения космической шкалы расстояний. Наиболее важные оценки расстояния используют тригонометрические параллаксы отдельных звезд. Методы статистических параллаксов и параллаксов движущихся скоплений помогают определить расстояния до групп звезд. Это очень полезно для калибровки методов, основанных на светимости Цефеид и RR Лиры. К сожалению, эти методы, как правило, ограничиваются нашей Галактикой или ее ближайшими спутниками. Заметным исключением является NGC4258, чье точное расстояние по “мазеру” 7.6 Мпк является крайне ценным для калибровки других методов.

1.3.1 Структура каталога

Каталог расстояний в настоящее время состоит из двух основных таблиц: таблицы измерений и таблицы калибровок. Таблица измерений хранит опубликованные определения расстояний в виде данных из всех источников, объединенных в одной таблице. Поля таблицы выбираются таким образом, чтобы хранить опубликованные значения как можно более полно с минимальными изменениями и чтобы по ним было легко перейти к оригинальной работе. В таблице калибровки содержится вспомогательная информация, в виде ссылки на калибровку (нуль-пункт) серии измерений.

В дополнение к этим таблицам, мы используем библиографический справочный каталог HYPERLEDA. Это является общим для всех каталогов HYPERLEDA. Каждой статье в библиографической таблице, насколько это возможно, присваивается ее стандартный код, который обычно называют *bibcode*, что позволяет установить связь с другими базами данных, в частности, SAO/NASA Astrophysical Data System (ADS), где доступен полный текст оригинальной публикации.

1.3.2 Таблица измерений

- **pgc** – это номер галактики в Principal Galaxy Catalog, исторически введенный Paturel et al. [34]. Каждый объект имеет уникальный номер, используемый для связывания данных из различных каталогов, и, в частности, для различных обозначений внутри каталога.
- **modulus**, **e modulus** содержат опубликованные модули расстояний и их погрешности измерения. Также эти величины известны, как “истинный модуль расстояния”, $(m - M)_0$, который исправлен за эффекты поглощения. Веб-интерфейс также показывает расстояние в линейном масштабе в единицах Мпк.
- **quality** описывает качество данных. Он разделен на две части. Первое — это набор данных, связанных с флагами качества: ‘uncertain’ (:), ‘pre-liminary’ (p), ‘low-limit’ (>), or ‘compilation’ (c). Они основаны на информации, предоставленной авторами. ‘uncertain’ флаг уменьшает вес измерения в два раза во время процедуры гомогенизации. Другие флаги указывают, что данные не должны использоваться в процедуре усреднения, если доступны “хорошие” измерения. Код ‘reject’ (!) описывает наше (HYPERLEDA) знание о надежности данных и отбрасывает ошибочные измерения из процедуры гомогенизации .
- **iref** содержит внутренний код публикаций. Он указывает на общую библиографическую таблицу HYPERLEDA, которая связывает *iref* с ADS/CDS *bibcode*, когда они существуют, а также с кратким описанием статьи, в том числе дает информацию о первом авторе и годе издания.
- **method** представляет собой поле, описывающее способ определения расстояния.

- **calib** относится к калибровке нуля-пункта, используемого для измерения расстояния. Это внутренняя идентификация различных источников, хранящихся в таблице калибровок.

1.3.3 Таблица калибровок

Поле **calib** связывает измерения с калибровочной таблицей. Эта таблица содержит следующие поля:

- **calib** является внутренним кодом, используемым для идентификации конкретной калибровки расстояния.
- **iref** является внутренним библиографическим кодом публикации, где представлена калибровка.
- **zpinfo** содержит описание нуля-пункта шкалы расстояний. Например, H_0 соответствует значению постоянной Хаббла; отдельные имена галактики, например, LMC и NGC224, используются для принятого модуля расстояния и так далее.
- **note** – различные замечания, полезные для понимания данной калибровки.

1.3.4 Методы прямого определения расстояния

- **DEB**: The Detached Eclipsing Binaries (DEB) обеспечивает точный геометрический метод для определения расстояний. Основные параметры звезд (радиусы, эффективные температуры, массы и светимости) могут быть определены из лучевой и радиальной скоростей по кривым блеска затменно-двойных звезд. Этот метод не зависит от каких-либо промежуточных шагов калибровки.
- **EPM**, **ESM**: The Expanding Photosphere Method (EPM) и the Expanding Shock front Method (ESM) являются способом определить геометрическое расстояние на основе сравнения лучевых скоростей со скоростью собственного движения расширяющейся оболочки после взрыва сверхновой.
- **Maser**: Метод основан на изучении кинематики аккреционного диска вокруг сверхмассивной черной дыры с помощью радиоизлучения мазера. Это дает прямую геометрическую оценку абсолютного расстояния. Humphreys et al. [35] измерили расстояние 7.6 Мпк с 3% неточностью до сейферт-II галактики NGC4258 на основе десятилетних наблюдений мазера H_2O .

1.3.5 Применение звездных объектов в качестве стандартной линейки или стандартной свечи

Широкий ряд методов использует отдельные объекты или звездные населения в галактиках для определения расстояний. Этот класс содержит некоторые из самых точных и важных индикаторов расстояния для внегалактической астрономии: Цефеиды и

переменные RR Lyrae, звезды вершины ветви красных гигантов (Tip of the Red Giant Branch, TRGB) и горизонтальной ветви (HB). Эти индикаторы расстояния могут быть откалиброваны с помощью прямых методов, описанных выше. Кроме SNIa, все эти методы эффективны только для ближней Вселенной на масштабах до нескольких десятков Мпк.

- **BBSLF, BRSLF, BS, BS3B, BS3R**: Все эти методы используют светимость самых ярких звезд в галактиках, как стандартных свечей. BBSLF и BRSLF рассматривают функцию светимости ярчайших, синих и красных, соответственно, звезд. Их светимость коррелирует со звездной величиной родительской галактики [36].

- **Cepheids (Цефеиды)**: это одни из самых важных стандартных свечей. Метод основан на зависимости период – светимость (PL) для Цефеид (переменных звезд). Есть много калибровок этого соотношения в различных полосах на базе измерений соотношения период-светимость в Галактике или Большом Магеллановом Облаке (БМО). Например, подобные измерения были проведены в проекте Hubble Space Telescope Key Project On the Extragalactic Distance Scale [37], тригонометрических параллаксах HIPPARCOS [38] или методе Бааде-Весселинка [39]. Предполагается, что калибровка будет значительно улучшаться в ближайшие годы благодаря астрометрическому спутнику GAIA.

- **CMD**: Метод использует различные особенности диаграммы цвет-величина (CMD) для галактики, которую можно разложить на отдельные звезды, чтобы оценить расстояние по сравнению с шаблонной CMD или с теоретическими изохронами. Dolphin [40] разработал программное обеспечение, которое сопоставляет наблюдаемую CMD с модельными данными, чтобы оценить одновременно расстояние и историю звездообразования в галактике.

- **CS**: богатые углеродом звезды (CS) в фазе TP-AGB образуют горизонтальный красный “хвост” на CMD, примерно на 0.5 величины ярче TRGB. Battinelli & Demers [41] нашли связь абсолютной I-величины CS и металличности родительской галактики:

$$\langle M_I \rangle = -4.33 + 0.28[Fe/H].$$

- **FGLR**: The Flux-weighted Gravity-Luminosity Relationshi (FGLR) представляет собой метод получения расстояния по спектральному анализу В и А сверхгигантов [42]. Существует тесная связь абсолютной болометрической величины и параметра g/T_{eff}^4 .

- **GCLF**: The old globular cluster luminosity function метод (GCLF) использует пик (или точку поворота) GCLF как стандартную свечу. Это соответствует $M_{V,TO} = -7.66 \pm 0.09$, с принятым для LMC модулем расстояния 18.50 зв.вел. [43].

- **GCR**: The median of the Globular Cluster half-light Radii (GCR) 2.7 ± 0.3 пк [44] может быть использован в качестве стандартной линейки для оценки расстояния. Half-light радиус

отдельного шарового скопления должен быть исправлен с учетом цвета, поверхностной яркости и цвета родительской галактики.

- **HB**, **BHB**: Эти методы используют звезды горизонтальной ветви (HB) или голубой горизонтальной ветви (BHB) как стандартные свечи. Carretta et al. [45] дают связь между абсолютной величиной и металличностью HB:

$$M_V(HB) = (0.13 \pm 0.09)([Fe/H] + 1.5) + (0.54 \pm 0.07).$$

- **MS**: Этот метод соотносит позицию Главной последовательности ниже ее окончания с теоретическими изохронами или с шаблонной CMD. Это относится к способам определения расстояний по CMD.

- **Miras**: звезды Мира Кита – это переменные звезды с большим периодом в фазе асимптотической ветви гигантов. Ita & Matsunaga [46], в частности, определили соотношение период-звездная величина для Мира-подобных переменных в БМО, используя болометрическую, ближне- и средне- ИК величины.

- **PNLF**: Этот метод использует резкое экспоненциальное усечение функции светимости планетарных туманностей (PNLF) в качестве стандартной свечи. Выбор нуль-пункта, $M_* = -4.48$, основан на расстоянии до M31 710 кпк [47].

- **RC**: The Red Clump (RC) населен звездами промежуточного возраста, у которых в ядре происходит горение гелия. Их средняя абсолютная величина используется как стандартная свеча для определения расстояний. Для них существуют важные нелинейные зависимости, как от возраста, так и металличности звездного населения [48].

- **RRLyrae**: Метод основан на средней абсолютной величине переменных звезд типа RR Лир, которая зависит от металличности [45]:

$$M_V(HB) = (0.18 \pm 0.09)([Fe/H] + 1.5) + (0.57 \pm 0.07).$$

- **RSV**: Этот метод использует соотношение период-светимость для переменных красных звезд-сверхгигантов (RSV). Калибровку соотношения период-светимость дают Pierce et al. [49], принимая модуль расстояния БМО 18.50 зв.вел. RSVs, также как Miras являются переменными звездами с большим периодом.

- **SBF**: The Surface Brightness Fluctuations (SBF) опирается на колебания светимости, которые возникают из статистики подсчета звезд, дающих вклад в поток в каждом пикселе изображения [50]. Флуктуация абсолютной величины зависит от звездного населения и, следовательно, от цвета галактики. Метод может быть применен только к старым звездным населением.

- **SNIa**: Из-за их чрезвычайно высокой светимости и регулярного поведения сверхновые типа Ia (SNIa) являются высокоточным инструментом для измерения космологических

расстояний. Метод использует зависимость между формой кривой блеска и максимальной светимостью SNIa.

- **TRGB**: Верхушка ветви красных гигантов (TRGB) является отличным индикатором расстояния до близких галактик, разрешаемых на отдельные звезды. Метод опирается на наблюдение старого звездного населения и может быть использован для галактик любых морфологических типов. Благодаря малой зависимости цвета TRGB от звездной величины в I-диапазоне, метод является одним из наиболее точных индикаторов расстояния. Rizzi et al. [51] произвели калибровку нуля-пункта TRGB-метода с использованием HB звезд: $M_I^{JC} = -4.05(\pm 0.02) + 0.22(\pm 0.01) [(V - I) - 1.6]$.

1.3.6 Методы, основывающиеся на масштабных соотношениях для галактик

Методы, основанные на масштабных соотношениях, являются эмпирическими соотношениями между внутренней светимостью галактики и ее свойствами, такими как кинематика и поверхностная яркость. Наиболее важными из них являются соотношение Талли-Фишера (TF) для спиральных галактик и фундаментальная плоскость (FP) для галактик ранних типов. Поскольку методы используют полную светимость галактики в качестве стандартной свечи, они могут быть применены на масштабах до сотен Мпк. Эти методы дают низкие точности для отдельных измерений, но они позволяют получить хорошие результаты в статистическом смысле с огромными наборами данных. В особенности это верно для соотношения Талли-Фишера, где получение наблюдательных данных относительно недорого. Методы TF и FP позволяют исследовать космические потоки во Вселенной на масштабах сотен Мпк [52]:

- **FJ**: соотношение Фабера-Джексона (FB) является стандартной свечой для эллиптических галактик и галактик ранних типов, основываясь на отношениях между абсолютной величиной и центральной дисперсией скоростей.

- **FP**: Фундаментальная плоскость (FP) является методом определения расстояния для галактик ранних типов, основанным на связи между абсолютной величиной, эффективным радиусом, дисперсией скоростей, и средней поверхностной яркостью.

$$\log D = \log r_e - 1.24 \log \sigma + 0.82 \log \langle I \rangle_e + 0.173 [53].$$

- **SB-M, Sersic-M**: Методы, использующие связь между поверхностной яркостью и полной звездной величиной (SB-M) или индекс Серсика-полная звездная величина (Sersic-M), можно рассматривать как грубую оценку расстояния до малых эллиптических галактик.

- **Sosie**: Метод “подобия” (sosie на французском языке) предложен Paturel [54]. Он основан на идее, что галактики с тем же морфологическим типом, тем же наклоном и той же

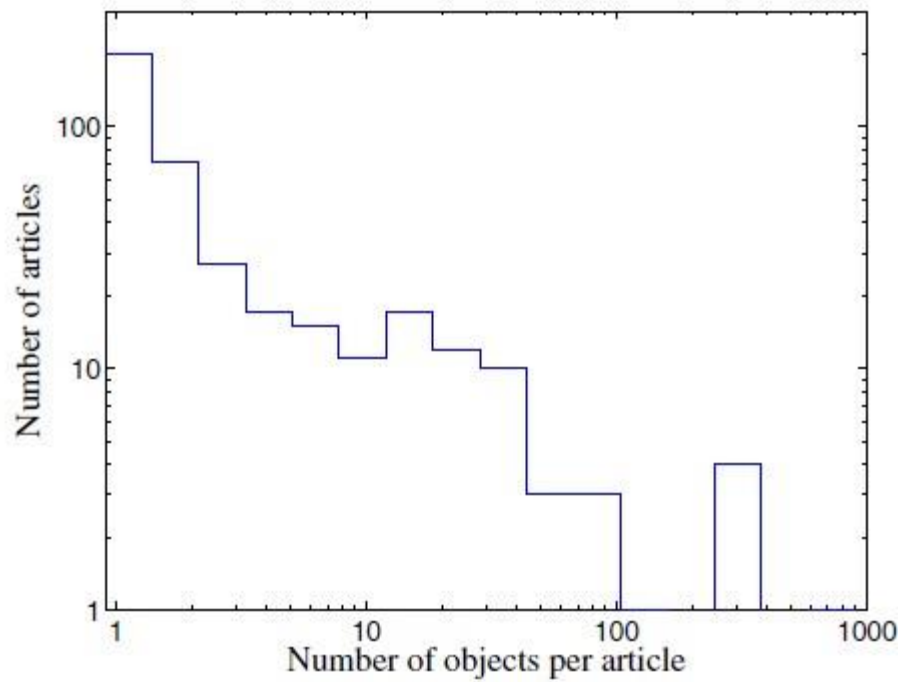
шириной линии HI должны иметь такую же абсолютную светимость в соответствии с соотношением TF.

- **TF, VTF**: The Tully-Fisher (TF) является стандартной свечой на основе эмпирической зависимости между абсолютной величиной спиральной галактики и ее максимальной скоростью вращения и оценивается с помощью ширины линии HI. Недавние калибровки TF в I-фильтре [55] дали соотношение $M_I^{b,i,k} = -21.39 - 8.81(\log W_{mx}^i - 2.5)$.

Барионное соотношение Талли-Фишера (VTF) использует связь между амплитудой вращения и барионной массой галактики. Эта зависимость учитывает не только звездную светимость по оптическим данным, как в оригинальном TF, но и массу нейтрального и молекулярного газа. VTF соотношение сравнимо с TF для гигантских спиральных галактик, и оно удобно для карликовых галактик с круговыми скоростями ниже 90 км/с [56], где холодный газ играет большую роль в динамике. VTF также может быть применен для богатых газом карликовых эллиптических галактик [57].

1.3.7 Содержание каталога расстояний

Каталог расстояний в настоящее время содержит 6640 измерений расстояния для 2335 галактик, собранных из 430 статей. Мы уделяем особое внимание объектам Местного объема, $D < 10$ Мпк, потому что подавляющее большинство высокоточно измеренных расстояний относятся к этим галактикам. Например, на данный момент, мы собрали 2594 модулей расстояния для 492 объектов в этой локальной части Вселенной, в частности, 1338 оценок для 347 галактик, основанных на методе TRGB.



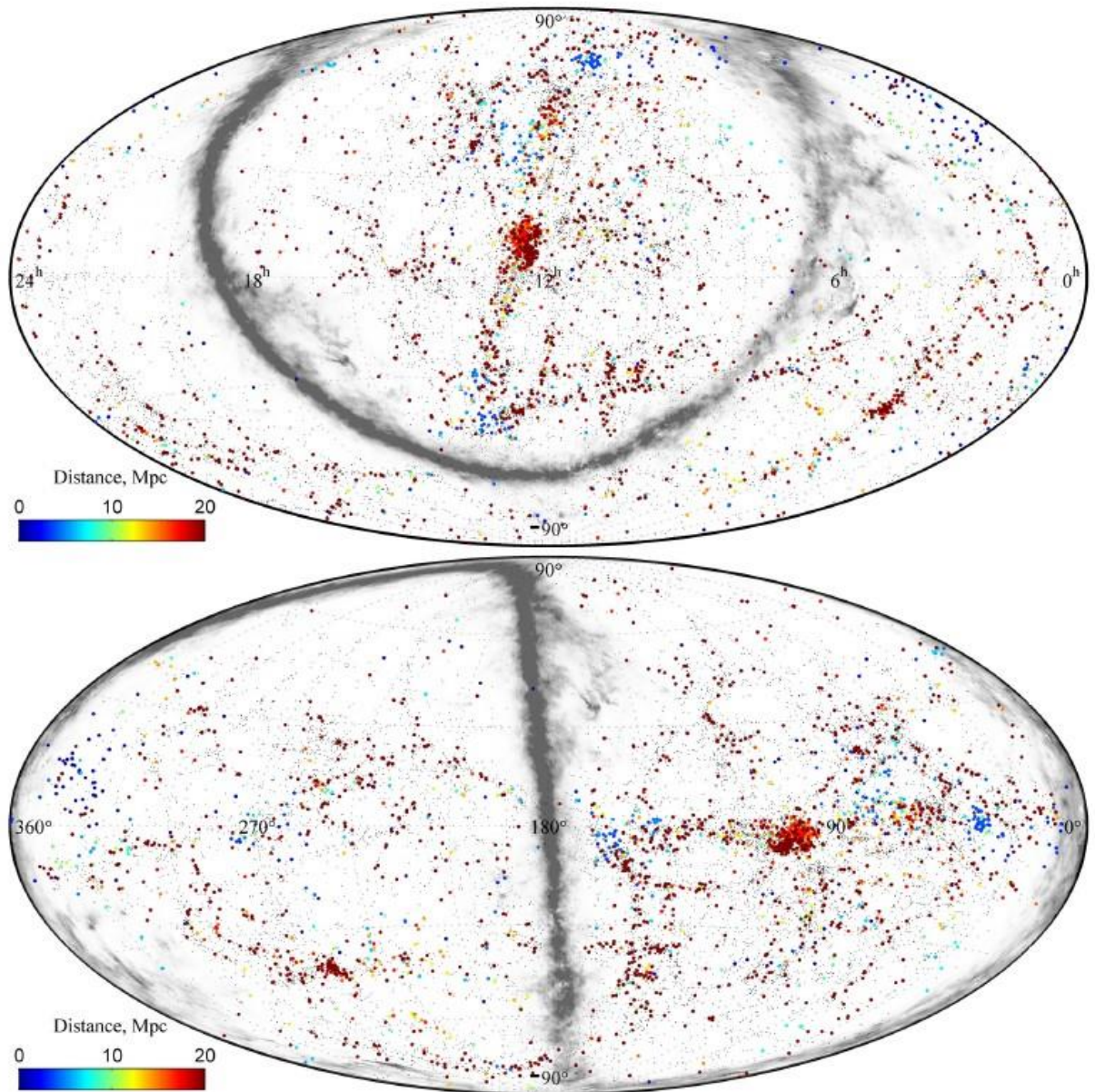


Рис. 1.4. Распределение на небе галактик с известной независимой от красного смещения оценкой расстояния в экваториальных (верхняя панель) и в сверхгалактических (нижняя панель) координатах. Расстояние показано цветом от близких галактик (синие точки) до далеких (коричневые). Маленькие черные точки представляют собой распределение галактик в масштабе 50 Мпк. Зона высокого поглощения в Млечном пути обозначена серым цветом.

Распределение по небу галактик с известными и не зависящими от красного смещения расстояниями показано на Рис. 1.4. Серая клочковатая лента отмечает области сильного поглощения в Галактике (зона избегания). Цвет точек обозначает расстояние до галактик: от синего для близлежащих объектов до коричневого для далёких. Галактики дальше, чем 20 Мпк, показаны в виде коричневых заполненных кругов. Маленькие черные точки представляют все галактики с $V_{LG} < 3500$ км/с (то есть в пределах 50 Мпк), примерно охватывая местное сверхскопление, чье основное скопление в Деве, лежит недалеко от центра верхней панели карты (примерно $RA=12.^h 5$, $Dec=12^\circ$).

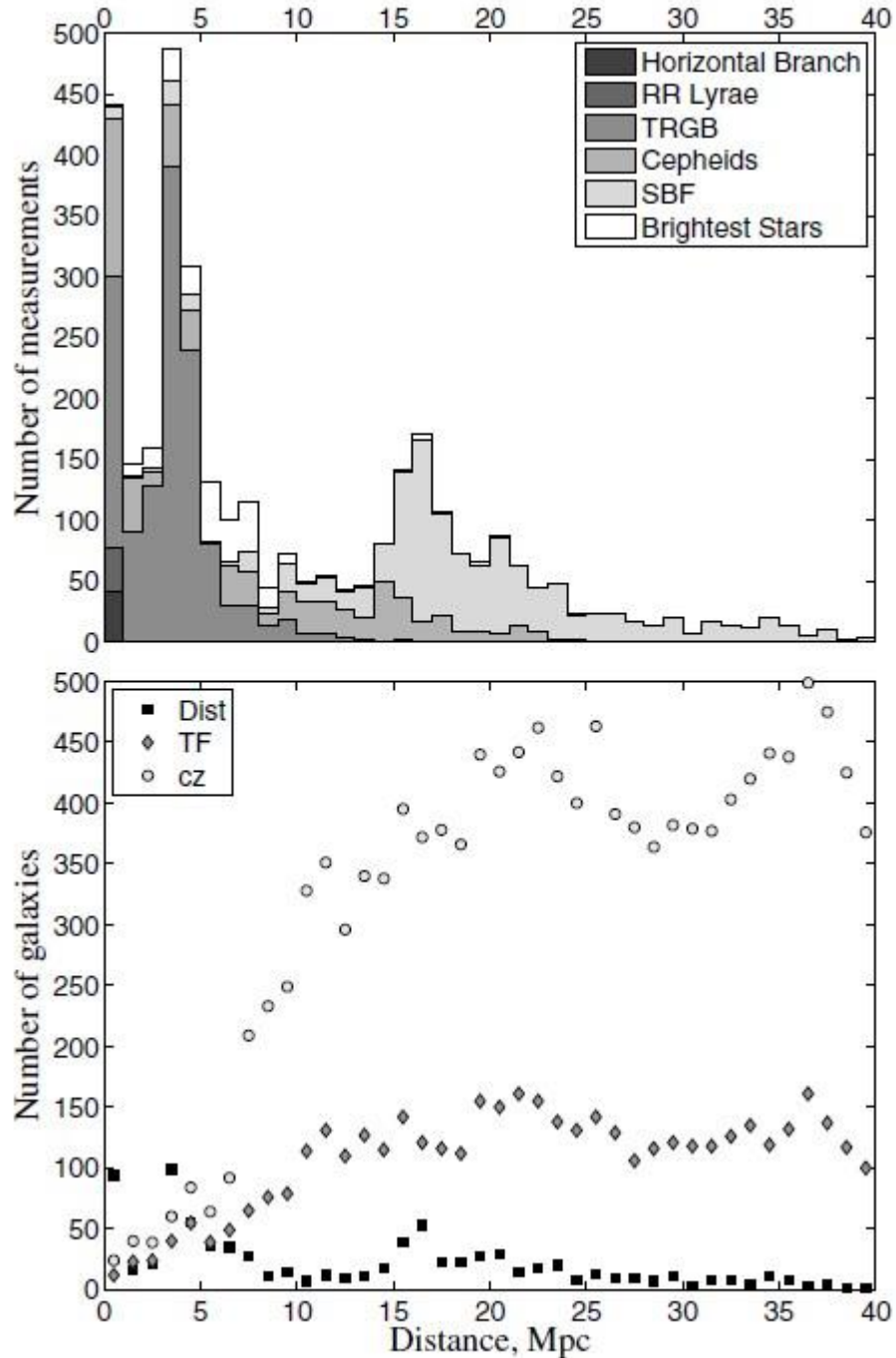


Рис. 1.5. Верхняя панель: распределение индивидуальных оценок расстояния на общей шкале расстояний. Для построения гистограммы учитывались только пять наиболее важных методов, а именно: горизонтальная ветвь, RR Lyrae, конец ветви красных гигантов (TRGB), Цефеиды, флуктуации поверхностной яркости (SBF) и самые яркие звезды, в то время как огибающая показывает общее количество измерений в каждом 1 Мпк, разные серые тона различают вклад каждого метода. Нижняя панель: распределение отдельных галактик. Черные квадраты соответствуют объектам с известной независимой от красного смещения оценкой расстояния (Dist), исключая масштабные соотношения. Распределение галактик с данными Талли-Фишера (TF) показано серыми ромбиками, а галактики с известным красным смещением cz иллюстрируются открытыми кругами. TF вычисляется с использованием HI и фотометрических параметров HYPERLEDA, а красное смещение преобразуется в расстояние по закону Хаббла.

Рис. 1.5 иллюстрирует распределение отдельных измерений различными методами в зависимости от расстояния. Разные оттенки серого в верхней панели выделяют вклад наиболее значимых способов, а именно горизонтальной ветви (HB), RR Лиры (RRLyr), конец ветви красных гигантов (TRGB), Цефеиды (Ceph), флуктуации поверхностной яркости (SBF) и ярчайшие звезды (BS). Первый пик, до 1 Мпк, соответствует галактикам Местной группы. Вторым всплеском, около 4-5 Мпк, отражает систематическое изучение Местного объема, особенно командой И.Д. Караченцева [18]. Третий максимум, 16-17 Мпк, имеет физическое происхождение. Это центр скопления Девы. На рисунке показано, как распространенность различных индикаторов меняется с расстоянием. HB и RR Лиры можно использовать только внутри Местной группы, до 1 Мпк. Конец RGB намного ярче, $M_I = -4$, и метод обычно используется до 10 Мпк, с расширением до 20 Мпк в некоторых случаях. Использование Цефеид гораздо дороже с точки зрения наблюдательного времени, потому что требует время на серийные наблюдения. Это объясняет относительно небольшое количество измерений, хотя это и один из самых точных методов. В настоящее время Цефеиды позволяют нам с уверенностью получить расстояние до 20 Мпк. Метод SBF не так точен, как предыдущие, но дисперсия около 0.15 зв.вел. в модулях расстояния может быть достигнута на масштабах вплоть до 40-50 Мпк. Метод ярчайших звезд не может рассматриваться в качестве точного, но во многих случаях это единственный способ оценить расстояния до галактик на шкале от 5 до 10 Мпк.

Далее, методы, основанные на соотношении TF, являются наиболее эффективными. Последние калибровки дали разброс около 0.34-0.38 величины в различных фильтрах [58]. HYPERLEDA содержит ширины линий HI примерно для 37000 галактик. Принимая во внимание наличие фотометрии и ограничения угла наклона более 45° , это позволяет оценить расстояние по TF примерно до 19000 галактик на масштабах в нескольких сотен Мпк. Распределение галактик, для которых имеются данные для оценки расстояний по TF, показано на нижней панели Рис. 1.5 серыми ромбами для сравнения. Аналогичное распределение галактик с известными красными смещениями показано кружками. Это означает, что на больших масштабах оценка расстояния по TF возможна только для трети известных галактик. Кроме того, объекты с точными измерениями расстояний показаны черными квадратами. Становится ясным, что наши знания о шкалах расстояний, более или менее, полны только в местном объеме на шкале до 5-7 Мпк.

1.3.8. Гомогенизация расстояний

Измерения, собранные в этом каталоге, образуют неоднородный набор данных, в котором каждая отдельная публикация использует отдельную шкалу расстояний и

подвержена влиянию ее собственной систематики. Что касается других характеристик галактик, HYPERLEDA стремится компенсировать эти расхождения. Гомогенизация в HYPERLEDA пытается максимально уменьшить эти эффекты.

Стратегия, принятая в настоящей версии каталога, такова: во-первых, мы определяем набор калибраторов, который определяет нашу шкалу расстояний. Затем мы применяем корректировку нуля-пункта для учета сдвига между данной калибровочной системой и нашей принятой шкалой расстояний.

Эти различные шаги описаны ниже.

1) Стандарты расстояний

Цель работы состоит в том, чтобы определить набор галактик с точными измерениями расстояний, которые можно использовать для калибровки других систем. Это определит нашу собственную шкалу расстояний.

Самая последняя и широко принятая шкала расстояний основана на измерениях Цефеид в 31 галактике, о которых сообщается в проекте HST [37]. Качество данных по-прежнему не превзойдено, но малый размер выборки ограничивает ее использование для калибровки других методов и наборов данных. Чтобы обойти это ограничение, мы можем рассмотреть вопрос о создании нашего калибровочного набора по каталогу “CMDs/TRGB” [20] из EDD, охватывающего крайне однородные измерения для 305 галактик с использованием метода максимального правдоподобия по TRGB, разработанного Макаровым и др. [59] и нуля-пункта TRGB по [51].

Таблица 1.1 дает общее представление о внутренней точности отдельных методов. Расстояния по TRGB и Цефеидам имеют точность около 0.1 зв.вел. Методы SBF и PNLF точны до 0.2 зв.вел. Наконец, самые яркие звезды имеют точность только около 0.6 зв.вел. Поэтому этот метод полезен только тогда, когда нет других доступных измерений.

Хотя метод TRGB имеет очень низкую внутреннюю дисперсию (0.06 зв.вел.), различные наборы измерений не полностью независимы, поскольку они часто основаны на одних и тех же исходных изображениях и отличаются только некоторыми аспектами анализа и калибровки. Низкая дисперсия указывает на то, что фотометрические ошибки, вероятно, превышают систематику, связанную с различными методами определения расстояний по методу вершины ветви красных гигантов.

Таблица 1.1. Сравнение различных методов определения расстояния с TRGB-методом на базе данных EDD.

Выборка	N	$\langle \mu - \mu_{EDD} \rangle$	σ	Примечания
TRGB				
Rizzi et al. [51], исключая EDD	83	-0.016 ± 0.008	0.060	[51]
Makarov et al. [60]	26	-0.022 ± 0.005	0.025	[51]
Radburn-Smith et al. [61]	13	-0.021 ± 0.024	0.086	[51]
Dalcatlon et al. [62]	87	-0.064 ± 0.008	0.062	Изохроны Padova
$M_I(TRGB) = -4.05$	181	-0.027 ± 0.006	0.062	
Lee et al. [63]	30	-0.073 ± 0.021	0.114	
Цефеиды				
Saha et al. [64]	15	-0.013 ± 0.048	0.157	
Fouqué et al. [65]	7	$+0.002 \pm 0.041$	0.103	
Kanbur et al. [66]	8	$+0.003 \pm 0.062$	0.197	
Tammann et al. [67]	7	$+0.063 \pm 0.047$	0.110	
Freedman et al. [37]	13	-0.065 ± 0.030	0.100	
Freedman et al. [37]	14	-0.016 ± 0.034	0.143	Корректировка за металличность
Lanoix et al. [68]	16	-0.029 ± 0.044	0.147	
Udalski et al. [69]	8	$+0.015 \pm 0.061$	0.196	Корректировка за $\mu_{LMC} = 18.50$
Gieren et al. [70]	7	-0.005 ± 0.047	0.109	
Madore & Freedman [71]	13	$+0.007 \pm 0.035$	0.117	
SBF				
Jensen et al. [72]	8	-0.223 ± 0.076	0.223	
Tonry et al. [73]	16	$+0.092 \pm 0.057$	0.250	
PNLF				
Ciardullo et al. [74]	10	$+0.043 \pm 0.089$	0.225	
Ярчайшие звезды				
Ярчайшие голубые звезды	61	-0.039 ± 0.076	0.586	
Ярчайшие красные звезды	21	-0.080 ± 0.140	0.632	

Примечание. В таблице представлено сравнение различных выборок данных с эталонным образцом EDD. В столбце 1 дается ссылка на наборы данных. Столбец 2 - количество совпадающих с нашей выборкой EDD объектов. В столбце 3 представлено среднее значение и его погрешность на уровне 1σ . В столбце 5 показана дисперсия. В графе 6 приведено дополнительное описание сравниваемых измерений. Наборы данных сгруппированы по разным методам определения расстояния.

Сравнения, собранные в Таблице 1.1, показывают согласованность, в среднем в пределах 2σ . Тем не менее, небольшое смещение 0.02 зв.вел. между любым из рассмотренных TRGB-наборов и выборкой “CMDs/TRGB” представляется статистически значимым. Его происхождение непонятно. Сравнение метода TRGB с различными соотношениями период-светимость для Цефеид показывает, что они отлично согласуются. В большинстве случаев средняя разница не превышает 0.02 зв.вел. Другими словами, шкалы расстояний TRGB и Цефеид совпадают с точностью лучше 1%. Обратим внимание, что калибровка TRGB [51] основана на яркости горизонтальной ветви [45] и не зависит от расстояний по шкале Цефеид. Хотя метод SBF откалиброван по переменным Цефеидам, он требует больших поправок, чтобы быть согласованным с другими методами.

Таким образом, каталог CMDs/TRGB [20] можно рассматривать как основу галактик для гомогенизации шкалы расстояний для стандартной выборки. Многие авторы отмечают, что метод TRGB имеет точность, аналогичную методу Цефеид [75-76]. Rizzi et al. [51] обнаружили отличное согласие между шкалами TRGB и Цефеид ($\mu_{Ceph} - \mu_{TRGB} = -0.01 \pm 0.03$) с использованием 15 соседних галактик. Наш анализ подтверждает этот вывод. Мы выбрали 194 галактики с точностью лучше 0.1 зв.вел. из каталога CMDs/TRGB, как основу нашего калибровочного набора. Эта выборка хорошо охватывает близлежащие галактики, но по-прежнему ограничена для калибровки методов определения расстояний на больших. Как видно из Рис. 1.5, текущие измерения TRGB, в основном, ограничиваются расстоянием 5-6 Мпк. Это ограничение особенно заметно для галактик ранних типов, поскольку Местный Объем почти не содержит гигантских эллиптических элементов. Чтобы частично устранить эту проблему, мы включили в выборку стандартов 29 измерений с точностью, превышающей 0.12 зв.вел. [37], из результатов Hubble Space Telescope Key Project. Интересно отметить, что исключение двух галактик, NGC 5253 и IC 1613 с погрешностями измерения 0.14 и 0.15 зв.вел., делает соответствие между шкалами TRGB и Цефеид идеальным, $\langle \mu_{KP} - \mu_{EDD} \rangle_{\omega} = -0.001 \pm 0.034$. Этот набор данных хорошо распространяется до 15-20 Мпк, что благоприятствует определению шкалы расстояний до спиральных галактик. Мы включаем новое геометрическое расстояние мазера, $D = 7.6$ Мпк или $\mu = 29.40$ зв.вел., для NGC 4258 [35], которое отлично согласуется с оценкой TRGB

$\mu_{TRGB} = 29.42 \pm 0.04$ [20] и со значением $\mu_{Ceph} = 29.44 \pm 0.07$ зв.вел. [37]. Наш выборка стандартных измерений расстояний содержит 211 галактику.

2) Коррекция за калибровку

Большинство данных в каталоге относятся к калибровке, используемой для определения расстояния. Это позволяет нам группировать измерения, выполненные с использованием одного и того же метода и с той же калибровкой. Для каждой калибровки мы определяем среднее значение как средневзвешенное разницы между отдельными измерениями и нашим стандартом расстояния. Мы применяем эту поправку к данным, если как минимум пять объектов совпадает с нашим стандартом расстояний. Теперь доступна оценка байаса для 58 калибровок из 13 методов определения расстояния. Поле MODC показывает модуль гомогенизированного расстояния для отдельных измерений после применения калибровочной коррекции.

1.4 Параметры линии HI

1.4.1 Проблема базы данных (некорректная оценка поглощения в линии HI)

Сравнение соотношений для “плоских” и изолированных галактик одних и тех же морфологических типов показало, что имеет место некорректный учет поглощения в линии HI.

На всех зависимостях значение M_{HI} для “плоских” галактик систематически выше, чем для изолированных галактик (по крайней мере, для галактик с большими значениями D_{25} и V_{rot}). Для примера на Рис. 1.6 положение плоских галактик на диаграмме “ $M_{HI} - D_{25}$ ” и “ $M_{HI} - V_{rot}$ ” сравнивается с положением изолированных галактик AMIGA [77], которое представлено регрессионной прямой. По-видимому, этот сдвиг является результатом завышенной оценки массы HI в плоских галактиках из-за ненадежности учета самопоглощения в линии HI. При наклоне $i = 85^\circ$ ослабление интенсивности, вызванное внутренним поглощением, меньше 40%, но быстро нарастает по мере приближения к $i < 90^\circ$ [78]. В HYPERLEDA, откуда взяты значения M_{HI} , поправка за самопоглощение для галактик, наблюдаемых “с ребра”, принималась равной (в звездных величинах) $\Delta m_{HI} = -0.82$, что соответствует коэффициенту ослабления $k = 2.1$. “Сдвиг” плоских галактик на рассматриваемых диаграммах по отношению к изолированным (среди которых всего несколько *edge-on* галактик) дает основание считать, что для них ослабление потока, вызванное самопоглощением, переоценено, и поэтому оценка M_{HI} преувеличена в среднем примерно в 1.5 раза. Разброс в коэффициентах ослабления для разных галактик, безусловно, увеличивает дисперсию точек на диаграммах. Любопытно, что, как следует из Рис. 1.6, для

медленно вращающихся, а следовательно, маломассивных галактик ($\log V_{rot} < 1.9$, или $V_{rot} < 80$ км/с) разность между оценками $\log M_{HI}$ для *edge – on* и изолированных галактик становится незначительной, или даже меняет знак. Хотя число таких галактик слишком мало для уверенных выводов, это обстоятельство позволяет предположить, что принятая оценка самопоглощения в линии HI для них уже не является преувеличенной, по-видимому, вследствие того, что в этих богатых газом галактиках меньше разброс лучевых скоростей HI в диске, и, следовательно, выше самопоглощение.

Вопрос самопоглощения в линии HI для “плоских” галактик был рассмотрен в работе Peters et al. [79]. Авторы изучили 8 близких галактик, видимых с ребра, для шести из которых было возможно провести изучение вертикального распределения вещества. Вопрос поглощения в “плоских” галактиках является довольно неоднозначным. Как было показано в [80], пыль имеет различное пространственное распределение в зависимости от скорости вращения галактического диска. Так, медленно вращающимся галактикам ($V_{rot} < 120$ км/с) свойственно более клочковатое распределение пыли, в то время как быстро вращающиеся диски склонны иметь четко выраженную пылевую полосу. Подобные явления сильно влияют на общую картину поглощения.

Для нейтрального водорода ситуация еще сложнее. Так, где большинство оптических и ИК- излучений имеет вид очень широких спектральных линий, линия HI является очень узкой. Из-за этого наиболее заметным источником уширения излучения в линии HI является доплеровский сдвиг, вызванный объемным движением газа. Уширение, обусловленное турбулентными движениями (дисперсия скоростей), обычно составляет порядка 10 км/с, что представляет собой очень небольшую величину по сравнению со скоростью вращения галактики. Остается открытым вопрос, насколько же сильно самопоглощение в линии HI влияет на наблюдательные величины и существует ли возможность численного учета этого самопоглощения.

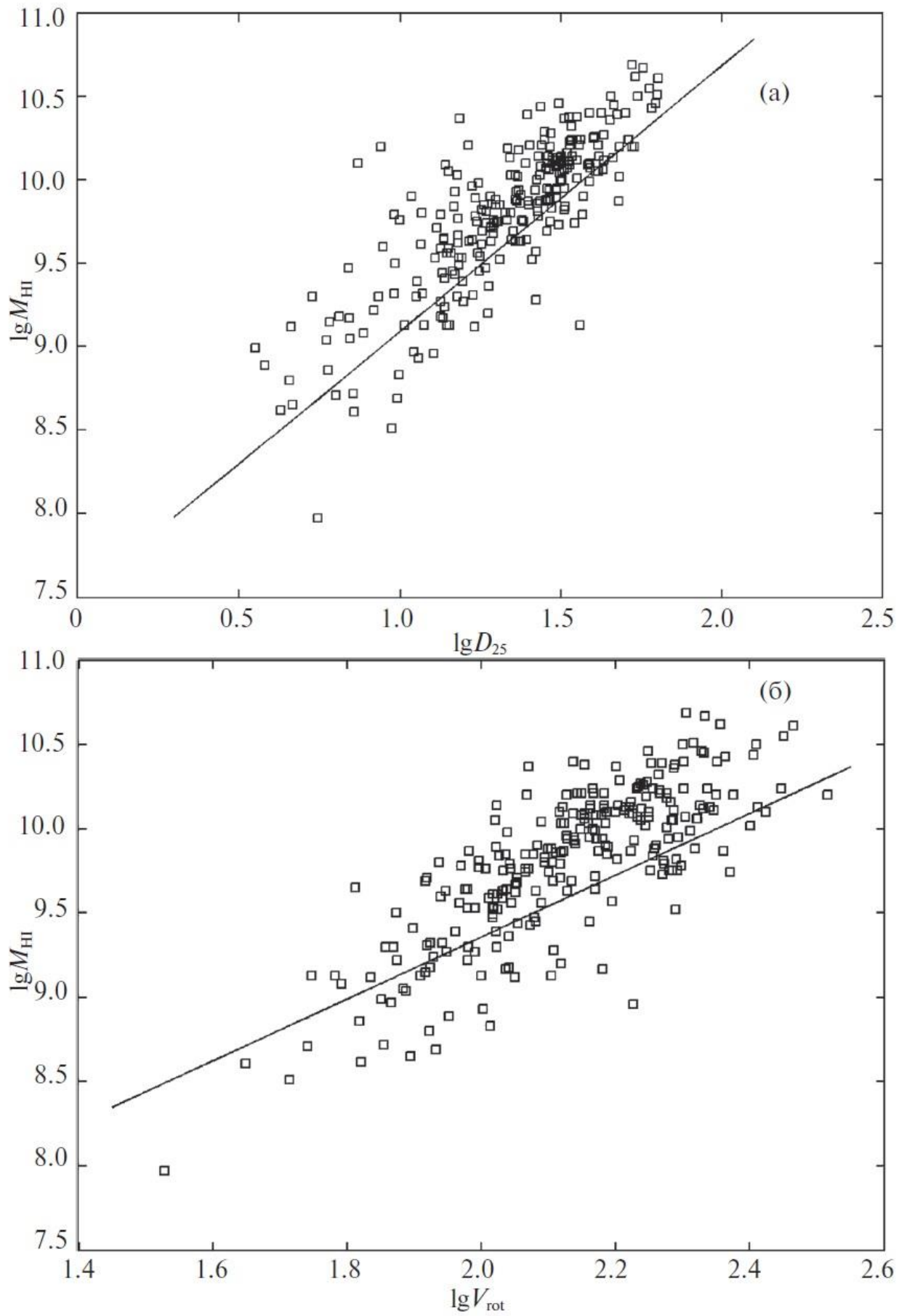


Рис. 1.6. Положение плоских галактик на диаграмме “ $M_{\text{HI}} - D_{25}$ ” (а) и “ $M_{\text{HI}} - V_{\text{rot}}$ ” (б). Прямая линия—регрессия для изолированных галактик.

На примере выборки из восьми галактик Peters et al. [79] показали, что в реальных галактиках самопоглощение в линии HI может приводить к ошибкам определения потока вплоть до 30% от общей величины. При тщательном моделировании, декомпозиции кривых вращения и изучении радиального и вертикального распределения вещества, данные ошибки могут быть сведены к минимуму. При переносе этого механизма оценки поглощения на галактики, видимые плашмя, результаты также согласуются с наблюдательными данными. Что показательно, галактики, к которым были применены подобные корректировки, ложатся на те же зависимости между HI и параметрами галактики, что и изолированные галактики. Примечательно, что данные из HYPERLEDA для этих же галактик дают завышенные значения M_{HI} . Возможно, будущие исследования позволят скорректировать имеющиеся в базе данных значения потоков, что приведет к более точным оценкам параметров линии HI.

1.5 Заключение и выводы

За последнее десятилетие количество доступных данных по внегалактической астрономии значительно возросло благодаря современным исследованиям. Однако, несмотря на повышение качества измерений, когда необходимо установить выборку для калибровки индикаторов расстояния, необходимо критически проанализировать большое количество различных источников измерений. Систематики, которые влияют на конкретные методы или конкретные серии измерений, должны быть четко определены, а необходимость хорошо документированных компиляций остается столь же острой, как и прежде. К счастью, доступность и инструментальная база для обработки опубликованных данных улучшаются, что способствует сохранению высокого уровня достижений.

Мы подготовили каталог компиляции красных смещений, независимых от расстояний, в базе данных HYPERLEDA. В настоящее время мы рассмотрели 430 публикаций, которые дают 6640 оценок расстояния для 2335 галактик. Большинство из них сосредоточено в Местном Объеме. Каждая отдельная серия данных перекалибруется к общей шкале расстояний на основе тщательно отобранного набора высококачественных измерений. Кроме того, большие объемы данных по HI и фотометрии в HYPERLEDA позволяют оценивать расстояния для 19 000 спиралей с использованием Соотношения Талли-Фишера. Каталог расстояний доступен через веб-интерфейс базы данных HYPERLEDA <http://leda.univ-lyon1.fr>, который в настоящее время поддерживается Обсерваторией Лиона (Франция) и Специальной Астрофизической Обсерваторией Российской Академии наук (Россия).

Наблюдается систематический сдвиг на ~ 0.2 dex между оценками интегральных масс водорода M_{HI} в “плоских” (*edge-on*) и в изолированных галактиках со сходными значениями размера или скорости вращения. По-видимому, это расхождение оценок связано с преувеличенной (примерно на 0.2 dex) поправкой на самопоглощение в линии HI, принимавшейся в HYPERLEDA для галактик, видимых “с ребра”.

2. Соотношение Талли-Фишера

2.1 Введение

2.1.1 История вопроса

В 1977 году Tully & Fisher [26] обнаружили существование тесной корреляции между интегральной светимостью спиральных галактик и амплитудой скоростей внутреннего движения в них, определяемой по ширине эмиссионной линии нейтрального водорода 21 см. С тех пор соотношение Талли-Фишера стало эффективным инструментом для массового определения расстояний до спиральных галактик независимо от красного смещения. Соотношение Талли-Фишера используется также для изучения пекулярных скоростей галактик и распределения вещества в близкой Вселенной (к примеру, см. [81]), и для калибровки постоянной Хаббла (к примеру, см. [83], [58]).

Это фундаментальное эмпирическое соотношение отражает физику формирования галактик. Светимость галактики пропорциональна звездной массе, в то время как круговая скорость на плато кривой вращения определяется, в первую очередь, гало темной материи (которое может быть значительно более массивное, чем диск). Поэтому соотношение Талли-Фишера отражает соотношение между темной материей и светящейся барионной составляющей галактики.

Улучшение качества наблюдений позволило расширить эту эмпирическую зависимость как на больший диапазон длин волн, так и на большие шкалы расстояний. Существенный вклад в изучение соотношения Талли-Фишера был внесен проектом Cosmicflows [55]. Большое внимание уделялось получению высокоточных оценок расстояния близких галактик с использованием метода TRGB, что чрезвычайно важно для исследования распределения материи в Местном объеме. Высокоточные измерения расстояний до близких галактик позволили уточнить соотношение Талли-Фишера, что легло в основу оценки расстояния до примерно 8000 галактик и уточнению постоянной Хаббла $H_0 = 74.4 \pm 3.0$ км/с/Мпк.

Помимо “простого” соотношения Талли-Фишера, широко рассматривается барионное соотношение Талли-Фишера, которое является обобщением классической зависимости на случай полной барионной массы галактики вместо ее светимости. Наличие тесной корреляции между полной массой барионов в галактике и ее максимальной скоростью вращения является чрезвычайно важным наблюдательным фактом критической проверки теории формирования и эволюции галактик. Однако, переход от наблюдаемой звездной величины галактики к ее полной барионной массе, представляющей собой сумму

масс звездной и газовых компонент, несет в себе дополнительную неопределенность. Для определения первого фактора необходимо знание отношения M/L (масса-светимость), которое связано с эволюцией галактик и их начальной функцией масс, что до сих пор остается предметом многих дискуссий.

Исследования как классического, так и барионного соотношения Талли-Фишера для карликовых галактик Местного Объема, были выполнены Караченцевым и др. [83]. Исследование зависимости Талли-Фишера для карликовых галактик имеет свои наблюдательные сложности. Карликовые иррегулярные галактики имеют сложную форму, что затрудняет определение угла наклона диска, и как следствие, вносит большую неопределенность в поправку к скорости вращения галактики за наклон. Многие карликовые галактики до сих пор не имеют хорошей фотометрии. Для карликовых систем значительно сложнее провести поверхностную ИК фотометрию, поэтому оценка звездной массы для них проводится с большой ошибкой. Несмотря на это, в работе [83] была получена точность барионного соотношения ($\sigma = 0.38$), сравнимая с литературными результатами. Также было показано, что карликовые сфероидальные галактики следуют общей зависимости для карликовых галактик, хотя и имеют несколько меньшую массу.

Определение скорости вращения является крайне важным вопросом и для классического, и для барионного соотношения Талли-Фишера. Brook et al. [84] сравнили модельное барионное соотношение Талли-Фишера и наблюдаемое для галактик в диапазоне от карликов до спиралей, используя различные меры скорости вращения V_{rot} . Исследование показало, что возможные неточности в определении скорости вращения кроются не только в измерении угла наклона диска галактики к лучу зрения, но и в способе определения скорости. Например, использование в качестве переменной скорости на плоской части кривой вращения, V_{flat} , и скорости, определённой по ширине профиля H α , дает существенно разные результаты. Это подчеркивает необходимость тщательного сравнения между различными подходами к измерению скорости вращения галактик.

Качественно природа соотношения Талли-Фишера может быть объяснена в рамках стандартной Λ CDM-космологии, в которой вселенная является плоской и состоит (по массе) из 4.6% барионов, 22% холодной темной материи и 73% темной энергии [85]. В этой парадигме, видимые галактики окружены примерно сферическим гало темной материи. Поскольку именно полная масса (масса барионной составляющей + масса темного гало) определяет скорость вращения галактики на любом определенном радиусе, то ясно, что соотношение Талли-Фишера описывает связь между барионами в галактике и окружающей ее темной материей. По этой причине первые предсказания Λ CDM для соотношения Талли-Фишера начались с ожидаемого соотношения между общей массой галактики и ее гало,

M_{vir} , и соответствующим скоростям вращения V_{vir} , предполагая вириальное равновесие вплоть до радиуса R_{vir} ($M_{vir} \sim V_{vir}^3$). Тем не менее, M_{vir} и V_{vir} не могут быть измерены непосредственно: это теоретические величины, относящиеся к предполагаемому гало темной материи. Для согласования теории с наблюдениями необходим переход к реальным характеристикам галактик (барионной массе и наблюдаемой скорости вращения). Но, в отличие от теоретической модели, исследования определяют наклон больше, чем 3, как правило, в диапазоне 3.5-4. К подобным выводам пришли Papastergis et al. [86], используя выборку из 97 галактик, выбранных из Arecibo legacy fast ALFA (ALFALFA) обзора в линии 21см, чтобы сделать точные измерения барионного соотношения Талли-Фишера. Они измерили наклон для барионного соотношения Талли-Фишера $a = 3.75 \pm 0.11$.

В другой работе Sales et al. [87] использовали численную космологическую модель формирования галактик APOSTLE/EAGLE, чтобы изучить, как барионное соотношение Талли-Фишера воспроизводится в рамках LCD-парадигмы. Расчеты предсказывают, что это соотношение должно становиться все более крутым на маломассивном конце, хотя разброс скоростей при фиксированной массе должен оставаться небольшой. Наблюдаемое увеличение наклона барионного соотношения Талли-Фишера на маломассивном конце носит менее выраженный характер по сравнению с тем, что дают численные модели, и зависимость характеризуется большим разбросом по сравнению с моделированием. Это расхождение, отчасти, связано с недооценкой максимальной скорости вращения карликовых галактик из-за того, что наблюдаемое вещество заполняет только центральную область темного гало и мы не наблюдаем выхода кривой вращения на плато. Трудно согласовать с модельными зависимостями и большой разброс точек на маломассивном конце наблюдаемого барионного соотношения Талли-Фишера.

Исследования, посвященные изучению галактик на больших красных смещениях, показывают, что, вплоть до $z \sim 1$ до не наблюдаются эволюционные изменения ни в классическом, ни в барионном соотношении Талли-Фишера. Di Teodoro et al. [88] исследовали в эмиссионной линии H_α кинематику восемнадцати галактик на $z \sim 1$, используя новую технику 3D-анализа с KMOS. Они не обнаружили существенной эволюции соотношения Талли-Фишера для звездных масс. Это означает, что дисковые галактики были кинематически зрелыми и в них доминировало вращение уже при $z \sim 1$. Puech et al. [89] в рамках обзора IMAGES, который сочетает в себе изучение пространственно-разрешенной кинематики с FLAMES/GIRAFFE с изображениями, полученными на космическом телескопе Хаббла, изучали эволюцию звездной массы и барионного соотношения Талли-Фишера от $z = 0.6$ вплоть до $z = 0$. Переход от светимости к массе звездной компоненты показал отсутствие существенной эволюции

соотношения Талли-Фишера, что позволяет предположить, что большая часть газового резервуара, превратившегося в звезды за последние 6 Gyr, уже была гравитационно связана с галактиками при $z = 0.6$.

2.1.2 Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра

Плоские, сильно наклоненные галактики являются удобным инструментом для изучения пекулярного движения галактик вплоть до 200 Мпк. Такие объекты имеют ряд наблюдательных преимуществ. Галактики с отношением осей $a/b > 7$ относятся к поздним морфологическим типам, Sc-Sd. Благодаря высокой поверхностной яркости их легко обнаружить и классифицировать даже на больших расстояниях. Кроме того, Sc-Sd галактики показывают более равномерное распределение в пространстве, чем объекты ранних типов. Сильно наклоненные галактики, видимые с ребра, как правило, не требуют коррекции за наклон, который представляет собой один из наиболее важных факторов неопределенности в соотношении Талли-Фишера. Недостатком является сложность учета внутреннего поглощения. Поэтому, чтобы избежать непредсказуемость эффектов сильного поглощения света в плоскости галактики, сильно наклоненные галактики обычно исключаются из выборок для оценок расстояния по соотношению Талли-Фишера. Несмотря на это, самые первые работы [90-91] показывают, что линейный диаметр и светимость “плоских” галактик являются хорошими индикаторами расстояния в соотношении Талли-Фишера.

The Flat Galaxies Catalogue (FGC, [92]) и его пересмотренный вариант (RFGC, [7]) были созданы для исследования крупномасштабного коллективного движения галактик на шкале 100-200 Мпк. RFGC содержит 4236 галактики с отношением осей в голубом цвете $a/b > 7$ и максимальным диаметром $a > 0.6'$ по всему небу. Пекулярные скорости плоских галактик были изучены в серии статей [93-100] с использованием различных видов соотношения Талли-Фишера. В большинстве работ используется линейный диаметр как основной индикатор расстояния. Типичный разброс RFGC галактик на стандартном соотношении Талли-Фишера составляет около 0.6-0.7 зв.вел. в различных оптических и ближних инфракрасных фильтрах ([101], [102], [99]). Возможно, большой разброс данных обусловлен косвенными оценками полной светимости в фильтре В через угловые размеры и другие параметры галактик, видимых с ребра. Точность зависимости Талли-Фишера в ближнем ИК, скорее всего, ограничена короткостью экспозиций в Two Micron All Sky Survey, что может привести к потере значительной части света от галактических дисков.

В последнее время был достигнут заметный прогресс в качестве, однородности и количестве данных для RFGC галактик. В рамках программы Cosmicflows наблюдалась большая выборка галактик, видимых с ребра, на Green Bank 100-м и Parkes 64-м телескопах [103]. Эти данные вместе с архивными данными с других радиотелескопов были обработаны с целью получения однородного набора ширин линий HI с точностью лучше, чем в 20 км/с [8]. The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS (EGIS, [2]) обеспечивает высокую точность апертурной фотометрии в g , r и i полосах пропускания для выборки “истинно плоских” галактик, а также их структурных параметров: радиальных и вертикальных шкал, центральных поверхностных яркостей и отношений балджа к диску (“buldge-to-disk”). Этот каталог содержит 5747 галактик, видимых с ребра, выбранных из Sloan Digital Sky Survey (SDSS) Seventh Data Release [5]. Сочетание высокой точности радио и оптических данных дает нам возможность изучить соотношение “светимость-ширина линии водорода” для плоских галактик с высокой точностью.

Кроме того, только галактики, видимые с ребра, представляют собой объекты, для которых мы можем непосредственно исследовать вертикальное распределение светящегося вещества. Засов и др. [104]) показали, что относительная толщина гравитационно стабильного галактического диска зависит от относительной массы сферической составляющей. Отсюда следует, что существование сверхтонких галактик с $a/b \sim 6 - 10$ возможно только в том случае, если диск погружен в массивное темное гало. С помощью численного моделирования N-тел, Сотникова и Родионов [105] определили, что теоретическая зависимость между толщиной диска галактик и массой их сферического компонента позволяет оценить нижний предел для массы темного гало. По понятным причинам, этот факт должен быть отражен в соотношении Талли-Фишера. Можно ожидать, что добавление относительной толщины диска галактики может существенно улучшить соотношение Талли-Фишера.

2.2 Наблюдательная выборка

Мы проанализировали выборку из 397 плоских галактик из каталога RFGC [7], для которых имеются высокоточные измерения ширины линии HI (ошибка < 20 км/с) согласно All Digital HI Profile Catalog [8] из базы данных Extragalactic Distance Database (EDD, [3]), а также фотометрия по данным каталога EGIS [2]. Распределение исследуемых галактик по скоростям относительно микроволнового фона (CMB) представлено на Рис. 2.1. Эффективная глубина выборки (медианное значение) составляет 5458.5 км/с.

Из рассмотрения были исключены 14 галактик, радиальные скорости которых $V_{LG} < 1000$ км/с, чтобы избежать неточностей определения расстояний на малых красных

смещениях с помощью закона Хаббла. По этим же причинам были исключены 15 объектов, находящихся внутри области, ограниченной поверхностью нулевой скорости относительно скопления Virgo, с радиусом 7.2 Мпк [106], что, с учетом расстояния до центра скопления (16.5 Мпк), соответствует угловому размеру $23^{\circ}.6$ градуса и охватывает интервал скоростей от -312 до 2679 км/с относительно Местной Группы. Также, были исключены 12 объектов с высокими показателями поглощения в Галактике, $A_B > 0.6$, чтобы избежать большой неопределенности оценки светимости из-за поглощения.

Тем не менее, несколько объектов показывают большое отклонение от общих зависимостей. После проверки каталожных данных и оригинальных публикаций, оказалось, что из выборки следует удалить PGC 15031 и PGC 91372, поскольку имеются неточности в измерениях параметров линии HI. Кроме того, мы провели визуальный осмотр всех галактик выборки, чтобы исключить объекты с возможными ошибками в фотометрии из-за наложения относительно ярких звезд, а также взаимодействующие галактики и близкие пары с путаницей в радио спектре объектов. Комментарии о четырнадцати удаленных галактиках будут приведены в пункте 2.2.3.

Итоговая выборка RFGC-галактик включает в себя 331 объект поздних морфологических типов.

Каталог профилей All Digital HI [8] из EDD обеспечивает однородную информацию об измерениях линии HI как по оригинальным наблюдениям, выполненным в рамках NRAO Cosmic Flows Large Program, так и по архивным данным телескопов Arecibo, Parkes, Green Bank и Nancay. Использовалась ширина линии на уровне 50% от полного потока в HI, скорректированная за красное смещение и эффект уширения спектрального разрешения, W_{m50}^c из EDD (см. описание [107]). Для галактик, видимых под произвольными углами, необходимо введение дополнительной поправки за угол наклона. Однако выборка “плоских” галактик не требует такой коррекции, потому что все объекты имеют наклон $i > 86^{\circ}$, и эта поправка оказывается пренебрежимо мала.

Для анализа соотношения Талли-Фишера была использована фотометрия из каталога EGIS [2]. Авторы создали выборку “истинно плоских” галактик на основе данных SDSS Seventh Data Release [5]. Они определили структурные параметры галактик: радиальную и вертикальную шкалы диска, центральную поверхностную яркость и отношение “bulge-to-disk”. Полная светимость оценивалась в трех полосах пропускания SDSS g, r, i в пределах эллипса на уровне сигнала-шума $S/N = 2$ на пиксель. Все величины были исправлены за галактическое поглощение с использованием карт [108], как описано в работе [2]. В нашей работе была добавлена K-поправка к величинам в соответствии с методологией <http://kcor.sai.msu.ru/>, описанной в [109-110]. В случае SDSS фильтра g мы

использовали ее среднее значение на основе поправок для цветов ($g-r$) и ($g-i$). Для сравнения наших результатов с оценками других авторов SDSS величины были преобразованы в стандартную систему B и I_c Johnsn-Cousins, используя уравнения Lupton <http://www.sdss.org/dr12/algorithms/sdssubvritransform/>. Полученные нами данные были сопоставлены с результатами [83] и [55].

В нашей работе мы не вводили поправки за внутреннее поглощение для исследуемых галактик. Поскольку рассматриваются галактики, видимые практически с ребра, учет неравномерности эффектов поглощения в диске вдоль луча зрения может быть чрезвычайно сложным для учета. Это выходит далеко за рамки нашего исследования. Здесь имеет смысл обратная задача: оценить ослабление света путем сравнения поведения галактик, видимых с ребра, с галактиками с умеренным наклоном диска на диаграмме Талли-Фишера. Есть несколько аргументов, которые позволяют нам обойти сложности, связанные с учетом внутреннего поглощения в галактиках при изучении соотношения Талли-Фишера. Как правило, в массивных галактиках пыль концентрируется в узком слое в плоскости диска. Следовательно, в галактиках, видимых с ребра, значительная часть света достигает наблюдателя, не подвергаясь воздействию пыли, и поэтому влияние пыли на цвет, но не на светимость, может оказаться небольшим. Более того, как отмечалось во введении, RFGC-галактики имеют узкое распределение по морфологическим классам с преобладанием поздних типов Sc-Sd [111]. Можно ожидать, что внутреннее поглощение имеет схожий характер для подобных объектов, и его влияние плавно меняется с изменением свойств галактики, таких как полная масса, звездное население, относительная толщина диска и т.д. Поскольку данное исследование посвящено многопараметрическому соотношению Талли-Фишера, мы ожидаем, что эффекты поглощения будут частично учтены косвенным образом, благодаря использованию дополнительных параметров: цвет, относительная масса водорода, относительная толщина и амплитуда вращения.

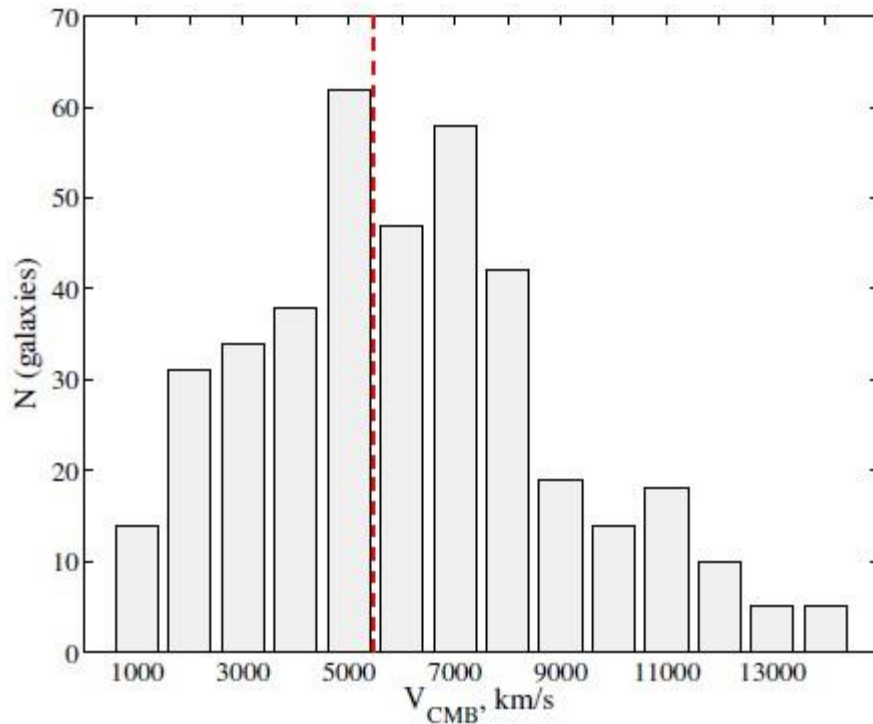


Рис. 2.1. Распределение RFGC галактик с высококачественной фотометрией из каталога EGIS и HI-данными из EDD. Вертикальная пунктирная линия указывает эффективную глубину выборки.

Как следует из Рис. 2.1, эффективная глубина выборки составляет около 75 Мпк. На шкале до 100-200 Мпк поле пекулярных скоростей во Вселенной демонстрирует сложную структуру (см., например, [112]). Коллективное движение галактик на шкале 100 Мпк достигает 270 км/с относительно СМВ [113]. Крупномасштабные потоки галактик и пекулярное движение Млечного Пути усложняют оценку расстояния по Закону Хаббла и, как следствие, увеличивают дисперсию соотношения Талли-Фишера. При анализе соотношения Талли-Фишера была проверена зависимость разброса данных от выбора стандарта покоя (СМВ, либо центраида Местной Группы) и скорости движения самой выборки как целого относительно хаббловского поля скоростей (назовем это объемным движением). Для фиксированных значений апекса Солнца, СМВ [114] и центраида Местной Группы [115], мы вычислили дисперсию разброса данных на диаграмме Талли-Фишера с помощью простой минимизации МНК, для различных вариантов, в которых наблюдаемая гелиоцентрическая радиальная скорость каждой галактики была скорректирована за соответствующее движение Солнца. В случае объемного движения мы использовали нелинейную минимизацию МНК для соотношения Талли-Фишера (нуль-пункт и наклон) с одновременной вариацией трех параметров апекса Солнца относительно галактик выборки. Поскольку обзор SDSS охватывает только часть неба, ожидается, что качество подгонки будет намного лучше в направлении северного полюса Галактики, чем в перпендикулярном направлении. Таким образом, также была проверена модель с одним

свободным параметром (апексом Солнца) в направлении на Галактический Северный полюс.

Наш анализ показал, что дисперсия для всех рассмотренных апексов Солнца лежит в диапазоне от 0.34 до 0.41 зв.вез. Приведение скоростей галактик к апексу движения Солнца относительно микроволнового фона дает наименьший разброс среди всех возможностей: 0.40, 0.35 и 0.34 зв.вел. в g -, r - и i -фильтрах соответственно. Поэтому, дальнейший анализ мы проводили в системе отсчета, связанной с СМВ.

Далее мы рассмотрим два основных каталога, на которых базировалось наше исследование.

2.2.1 Каталог EGIS

Первоначальная выборка кандидатов на роль “плоских” галактик была сформирована авторами [2] путем автоматического анализа седьмого выпуска каталога данных SDSS (DR7, [5]) с помощью серверных SQL-инструментов. Отбор основывался на отношении осей, угловом диаметре, звездной величине и показателях цвета. Объекты с чрезвычайно высокими погрешностями в определении звездной величины включены не были. Подбор параметров был адаптирован для отбора в фильтре g относительно ярких галактик с Петровскими величинами менее 20 зв.вел., галактик с угловыми размерами большой оси более 30" и “плоских” галактик с отношением осей >3 . Объекты также отбирались в определенных диапазонах показателей цвета ($-0.5 \leq g - r \leq 2$) и ($-0.5 \leq r - i \leq 2$). Использование четких ограничений на показатель цвета (скорректированных за эффект красного смещения) позволяет избежать включение галактик с необычными цветами, вызванными наличием активных ядер и дефектами телескопа или изображений.

Из базы данных SDSS авторами получены фотометрически откалиброванные кадры галактик-кандидатов в полосах g , r и i . Изображения были очищены от фоновых звезд. Звезды были идентифицированы на изображениях как объекты с FWHM от 1"-1.5". Эти звезды были заменены медианными значениями пикселей за пределами 3" (примерно в два раза больше обычного FWHM) от их центра. Поскольку изображения, отобранные из SDSS, находятся вдалеке от плотно заселенных полей, этот метод очистки от звезд не привел к сильным артефактам. Сами центральные области галактик были исключены из процедуры очистки. Имея первоначальное предположение о координатах центра рассматриваемых галактик, были установлены эллипсы для изофот на уровне сигнал/шум $S/N = 2$ пикселя⁻¹ (при масштабе изображения примерно 0.4"/пиксель). Установка эллипса для внешних галактических изофот позволила отрегулировать положение галактического центра и определить размер области исследования, охватывающей всю галактику. Затем изображения были

повернуты, чтобы совместить большую ось изофотного эллипса с осью X , а после чего обрезаются. Это позволило создать набор изображений с известными геометрическими параметрами, центрированными на галактиках.

2.2.2 Каталог EDD

База данных EDD (Extragalactic Distance Database, <http://edd.ifa.hawaii.edu/>) была создана авторами [3] для получения максимально большого набора информации о расстояниях до отдельных галактик и их peculiarных скоростей. В базы данных входит большое количество каталогов, одним из которых является All Digital HI [8], вобравший в себя как старые архивные данные по измерению параметров линии 21 см, так и результаты новейших наблюдений на телескопах Arecibo, Parkes и Green Bank, а также данных программы NRAO Cosmic Flows Large Program.

Этот каталог представляет особый интерес для данной работы, поскольку позволяет получить однородный набор данных для целевой выборки галактик. Представленные в каталоги данные включают в себя поправки на параметры линии, связанные с эффектами спектрального разрешения и уширения за счет красного смещения, как уже отмечалось ранее.

2.2.3 Галактики, исключенные из рассмотрения

RFGC 45 (PGC 731, UGC 95) образует пару с *NGC 27 (UGC 96)* на $1.5'$. Данные по HI имеют неплохое пространственное разрешение, но имеются противоречия между разными каталогами и базами данных. Haynes et al. [116] отмечают, что “с *UGC 96* идентифицируется более низкое значение cz ”.

RFGC 146 (PGC 2390, UGC 418) представляет собой пару с *UGC 422*.

RFGC 268 (PGC 4278) формирует пару с *PGC 1683298 (2MASX J01113021 + 2312165)*.

RFGC 345 (PGC 5934) находится в группе с *NGC 624*, $V_h = 5871$ км/с, на $3.4'$ и *PGC 5929*, $V_h = 5916$ км/с, на $3.4'$.

RFGC 841 (PGC 15031, UGC 3027) является далекой гигантской галактикой на низкой галактической широте. Спектр EDD основывается на наблюдениях Nancay [117]. Он показывает один пик на 6900 км/с с шириной линии около 100 км/с, что не соответствует морфологии галактики. Наблюдения, выполненные на Arecibo [118], показывают идеальный двурогий профиль HI с $W_{50} = 461$ км/с. Несомненно, это и есть реальный HI-спектр галактики.

RFGC 1337 (PGC 23033) представляет собой близкую пару (угловое расстояние около $30''$) с *2MASX J08130371 + 2433304*.

RFGC 1537 (PGC 26498, NGC 2820) образует группу с NGC 2814 и NGC 2805 на расстоянии 3.8' и 13.3' соответственно.

RFGC 1906 (PGC 32763, NGC 3454) представляет собой пару с NGC 3455 на 3.5'.

RFGC 1925 (PGC 32992, UGC 6054) - звезда переднего плана накладывается на центр галактики и имитирует яркое ядро; суммарная величина завышена.

RFGC 2130 (PGC 37054) образует группу с PGC 37040 на 2.0' и PGC 37051 на 3.1'.

RFGC 2135 (PGC 37276, UGC 6864) представляет собой пару с PGC 213897 на 2.1'.

RFGC 2329 (PGC 41974, NGC 4565C) представляет собой пару с IC 3546 (PGC 41976) на 3.8'.

RFGC 2817 (PGC 91372) представляет собой карликовую галактику с $V_h \approx 2200$ км/с, подтвержденную оптическими, а также радионаблюдениями. К сожалению, скорость по EDD оказывается на 130 км/с меньше, чем по другим данным. Спектр GBT от EDD превосходный, $W_{50} = 455$ км/с, но он слишком широк для карликовой галактики. Гигантов в непосредственной близости от PGC 91372 не присутствует. Возможна ошибочная идентификация или указание на другой объект. Matthews & van Driel [119] наблюдали галактику на телескопе Nancau. Их спектр имеет профиль с двумя “рогами” шириной около 100 км/с. Он совпадает с оптическим красным смещением, а ширина согласуется с морфологией галактики.

RFGC 4157 (PGC 91811) является спутником UGC 12714 (RFGC 4158, PGC 71969) на 1.8'.

HI-данные соответствуют UGC 12714.

2.3 Стандартное соотношение Талли-Фишера

2.3.1 Излом на зависимости

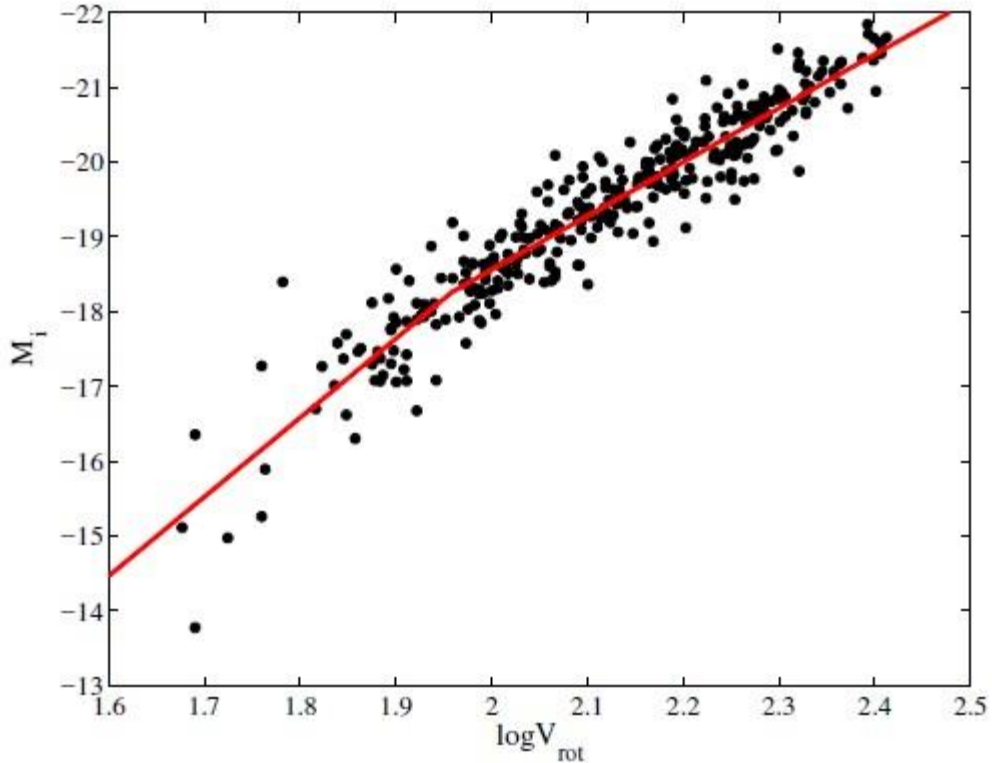


Рис. 2.2. Соотношение Талли-Фишера для “плоских” галактик в i -диапазоне. Аналогичные результаты наблюдаются в диапазонах g и r .

На Рис. 2.2 показано стандартное соотношение Талли-Фишера между абсолютной величиной в i -диапазоне и скоростью вращения $V_{rot} = W_{m50}^c/2$ галактик. Отношение выглядит аналогично в g - и r -диапазонах. Напомним, что абсолютная величина не была исправлена за внутреннее поглощение. Быстро вращающиеся галактики образуют тесное линейное соотношение, в то время как карликовые галактики с $V_{rot} < 90$ км/с лежат систематически ниже отношения, построенного для гигантов. Два участка зависимости аппроксимировались отдельными прямыми линиями (пунктир на Рис. 2.2):

$$M = \begin{cases} a + b \cdot \log V_{rot}, & \text{если } V_{rot} > V_{bp} \\ \hat{a} + c \cdot \log V_{rot}, & \text{если } V_{rot} \leq V_{bp} \\ \hat{a} = a + (b - c) \cdot \log V_{bp} \end{cases} \quad (2.1)$$

Таблица 2.1. Коэффициенты ломанной линии для соотношения Талли-Фишера.

	g	r	i
a	-6.18 ± 0.10	-5.07 ± 0.07	-4.18 ± 0.04
b	-5.85 ± 0.10	-6.63 ± 0.10	-7.19 ± 0.06
V_{bp}	91.0 ± 1.5	91.0 ± 1.3	91.0 ± 0.8
c	-9.57 ± 0.25	-10.09 ± 0.21	-10.58 ± 0.19
$\sigma(gigants)$	0.40	0.35	0.34
$\sigma(total)$	0.44	0.41	0.40

здесь a и b - точки пересечения и наклона для гигантских галактик; V_{bp} - точка “перегиба” соотношения; c — величина наклона для карликовых галактик; и σ представляют собой дисперсию для подвыборки гигантов и полной выборки, соответственно. Результаты представлены в таблице 2.1. Карлики поля с $V_c < 90$ км/с оказываются ниже зависимости, определяемой более быстро вращающимися галактиками. McGaugh et al. [56] объяснили это тем, что эти слабые галактики очень богаты газом, и основная часть их барионного вещества все еще не превращена в звезды. Таким образом, эти медленно вращающиеся галактики являются менее яркими по сравнению с экстраполяцией соотношения для быстро вращающихся галактик. Суммирование звездной и газовой масс восстанавливает линейную зависимость по всему наблюдаемому диапазону. Авторы утверждают, что традиционное соотношение Талли-Фишера является частным случаем более фундаментальной связи - барионного соотношения Талли-Фишера между общей массой барионов и скоростью вращения.

Это объяснение также идеально подходит для нашей выборки тонких, медленно вращающихся и богатых газом галактик. Как будет показано в Разделе 2.4, многопараметрическое соотношение Талли-Фишера восстанавливает линейное поведение с учетом HI и цвета звездного населения. Однако мы не можем исключить наличие селекционных эффектов. Так, в среднем диски карликовых галактик толще, чем для спиральных галактик. Sanchez-Janssen et al. [120] обнаружили, что галактики с малой массой менее $M_* \approx 2 \cdot 10^9 M_\odot$ становятся систематически толще. Эта светимость соответствует $M_i \sim -18$ зв.вел., которая совпадает с абсолютной величиной точки “перегиба” для галактик в нашей выборке. Ограничение на отношении осей $a/b \geq 7$,

установленное для галактик нашей выборки, может приводить к отбору наиболее тонких галактик, и, как следствие, имеющих более низкую поверхностную яркость и светимость.

Соотношение Талли-Фишера с перегибом также появляется в моделировании. Guo et al. [121] применили полуаналитическую модель формирования галактик к моделированиям Millennium [122] и Millennium-II [123]. Прогнозируемое соотношение Талли-Фишера показывает разрыв линейной зависимости вблизи $\log V_{max} \simeq 2.0$ ([121], см. Рис.13). Это соответствует объектам с $M_r - 5 \log(h) \simeq -18$, что хорошо согласуется с нашим соотношением Талли-Фишера для “плоских” галактик.

2.3.2 Вопрос учета поглощения и сравнение с работами других авторов

Как отмечено Dalcanton et al. [80], распределение пыли в галактиках, видимых с ребра, зависит от их скорости вращения. Быстро вращающиеся галактики ($V_{rot} > 120$ км/с) имеют ярко выраженные пылевые полосы, а в медленно вращающихся галактиках пылевая полоса вообще не видна. Распределение пыли в галактиках малой массы ($V_{rot} < 120$ км/с) имеет значительно большую вертикальную шкалу и выглядит гораздо более диффузным по сравнению с массивными объектами. Интересно, что это значение скорости не так далеко от “перегиба” в нашем соотношении Талли-Фишера для “плоских” галактик. Dalcanton et al. [80] показывают, что диски галактик большой массы с пылевыми полосами являются гравитационно-неустойчивыми. Флуктуации устойчивости галактического диска, структуры пылевого слоя и эффективности звездообразования могут влиять на изменение наклона соотношения Талли-Фишера. Вероятно, это изменение наклона отражает наличие взаимосвязи между массой галактики и вышеперечисленными параметрами (устойчивость диска, состояние пыли, эффективность звездообразования).

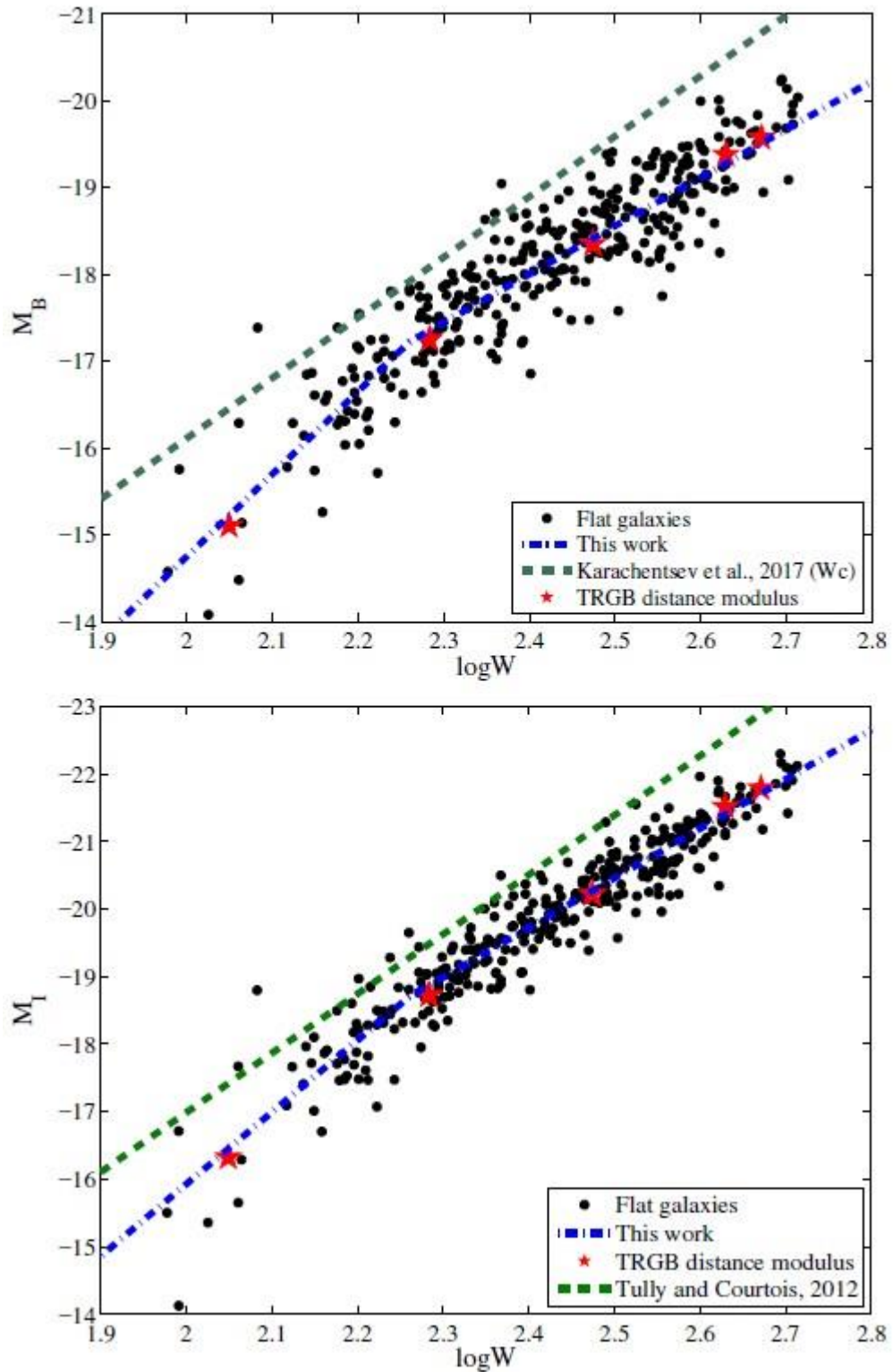


Рис. 2.3. Отношение абсолютная величина - ширина линии для RFGC-галактик (черные точки) в В (верхняя панель) и полосы I_C (нижняя панель). Опорные галактики с расстояниями, определенными TRGB-методом, отмечены красными звездами. Наше “ломаное” приближение показано синей штрих-пунктирной линией. Зеленая линия пунктирной линии соответствует соотношению Талли-Фишера В-диапазона для галактик Местного Объема [83] на верхней панели и к соотношению I_C-диапазона для выборки гигантов из проекта Cosmicflows-2 [55] на нижней панели.

Взаимосвязь между массой галактики и ее внутренним поглощением делает видимый наклон соотношения Талли-Фишера для галактик со скоростью вращения более 100 км/с ($\log W > 2.3$) менее крутым, что можно объяснить большей толщиной пылевого слоя по отношению к толщине звездного диска в более массивных галактиках. Вариации содержания и распределения пыли между галактиками добавляют дополнительный разброс в соотношении Талли-Фишера для галактик большой массы. На Рис. 2.3 мы сравниваем соотношения Талли-Фишера для нашей выборки “плоских” галактик с соответствующими соотношениями для близких галактик Местного Объема [83] и хорошо откалиброванной выборки гигантов, используемых в проекте Cosmicflows-2 [55]. Для того, чтобы сравнить наши результаты с перечисленными выше литературными данными, мы преобразовали звездные величины в SDSS-фильтрах g , r и i в значения звездных величин в полосах B и I_C , используя уравнения Lupton <http://www.sdss.org/dr12/algorithms/sdssubvritransform/>. Галактики нашей выборки, видимые с ребра, не скорректированные за внутреннее поглощение, кажутся систематически более тусклыми по сравнению с галактиками Cosmicflows-2, светимость которых была скорректирована за наклон галактики (т.е. приведена к положению диска “плашмя”). Заметим, что этот вывод хорошо согласуется с результатами, полученными Tully et al. [124], согласно которым поправка за ослабление света, связанного с наклоном диска, выше для галактик с большей шириной линии W .

Мы можем оценить поведение внутреннего поглощения в гигантских “плоских” галактиках, вычитая одно соотношение Талли-Фишера из другого. Он дает $A_B = +1.39 \log W - 2.45$ ($\sigma \sim 0.33$) в B -диапазоне и $A_I = +1.46 \log W - 2.76$ ($\sigma \sim 0.29$) в I_C -диапазоне. Таким образом, разность $A_B - A_I \sim 0.3$, или выраженное в линейных единицах ослабление света в B и I – полосах для тонких галактик отличаются примерно в 1.3 раза.

Для характерного значения $\log W \sim 2.5$ отношение A_B/A_I составляет ~ 1.15 , что меньше канонического значения 2.2 [108]. Очевидно, что это отражает то обстоятельство, что полоса пыли в плоскости диска практически непрозрачна как в B , так и в I , и, закрывая наиболее яркую часть диска, “съедает” примерно 1 зв.вел. независимо от полного потока.

2.4 Многопараметрическое соотношение Талли-Фишера

2.4.1 Выборка параметров на роль дополнительных

Мы попытались уменьшить дисперсию соотношения Талли-Фишера, добавив различные независимые от расстояния параметры и их комбинации в регрессионный анализ. Мы используем данные для поверхностной и апертурной фотометрии “плоских” галактик в SDSS диапазонах g , r , i [2], измерения размеров по данным Паломарской

обсерватории Sky Survey (POSS-I) и ESO/SERC в голубом и красном цветах [7], а также данные из All Digital HI Profile Catalog [8] и базы данных HYPERLEDA [6]. Список тестируемых параметров включает: отношение осей, $\log\left(\frac{b}{a}\right)_{o,e}$, в синих и красных цветах POSS-I; отношение вертикальной шкалы к радиальной шкале, $\log\left(\frac{z}{h}\right)_{g,r,i}$, в диапазонах SDSS g, r, i; индекс цвета HI, $(m_{21} - m_{g,r,i})$, что соответствует отношению HI-mass-to-light, где $m_{g,r,i}$ - видимая величина галактики в фильтрах g, r и i, а m_{21} — поток в линии 21 см, выраженный по величине, соответствующей $m_{21} = -2.5\log F + 17.40$ [25]; показатели цвета в разных полосах, полученные с использованием апертурной фотометрии изображений SDSS; отношения вертикальных и радиальных шкал в разных фильтрах. Также мы проверили, существует ли остаточная зависимость от положения галактик на небе, используя в качестве параметра галактическое поглощение в В-диапазоне. Кроме того, мы проверили величины $\log V_{rot} \cdot \log\left(\frac{b}{a}\right)_{o,e}$ и $\log V_{rot} \cdot \log\left(\frac{z}{h}\right)_{g,r,i}$, которые могут быть связаны с внутренним поглощением в “плоских” галактиках.

2.4.2 Методы отборки конечных параметров и полученные соотношения

Мы используем пошаговую (stepwise) регрессию для выбора значимых параметров многопараметрического соотношения Талли-Фишера. Эта итерационная процедура добавляет и удаляет параметры из многопараметрической модели, основываясь на их статистической значимости в регрессии. На каждом шаге р-значение F-статистики вычисляется для тестирования моделей с потенциальным параметром регрессии и без него. Если на определенном шаге алгоритма оказывается, что коэффициент при определенном параметре будет отличаться от нуля, то параметр включается в итоговую модель. В противоположном же случае (если нет четких подтверждений, что коэффициент при исследуемом параметре отличен от нуля) параметр удаляется из модели. Алгоритм прекращает свою работу, когда ни один шаг не улучшает модель. Мы использовали реализацию MATLAB этого алгоритма с р-значением 0.001 для включения и исключения параметров.

Коэффициенты регрессии для выборки 276 массивных быстро вращающихся галактик с $\log V_{rot} > 1.96$ представлены в таблице 2.2. Последняя строка показывает результирующий разброс полученного многопараметрического соотношения Талли-Фишера. Нуль-пункт был откалиброван по галактикам с известными модулями расстояния по вершине ветви красных гигантов (TRGB-метод, см. Раздел 2.4.3), независимыми от красного смещения. В дополнение к скорости вращения наиболее значимыми параметрами,

от которых зависит светимость галактики (без учета ослабления света), являются оптические показатели цвета и HI индексы. Это отражает тот факт, что возраст звездного населения и параметры межзвездной среды играют основную роль в соотношении Талли-Фишера. Эти параметры имеют высокий уровень достоверности с p -значением менее 10^{-8} . Любой другой параметр не был включен в окончательное соотношение, потому что его значение p больше, чем 0.04. Удивительно, но многопараметрическое соотношение, полученное для быстро вращающихся галактик, улучшает поведение всей выборки, включая 55 медленных ротаторов с $\log V_{rot} < 1.96$. Учет оптических показателей цвета и HI индексов для гигантских галактик удаляет “перегиб” и уменьшает дисперсию для галактик всех светимостей. Зависимость наблюдаемых абсолютных величин галактик в r -диапазоне от прогнозируемых многопараметрическим соотношением Талли-Фишера значений показана на Рис. 2.4.

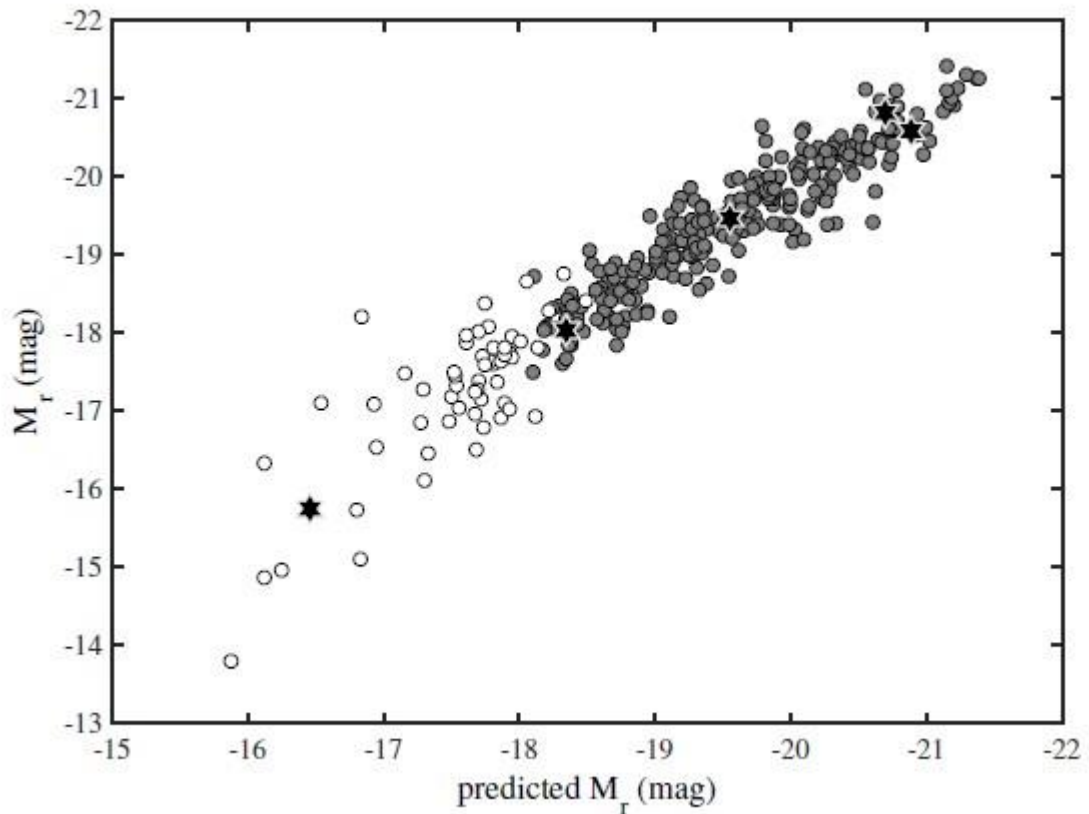


Рис. 2.4. Многопараметрическое соотношение Талли-Фишера для RFGC-галактик в r -диапазоне. Соотношения в полосах g и i аналогичны. Регрессия получена для массивных галактик (заполненных кругов), с $\log V_{rot} > 1.96$. Открытые круги показывают экстраполяцию на медленно вращающиеся галактики. Объекты с известными TRGB-расстояниями показаны заполненными гексаграммами.

Таблица 2.2. Коэффициенты регрессии для многопараметрического соотношения Талли-Фишера в разных SDSS-диапазонах. Подвыборка массивных галактик с $\log V_{rot} > 1.96$.

	M_g	M_r	M_i
$\log V_{rot}$	-8.60 ± 0.32	-8.22 ± 0.28	-8.48 ± 0.30
$(m_{21} - m_{g,r,i})$	-0.23 ± 0.04	-0.23 ± 0.04	-0.22 ± 0.04
$(m_g - m_i)$	2.00 ± 0.19		1.19 ± 0.20
$(m_g - m_r)$		2.21 ± 0.28	
<i>zero - point</i>	-2.09 ± 0.10	-2.80 ± 0.09	-2.28 ± 0.10
σ	0.34	0.32	0.32

Это побудило нас сделать простую линейную многопараметрическую регрессию для полной выборки из 331 галактик, видимых с ребра. Результирующее многопараметрическое соотношение Талли-Фишера для плоских галактик показано на Рис. 2.5, а соответствующие коэффициенты собраны в таблице 2.3. Аналогично выборке гигантов, наиболее значимыми являются оптические и НИ индексы с p -значением менее 10^{-6} . Параметр $(m_r - m_i)$ появляется на уровне $p \approx 0.004$ для отношения в i -диапазоне. Отношение вертикальных шкал в разных полосах пропускания $\log\left(\frac{z_r}{z_g}\right)$ и $\log\left(\frac{z_i}{z_g}\right)$ имеет p -значение 0.04 и 0.02, соответственно. Соотношение для полной выборки не влияет на качество регрессии для гигантских галактик (итоговая дисперсия для них остается неизменной). Многопараметрическая линейная регрессия улучшает дисперсию по сравнению с обычным соотношением Талли-Фишера примерно на 10 процентов.

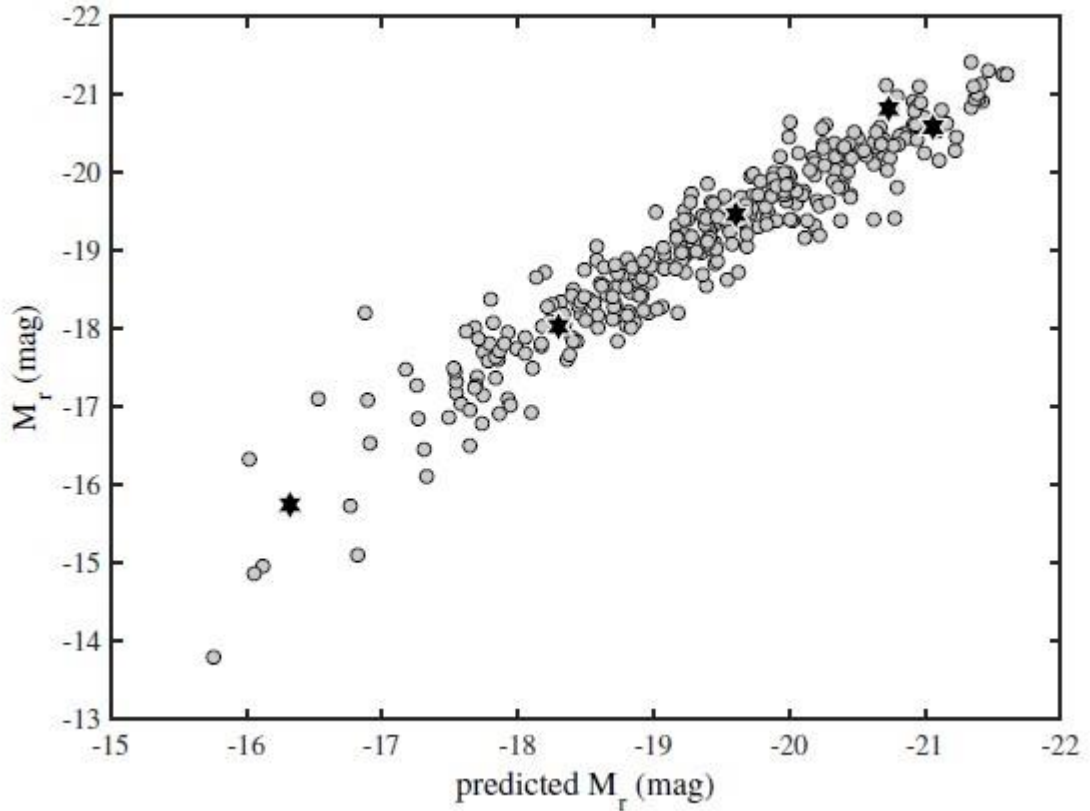


Рис. 2.5. Многопараметрическое соотношение Талли-Фишера для всей выборки из 331 плоских галактик в фильтре r . Гексаграммы представляют собой галактики с известной оценкой TRGB-расстояний.

Таблица 2.3. Коэффициенты регрессии для многопараметрического соотношения Талли-Фишера в разных диапазонах SDSS. Полная выборка галактик.

	M_g	M_r	M_i
$\log V_{rot}$	-8.50 ± 0.26	-8.48 ± 0.25	-8.57 ± 0.28
$(m_{21} - m_{g,r,i})$	-0.30 ± 0.04	-0.30 ± 0.04	-0.29 ± 0.04
$(m_g - m_i)$			1.12 ± 0.21
$(m_g - m_r)$	2.88 ± 0.29	-2.24 ± 0.30	
<i>zero - point</i>	-2.21 ± 0.09	-2.29 ± 0.09	-2.05 ± 0.11
$\sigma(gigants)$	0.34	0.32	0.32
σ	0.40	0.38	0.39

2.4.3 Калибровка нуля-пункта

Из-за эффектов наблюдательной селекции имеется лишь небольшое количество галактик, видимых с ребра, с точными оценками расстояния. Измерения расстояний для выборки FGC-галактик с использованием Цефеид отсутствуют. В общей сложности только одиннадцать FGC-галактик имеют измерения TRGB-расстояний, и только пять из них

включены в нашу выборку. Большинство из них имеют расстояние менее 10 Мпк, что является подходящим расстоянием для измерений TRGB с помощью космического телескопа Хаббла. Мы собрали известные оценки расстояния по TRGB-методу в таблице 2.4, которая содержит идентификаторы объектов в базе данных HYPERLEDA [6], RFGC [7] и в каталоге EGIS [2], вместе с оценками модуля TRGB-расстояния по литературе. Эти оценки были получены с использованием различных методов и калибровок. EDD [3] обеспечивает наиболее однородный и точный набор данных, и, что самое важное, эти данные доступны для всех пяти галактик нашей выборки. Таким образом, мы решили использовать расстояния из EDD [3] для калибровки нуля-пункта многопараметрического соотношения Талли-Фишера.

Следует отметить, что из-за малых расстояний эти галактики не были включены в регрессионный анализ, но мы используем их для калибровки нуля-пункта финального многопараметрического соотношения Талли-Фишера.

Таблица 2.4. Список измерений TRGB-расстояний.

PGC	RFGC	EGIS	$(m - M)_0$
6699		EON 027.382 +32.589	28.61 ± 0.01 [20]
			28.53 [126]
			28.55 ± 0.03 [128]
24930	384	EON 133.173 +33.421	29.96 ± 0.38 [20]
			29.86 ± 0.06 [125]
39422	2245	EON 184.374 +37.807	28.17 ± 0.07 [20]
			28.21 ± 0.11 [127]
			28.19 ± 0.12 [60]
			28.20 ± 0.03 [129]
			28.26 ± 0.24 [132]
			27.88 ± 0.17 [130]
			28.16 ± 0.08 [131]
41618	2315	EON 188.190 +00.115	29.61 ± 0.12 [20]
			29.61 ± 0.21 [106]
54470	2946	EON 228.973 +56.329	31.19 ± 0.05 [20]
			31.13 ± 0.10 [127]

2.4.4 Финальные соотношения (в разных фильтрах) и величина H_0

Таблица 2.5. Коэффициенты регрессии для многопараметрического соотношения Талли-Фишера в разных SDSS-диапазонах. Подвыборка массивных галактик с $\log V_{rot} > 1.96$.

	M_g	M_r	M_i
$\log V_{rot}$	-8.60 ± 0.32	-8.22 ± 0.28	-8.48 ± 0.30
$(m_{21} - m_{g,r,i})$	-0.23 ± 0.04	-0.23 ± 0.04	-0.22 ± 0.04
$(m_g - m_i)$	2.00 ± 0.19		2.19 ± 0.20
$(m_g - m_r)$		2.21 ± 0.28	
<i>zero - point</i>	-1.96 ± 0.10	-2.67 ± 0.09	-2.17 ± 0.10
σ	0.34	0.32	0.32

Используя полученные значения коэффициентов многопараметрического соотношения Талли-Фишера и величину сдвига нуля-пункта, рассчитанную по данным о модулях расстояния по TRGB-методу (см. пункт 2.4.3), мы вычислили величину постоянной Хаббла, составившую $H_0 = 73.9 \pm 0.6$ км/с/Мпк. Полученное значение согласуется с результатами работ других авторов.

2.5 Заключение

Мы построили многопараметрическое соотношение Талли-Фишера для выборки из 331 галактики, видимых с ребра, из каталога RFGC [7]. Эти объекты имеют точные измерения ширины линии HI с ошибкой менее 20 км/с по данным каталога All Digital HI Profile [8] из базы данных EDD [3]. Оптическая фотометрия и структурные параметры галактик были взяты из каталога EGIS [2] на основе архивных изображений SDSS [5]. Мы исключили из анализа близлежащие объекты с радиальными скоростями менее 1000 км/с. Также мы исключили вероятные члены скопления Virgo, которые находятся внутри “поверхности нулевой скорости” скопления. Эта область составляет на небе $23^\circ.6$ с центром в M87. Чтобы избежать влияния галактического поглощения, мы также отбросили галактики с $A_B > 0.6$. Мы провели визуальный осмотр всех галактик выборки и исключили объекты с вероятными неточностями в фотометрии.

Для принятой в настоящей работе выборки “плоских” галактик классическое соотношение Талли-Фишера между абсолютной звездной величиной и шириной линии HI демонстрирует разное поведение для гигантских и карликовых галактик. Карлики со скоростью вращения $V_{rot} < 91$ км/с показывают недостаток светимости относительно экстраполяции соотношения Талли-Фишера, полученного для более массивных галактик. Этот факт можно объяснить в рамках барионной парадигмы соотношения Талли-Фишера.

Карликовые галактики содержат большую часть своего барионного вещества в виде газа, который до сих пор не превратился в звезды. Таким образом, их оптическая светимость ниже по сравнению с галактиками с более высокой эффективностью звездообразования, таких, как гиганты. Использование полной барионной массы вместо светимости учитывает этот эффект и позволяет описать гигантские и карликовые галактики одним и тем же соотношением [56]. Действительно, предложенное нами многопараметрическое соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра, демонстрирует, что и медленно, и быстро вращающиеся галактики подчиняются одному и тому же соотношению. Многопараметрическое соотношение добавляет к классическому закону Талли-Фишера два параметра. Первым из них является показатель цвета $H\beta$ ($m_{21} - m$), описывающий долю массы $H\beta$ по отношению к оптической светимости галактики. Вторым членом, ($m_g - m_i$) или ($m_g - m_r$), отражает свойства звездного населения: его средний возраст и металличность. Все остальные параметры статистически незначимы. Предложенный нами анализ различных параметров показывает, что значительную роль в соотношении Талли-Фишера играют только те параметры, которые непосредственно связаны с барионным веществом: звездным населением и содержанием газа. Заметим, что коэффициенты многопараметрического соотношения Талли-Фишера почти не зависят от полосы пропускания. Это кардинально отличается от стандартного соотношения Талли-Фишера, где наклон значительно изменяется с полосой пропускания (это видно из таблицы 2.1). Таким образом, учет оптических и связанных с водородом показателей цвета приводит к универсальному соотношению.

По нашему мнению, отсутствие относительной толщины в итоговом многопараметрическом соотношении требует дополнительного рассмотрения. Известно, что присутствие сфероидального компонента стабилизирует галактический диск. Следовательно, диск, погруженный в гало, может иметь более низкие значения вертикальной дисперсии скорости, в результате, он может быть более тонким. Засов и др. [104] показывают, что минимальная относительная толщина бесстолкновительного диска уменьшается с его относительной массой, $z/h \sim M_{disk}/M_{total}$ [133], где M_{disk} и M_{total} являются массой дискового компонента и полной массой галактики, соответственно. Можно ожидать, что эта взаимосвязь будет отражена в многопараметрическом соотношении Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра. Однако вклад относительной толщины в многопараметрическое соотношение Талли-Фишера является статистически незначительным. Мы видим следующее возможное объяснение. Ориентация диска рассмотренной галактики близка к 90° , но не точно равна этому значению. Даже небольшие отклонения от положения “с ребра” влияют на оценку величины наблюдаемой вертикальной шкалы галактики. Без видимой пылевой линии кажется невозможным отделить реальный вклад радиального распределения света в измеренный

вертикальный профиль галактик, ориентированных не ровно под 90° . Изменение ориентации галактик размывает связь и делает менее значительным влияние относительной толщины на многопараметрическое соотношение Талли-Фишера. Кроме того, наша выборка состоит из очень тонких, $a/b > 7$ и, в основном лишенных балджа галактик морфологических типов Sc-Sd. Вероятно, эффективного диапазона $a/b = 7 \div 12$ для нашей выборки тонких галактик недостаточно, чтобы почувствовать влияние относительной толщины на соотношение Талли-Фишера. Используя численное моделирование N-тел, Сотникова и Родионов [105] показали, что теоретическая зависимость

$$\frac{z}{h} \approx \frac{0.18}{1+\mu} \quad (2.2)$$

относительной толщины z/h и относительной массы сферического гало $\mu = M_{halo}/M_{disk}$ составляет нижний предел для модельных галактик. Это соотношение можно использовать для определения нижнего предела массы гало темной материи, однако даже для очень тонких галактик данное ограничение является слабым. Разброс модельных галактик является значительным. Таким образом, отсутствие относительной толщины в полученном многопараметрическом соотношении Талли-Фишера отражает сложный характер эволюции неустойчивостей диска в галактиках.

Многопараметрическое соотношение улучшает классическое соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра, примерно на 10%. Дисперсия многопараметрического соотношения Талли-Фишера составляет 0.32 зв.вел. в r- и i- фильтрах для галактик с $V_{max} \geq 91$ км/с. Для выборки из 971 RFGC галактик Kudrya et al. [97] нашли дисперсию многопараметрического соотношения Талли-Фишера $\sigma_{TF} = 0.42$ зв.вел., используя ближнюю ИК-фотометрию по данным 2MASS. Более высокий разброс данных обзора 2MASS может быть объяснен менее точной фотометрией. Это сопоставимо с наилучшими оценками соотношения Талли-Фишера для стандартных выборок галактик. Например, калибровка соотношения Талли-Фишера в проекте Cosmicflows дает дисперсию 0.4 зв.вел.

Пять ближайших “плоских” галактик, имеют точные измерения расстояния, основанные на методе TRGB. Это позволяет нам привязать нуль-пункт полученного нами соотношения Талли-Фишера к шкале расстояний TRGB. Поэтому галактики, видимые с ребра, являются хорошим инструментом для изучения коллективного движения галактик во Вселенной.

Использование многопараметрического соотношения Талли-Фишера для выборки галактик, видимых с ребра, позволило провести расчет значения постоянной Хаббла. Итоговое значение составляет $H_0 = 73.9 \pm 0.6$ км/с/Мпк.

3. Кинематика дисков и содержание газа в галактиках

3.1 О предполагавшейся связи темной материи с содержанием HI

3.1.1 Введение

Кривую вращения любой галактики можно интерпретировать в рамках различных предположений об относительной массе темной материи (DM) в галактике и ее пространственном распределении. При этом, если вращение внутренних областей дисков, как правило, может быть объяснено массой видимого вещества (см., например, [134]), то за пределами 2-3 радиальных шкал диска R_0 приходится учитывать присутствие темной материи. Масса DM, необходимая для объяснения кинематических свойств галактик, оказывается в большинстве случаев сопоставимой с массой наблюдаемых компонент уже в пределах оптического радиуса. Геометрия распределения DM при этом априори неизвестна.

Теоретически DM может быть заключена как в диске определенной толщины, так и в квазисферическом гало, хотя требования гравитационной устойчивости диска и ситуация с эллиптическими галактиками, обладающими DM в отсутствие диска, делают вариант с концентрацией DM в темном гало более обоснованным. При этом существование массивного темного гало согласуется как с фотометрически найденными отношениями масса-светимость (M/L) звездных дисков (см., например, [135], [136]), так и с численными космологическими моделями формирования галактик в поле темного гало. Однако, в силу того, что нет возможности непосредственно наблюдать распределение этой темной материи, вопрос о ее пространственной структуре остается открытым, а вопрос о присутствии значительной массы DM в диске остается предметом активных обсуждений. Существуют сценарии, при которых темное вещество может концентрироваться в плоскости диска, что происходит, например, при слиянии галактик или приливном разрушении спутников, содержащих DM, в поле диска (см., например, [137]). Заметим, что оценки плотности DM в диске Галактики (в окрестности Солнца) дают для нее низкие значения по сравнению с плотностью видимых компонент (см., например, [138]).

Поскольку оптические наблюдения галактик, как правило, ограничены внутренними яркими частями, важную роль играет получение и интерпретация данных по распределению HI. Излучение нейтрального водорода может быть зарегистрировано на большом интервале расстояний от центра галактики, и измерения в линии 21 см

предоставляют огромный объем информации как о содержании газа, так и о динамических и кинематических параметрах галактик.

Как следует из Главы 2, введение дополнительно параметра, связанного с массой нейтрального водорода, играет важную роль в повышении точности соотношения Талли-Фишера. Само по себе классическое соотношение Талли-Фишера отражает связь барионной составляющей (светимости) с содержанием темной материи (скорость вращения). Поэтому нельзя исключить, что существует некоторая теоретическая зависимость между темной материей в галактике и содержанием HI. О возможности подобной связи говорилось в работах ряда авторов. Подробнее об этом речь пойдет в 3.1.2. Но независимо от ее существования, анализ распределения нейтрального водорода (см. ниже) важен для понимания структуры и эволюции дисков.

3.1.2 История вопроса

Попытка объяснить кривые вращения галактик в рамках ньютоновской гравитации темной материей в диске без привлечения темного гало была впервые предпринята Bosma [1]. Основываясь на радиальном распределении темного компонента и радиальной поверхностной плотности HI, им было высказано предположение, что темное вещество в диске связано с газовой компонентой, и что во многих случаях форма протяженной кривой вращения воспроизводится без темного гало, если допустить, что вся, или, по крайней мере, существенная часть DM находится не в гало, а в диске, а ее поверхностная плотность меняется вдоль радиуса пропорционально поверхностной плотности HI, хотя в несколько раз может ее превышать. Ниже будем называть модели, основанные на предположении о связи DM с HI, моделями с тяжелым газом. Позднее вывод Bosma был повторен рядом других авторов для галактик различных типов [139-145].

Подобные рассуждения позволили Pfenniger et al. [146-147] выдвинуть предположение о природе темной материи в спиральных галактиках, представляя ее как среду из небольших плотных облаков молекулярного водорода, слишком холодных, чтобы обнаружить их излучение, а потому непосредственно не наблюдаемых, пространственное распределение которых коррелирует с наблюдаемым распределением HI (хотя причина такой корреляции отнюдь не является очевидной).

Дальнейшие попытки объяснения формы наблюдаемых кривых вращения, исходя из предположения о пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и HI, были предприняты Hoekstra et al. [143]. Авторы исследовали 24 спиральные и карликовые галактики различных поверхностных яркостей с надежно измеренными кривыми вращения. Полученные модели дали результаты, совместимые с

наблюдательными данными, хотя коэффициент пропорциональности между колонковыми плотностями (в проекции на плоскость диска) Σ_{HI} и Σ_{DM} сильно различались для разных галактик.

Возможность интерпретации кривых вращения галактик различных морфологических типов в рамках модели диска с тяжелым газом (baryonic scaling model) была также рассмотрена в работе [145] для 43-х дисковых галактик различных морфологических типов. Было подтверждено, что для большинства галактик наблюдаемые кривые вращения могут быть удовлетворительно воспроизведены в модели диска с тяжелым газом в предположении постоянства масштабного фактора, определяемого как отношение полной плотности среды, связанной с HI, к наблюдаемой плотности нейтрального водорода $\frac{\Sigma_{g+DM}}{\Sigma_{HI}} = \eta$ для каждой отдельно взятой галактики. При этом масштабный фактор (scaling factor) также оказался различным для разных галактик: полученные оценки характеризуются значительным разбросом его значений (от 4 до 20 и выше). Примечательно, что для спиральных галактик поздних типов, содержание HI в которых в среднем выше, это отношение оказывается систематически ниже, а согласие модельной кривой вращения с наблюдаемой лучше, чем для ранних типов. Позднее мы вернемся к этому вопросу.

3.1.3 Проверка существования связи между DM и HI по данным THINGS

В 2008 г. были опубликованы результаты измерений протяженных кривых вращения в линии HI и радиальные профили поверхностной плотности газа, полученные для девятнадцати сравнительно близких галактик по наблюдениям на VLA (обзор THINGS - The HI Nearby Galaxy Survey [4]). Высокое пространственное разрешение THINGS вместе с измерениями профилей яркости в ближней ИК-области по данным SINGS (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey) позволили построить точные кривые вращения галактик и выделить их дисковый компонент. Эти данные открывают широкие возможности для проверки гипотезы о связи между темной материей и HI в галактиках различных масс и светимостей. Помимо этого, для некоторых галактик из обзора THINGS имеются данные по распределению поверхностной плотности звезд и газа, а также дисперсии скоростей звезд [148–152]. Таким образом, становится возможным не только проверить идею, выдвинутую Bosma, но и проверить, насколько она согласуется с требованием гравитационной устойчивости галактических дисков.

Для проверки гипотезы о тяжелом газе, в нашей работе [153] были рассмотрены 15 галактик из обзора THINGS [135], форма кривых вращения которых определяется наиболее уверенно. К этим галактикам прибавлена также карликовая галактика NGC 6822 с длинной

кривой вращения (по работе [154]). Оптические характеристики рассмотренных галактик представлены в таблице 3.1.

При отсутствии гало модельная кривая кругового вращения в модели с тяжелым газом может быть представлена как сумма составляющих, относящихся к различным компонентам диска:

$$V_{tot}^2 = \left(\frac{\Sigma_{DM}}{\Sigma_{HI}} + 1 \right) V_{HI}^2 + V_{disc}^2 + V_{bulge}^2, \quad (3.1)$$

где Σ_{DM} – поверхностная плотность темного вещества в диске, Σ_{HI} – поверхностная плотность HI; V_{disc} и V_{bulge} относятся к составляющим скорости вращения, связанным со звездными компонентами – основным диском и внутренним диском (или балджем), соответственно.

Были использованы составляющие кривой вращения, обусловленные звездными компонентами галактики, полученные в [135] на основании распределения яркости галактик на 3.6 мкм по данным SPITZER. Зная кривую вращения галактики и плотности ее компонент, связанных со звездами и газом, можно найти интересующий нас коэффициент пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и HI, при котором модельная кривая вращения “вписывается” в наблюдаемую с минимальным среднеквадратичным отклонением (best fit model), при этом для оценки плотности звездного диска отношение $M/L_{3.6\mu m}$ в модели принималось постоянным вдоль радиуса.

Результаты моделирования показали, что предположение о том, что в пределах одной галактики

$$\frac{\Sigma_{DM}}{\Sigma_{HI}} \approx const \quad (3.2)$$

в большинстве случаев действительно позволяет удовлетворительно объяснить кривую вращения. В качестве примера на Рис. 3.1 и 3.2 приведены результаты моделирования $V(R)$ для галактик NGC 6946 и NGC 925. Однако есть исключения: для галактик NGC 2841, NGC 3521 и NGC 3621 такой подход не позволяет адекватно описать имеющиеся данные, и при любом коэффициенте пропорциональности $\frac{\Sigma_{DM}}{\Sigma_{HI}}$ дает существенное расхождение между формами наблюдаемой и модельной кривых вращения (для примера, на Рис. 3.3 приведены наблюдаемая и модельная кривые вращения для галактики NGC 2841).

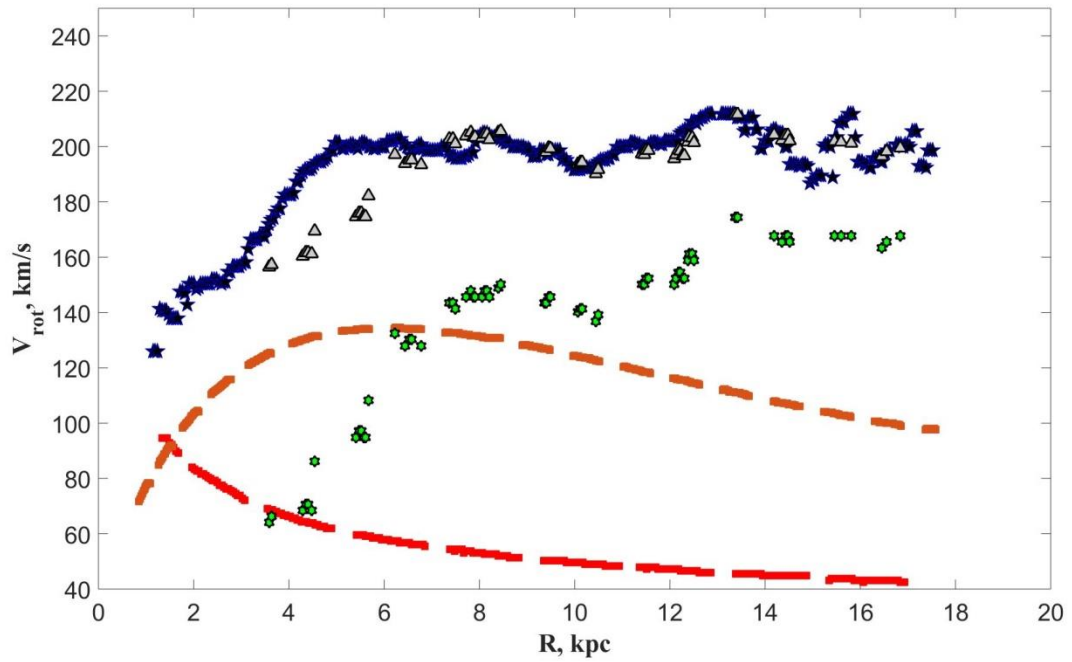


Рис. 3.1. Кривая вращения и ее составляющие для галактики NGC 6946. Черно-синие пентаграммы — наблюдаемая кривая вращения; штриховые красные линии с длинным и коротким штрихом — составляющие кривой вращения, связанные со звездными компонентами (балдж и диск, соответственно); черно-зеленые гексаграммы — компонент, относящийся к диску, состоящему из газа и темного вещества; треугольники — модельная кривая вращения.

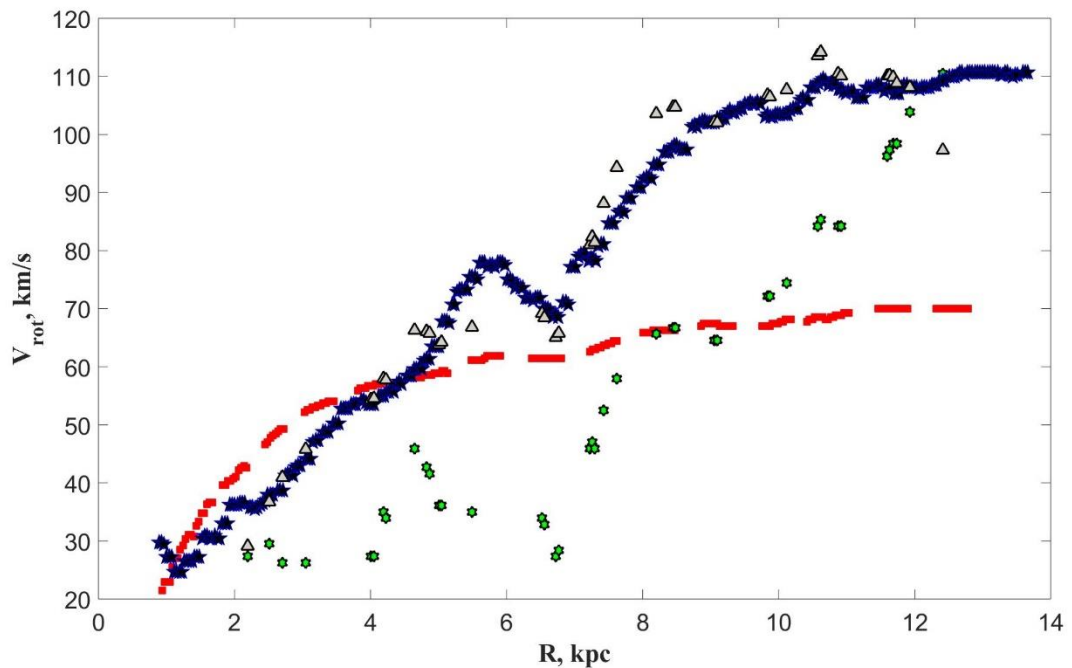


Рис. 3.2. То же, что на Рис. 3.1, для галактики NGC 925. Кривая вращения согласуется с моделью “тяжелого” газа.

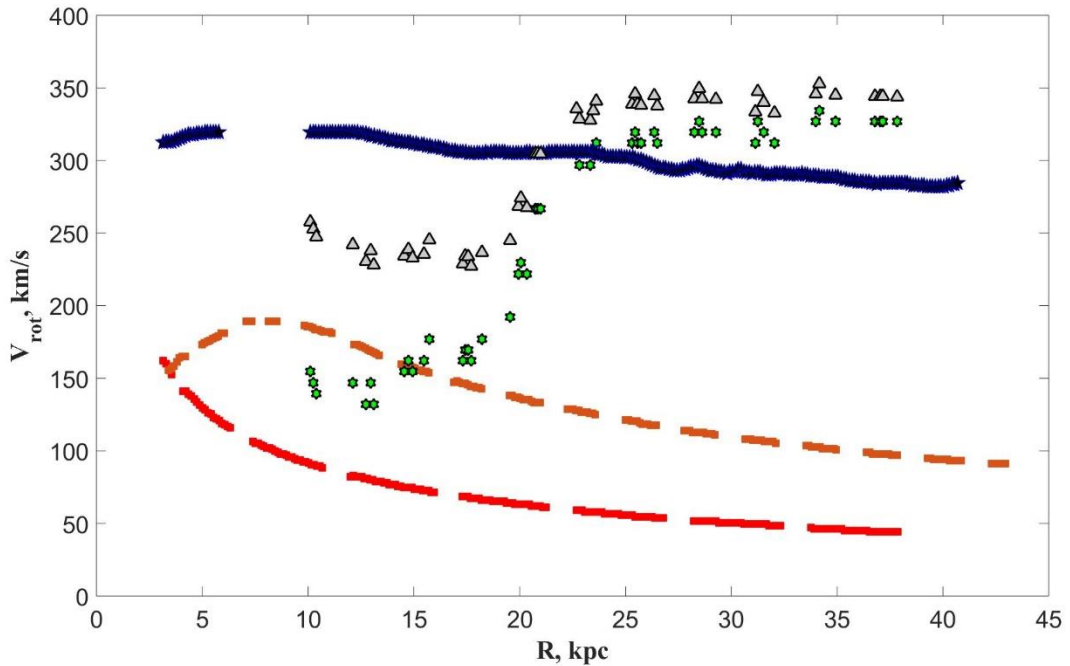


Рис. 3.3. То же, что на Рис. 3.1, для галактики NGC 2841. Кривая вращения не получает удовлетворительного объяснения.

Также были рассмотрены варианты модели тяжелого газа, где считалось, что Σ_{DM}/Σ_{HI} монотонно изменяется с расстоянием от центра, следуя параболическому или экспоненциальному закону. В таблице 3.2 представлены найденные значения параметра Σ_{DM}/Σ_{HI} , полученные для “оптимальных” моделей кривой вращения. Как можно видеть из таблицы, далеко не для всех галактик модель “тяжелого” газа дает удовлетворительное объяснение наблюдательных данных. Более того, даже в тех случаях, когда возможно достичь согласия между наблюдаемой и модельной кривыми вращения, нет никакой явной корреляции между величиной масштабного фактора Σ_{DM}/Σ_{HI} и глобальными параметрами этих галактик. Для сравнения даны вычисленные значения Σ_{DM}/Σ_{HI} по работе Hoeskstra et al. [143]. Проверка в столбце Σ_{DM}/Σ_{HI} , означает, что форма кривой вращения не объясняется в рамках принятой модели. Полученные отношения Σ_{DM}/Σ_{HI} в ряде случаев заметно расходятся с результатами работы [143], оставаясь почти во всех случаях близкими к последним в пределах коэффициента 1.5-2. Основная причина различия заключается в различных исходных данных. В работе [143] использовались кривые вращения, полученные со значительно меньшим угловым разрешением, а распределение плотности считалось пропорциональным яркости в полосе R , где ослабление света более существенно, чем на 3.6 мкм.

Однако, учет HI, масса которого берется с “подгончным” коэффициентом, еще ничего не говорит о реальной физической связи между HI и темной материей.

Таблица 3.1. Рассматриваемые галактики.

1	2	3	4	5
Галактика	Тип	$(B - V)_0$	Структура	M_B
NGC 925	Scd	0.44	Бар	-20.08
NGC 2403	SABc	0.37	Бар	-19.65
NGC 2841	Sb	0.79	Кольцо	-20.84
NGC 2903	SABb	0.57	Бар	-20.92
NGC 2976	Sc	0.54	-	-18.11
NGC 3031	Sab	0.82	-	-21.54
NGC 3198	Sc	0.42	Бар	-20.48
NGC 3521	SABb	0.70	Бар	-21.07
NGC 3621	SBcd	0.46	Бар	-20.52
NGC 4736	Sab	0.72	Кольцо	-20.82
DDO 154	Irr	0.27	Бар	-11.91
NGC 5055	Sbc	0.66	-	-21.20
NGC 6822	dIrr	0.50	Бар	-18.36
NGC 6946	SABc	0.33	Бар	-20.89
NGC 7331	Sbc	0.70	-	-21.56
NGC 7793	Scd	-	-	-18.89

Примечание. В колонках приведены: (1) – название галактики; (2) – морфологический тип галактики; (3) – показатель цвета $(B - V)_0$; (4) – наличие бара или кольца; (5) – абсолютная звездная величина в фильтре B .

Таблица 3.2. Соотношение плотностей темной материи и HI.

1	2	3
Галактика	Σ_{DM}/Σ_{HI}	Σ_{DM}/Σ_{HI} по [143]
NGC 925	19.3	-
NGC 2403	14.9	9.5
NGC 2841	-	23
NGC 2903	30.1	37
NGC 2976	11.4	-
NGC 3031	3.0	-
NGC 3198	10.5	12.5
NGC 3521	-	-
NGC 3621	-	-
NGC 4736	5.3	-
DDO 154	4.7	8
NGC 5055	16.6	-
NGC 6822	11.8	-
NGC 6946	3.5	4.5
NGC 7331	6.8	8
NGC 7793	14.3	-

3.2 Нейтральный водород и устойчивость

3.2.1 Как обойтись без “тяжелого” газа

Покажем, что пропорциональность плотностей темной материи в диске и HI, по-видимому, является артефактом и отражает то обстоятельство, что поверхностная плотность водорода $\Sigma_{HI}(R)$, ограниченная условием гравитационной устойчивости газового слоя, уменьшается с расстоянием R от центра галактики значительно медленнее, чем поверхностная плотность звездного диска, имитируя тем самым вклад реально существующего темного гало, поскольку его плотность спадает с ростом R также медленнее, чем у диска. К примеру, объемная плотность псевдоизотермического гало, используемого для объяснения плато на кривой вращения, на больших расстояниях от центра убывает как R^{-2} , чему соответствует убывание колонковой плотности примерно как R^{-1} , в то время как поверхностная яркость (плотность) звездного диска падает с ростом R значительно быстрее (по экспоненциальному закону). Следовательно, введение в модель

галактики дополнительного дискового компонента с пологим радиальным профилем плотности формально также может объяснить высокую скорость вращения на больших R .

Рассмотрим подробнее, как меняется азимутально усредненная плотность газового слоя вдоль R , и какая форма “газовой” составляющей кривой вращения соответствует радиальному профилю плотности. За исключением центральных областей дисков, которые для нашей задачи не столь важны, в межзвездном газе обычно преобладает атомарный водород HI, и можно принять, что его поверхностная плотность пропорциональна полной плотности газа, то есть $\Sigma_{HI} \sim \Sigma_g$. При этом обратим внимание на важное обстоятельство: при наблюдаемой дисперсии скоростей турбулентных движений газа $c_g \sim 8-12$ км/с поверхностная плотность газа не может быть очень высокой, поскольку она ограничена сверху условием гравитационной устойчивости газового слоя. В противном случае, если плотность газа выше критической, развитие неустойчивости приведет к возрастанию некруговых скоростей газа и, как следствие, к изменению темпа звездообразования и энерговыделения, пока слой межзвездного газа не проэволюционирует к квазиравновесному гравитационно устойчивому состоянию. В принципе, состояние критической (маргинальной) устойчивости газового слоя может относиться как к текущему моменту, так и к той прошлой эпохе, когда диск стал устойчивым, и звездообразование замедлилось (этот вопрос подробнее рассматривается в разделах 3.3.3 и 3.3.5).

Наблюдаемое распределение поверхностной плотности газа $\Sigma_g(R)$ в галактиках можно сравнить с распределением критической плотности

$$\Sigma_{crit} \sim \left(\frac{1}{Q_{c,g}} \right) \left(\frac{\pi c_g \Sigma_g}{\kappa} \right), \quad (3.3)$$

соответствующей маргинальной устойчивости к гравитационным возмущениям в плоскости диска (см., например, [149], [155-157] и ссылки на более ранние работы). Здесь $Q_{c,g}$ - параметр устойчивости по Тумре, равный единице для чисто радиальных возмущений тонкого диска, а κ - эпициклическая частота, равная $\sqrt{2V/R}$ для плоской кривой вращения. Сравнение $\Sigma_{crit}(R)$ и $\Sigma_g(R)$ показывает, что, как правило, $\Sigma_g(R)$ в широком интервале R остается близкой (с точностью до фактора 1.5-2) к $\Sigma_{crit}(R)$, либо меняется примерно параллельно $\Sigma_{crit}(R)$, хотя из этого правила есть и исключения. На периферии дисков отношение Σ_g/Σ_{crit} , как правило, уменьшается, однако следует принять во внимание, что при оценке $\Sigma_{HI}(R)$ дисперсия скоростей газа обычно считается постоянной, в то время как на больших R она, хотя и медленно, но падает с удалением от центра [135], что приближает внешние области диска к границе устойчивости. Таким образом, отношение Σ_g/Σ_{crit}

действительно во многих случаях оказывается медленно меняющимся на большом интервале R , хотя очень далекие области газового слоя определенно устойчивы из-за низкой плотности.

В карликовых неправильных галактиках отношение Σ_g/Σ_{crit} , как правило, меньше единицы, и остается либо почти постоянным с R , либо (чаще) проходит через максимум и падает к периферии диска [158-159]. В меньшей степени, условие $\Sigma_g/\Sigma_{crit} = const$ применимо к галактикам ранних типов S0-Sab [160], где практически во всех случаях $\Sigma_g/\Sigma_{crit} < 1$ как в центральной области, так и на периферии диска. Поэтому не удивительно, что, как отмечалось выше, модель с “тяжелым” газом плохо объясняет кривые вращения галактик этих типов.

Более аккуратные оценки $\Sigma_{crit}(R)$ должны учитывать дестабилизирующее влияние звездного диска. Расчет устойчивости газового слоя с учетом гравитации звездного диска (по работе Рафикова [161]), выполненный для ряда спиральных галактик в работе Leger et al. [149], показал, что отношение Σ_g/Σ_{crit} слабее меняется с R , чем полученное без учета звездного диска: газовые диски оказываются устойчивыми, но находятся, как правило, вблизи границы устойчивости (см. Рис. 9 из [149]). Таким образом, радиальное распределение HI в галактиках во многих случаях оказывается связанным (через условие устойчивости) со скоростью вращения диска, что не учитывается в модели с “тяжелым” газом.

Рассмотрим простейший пример, иллюстрирующий форму составляющей кривой вращения, связанной с газом, плотность которого равна или пропорциональна критической плотности.

Пусть галактика имеет плоскую кривую вращения, а плотность газового слоя близка к критической. В этом случае $\kappa = \sqrt{2V/R}$, и, если пренебречь изменениями c_g и $Q_{c,g}$ вдоль радиуса, то плотность газа $\Sigma_g \sim \Sigma_{crit} \sim 1/R$. Диск с таким распределением плотности носит название диска Местеля. Ему действительно соответствует плоская кривая вращения такая же, как для псевдоизотермичного гало. Поэтому не удивительно, что в модели с “тяжелым” газом, в которой плотность газа искусственно увеличивается на некоторый коэффициент, воспроизводится плато на кривой вращения.

Менее очевидна ситуация, когда скорость вращения не выходит на плато, а продолжает расти, либо уменьшаться на больших R , поскольку даже в этих случаях кривая вращения удовлетворительно описывается в модели с “тяжелым” газом. Несложно, однако, показать, что, если скорость вращения галактики возрастает или уменьшается с ростом R , то такое же поведение кривой вращения следует и в модели диска с “тяжелым” газом, если

также, как и для плоской кривой вращения, принять, что $\Sigma_g \sim \Sigma_{crit} \sim \kappa$, а $Q_{c,g}$ не сильно меняется вдоль радиуса. Для иллюстрации, на Рис. 3.4 и 3.5 сглаженные кривые вращения галактик NGC 2976 (растущая кривая) и NGC 4736 (падающая кривая) по обзору THINGS [135], сравниваются по форме (масштаб произволен) с кривыми вращения, ожидаемыми для диска с распределением плотности $\Sigma_{disc} \sim \kappa$. При построении модельной кривой вращения, соответствующей данному радиальному профилю плотности, использовался метод Касертано [162] (программа GR3, автор А.Н. Бурлак) для диска конечной толщины, принимавшейся для определенности равной ~ 0.5 кпк. Как следует из приведенных рисунков, условие $\Sigma_g \sim \Sigma_{crit}$ качественно объясняет форму кривых вращения, даже если они не выходят на плато.

В следующем разделе на примере конкретных галактик мы более подробно рассмотрим модель “тяжелого” газа и покажем, почему она, несмотря на свою “нефизичность” дает удовлетворительные результаты при моделировании кривых вращения.

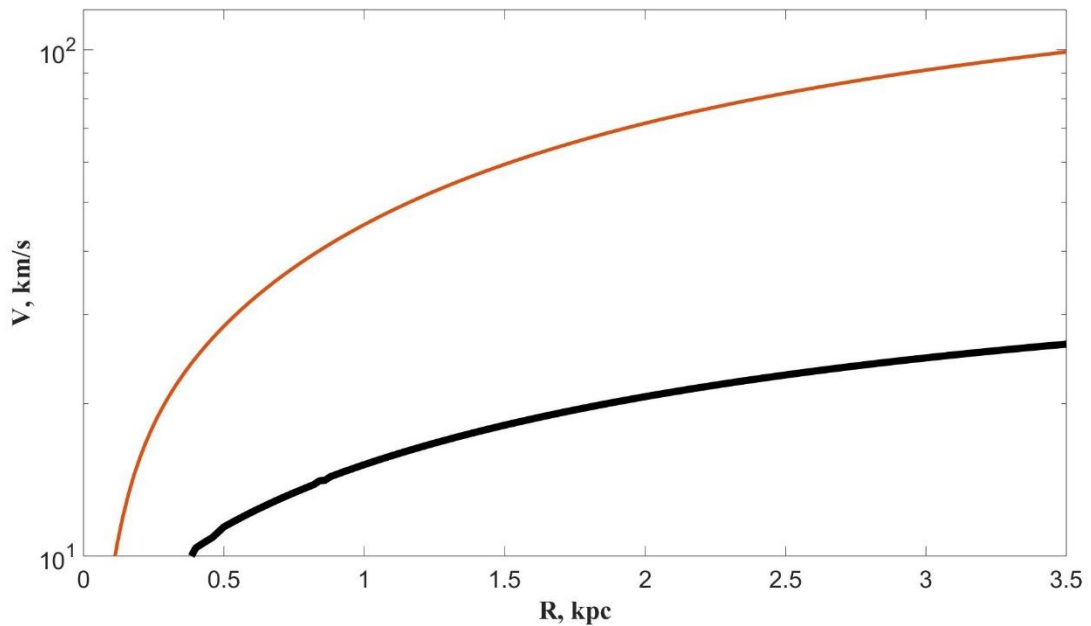


Рис. 3.4. Тонкая красная линия пример растущей кривой вращения (сглаженная кривая для NGC 2976 по [135]); толстая черная линия кривая вращения, соответствующая условию $\Sigma_{disc} \sim \kappa$ (масштаб произволен). Рисунок показывает, что форма не только плоской, но и растущей кривой вращения похожа на ожидаемую при распределении плотности диска, меняющейся пропорционально эписциклической частоте при отсутствии гало.

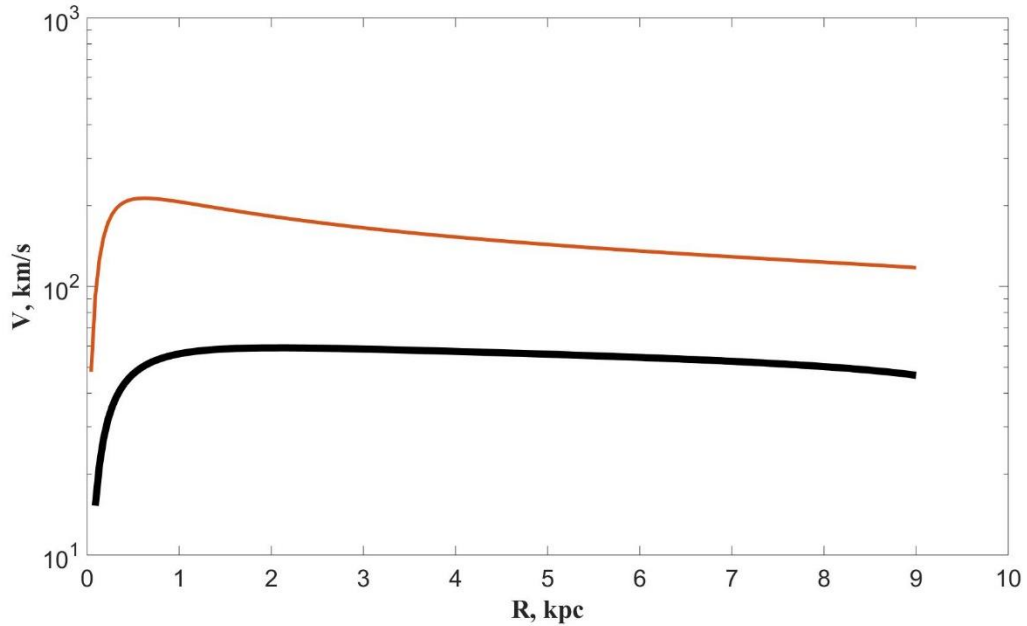


Рис. 3.5. Кривые, аналогичные приведенным на Рис. 3.4, для галактики с убывающей скоростью вращения (NGC 4736). Рисунок показывает, что форма спадающей кривой вращения также может быть объяснена, если распределение плотности диска пропорционально эпициклической частоте при отсутствии гало.

3.2.2 Сравнение моделей с “тяжелым” газом и темным гало

Рассмотрим выборку, которая включает как спиральные галактики нормальной яркости, с известными кривыми вращения, и радиальными профилями распределения HI по обзору THINGS ([135], модели которых были получены ранее (см. 3.1.3 и таблицу 3.2), так и галактики низкой яркости (LSB-галактики). Последние, как правило, обладают более высоким отношением массы водорода к массе звездного населения диска, и, если невидимая масса в галактиках связана с HI, то ее проявление в динамике диска должно быть особенно заметным. Для LSB-галактик кривые вращения и их составляющие, связанные с HI и звездным диском, как и радиальные профили Σ_{HI} , были взяты из работы [163]. Как и в случае галактик нормальной яркости, отношение M/L звездных дисков для каждой галактики считалось постоянным.

По методике, описанной в 3.1.3. для каждой галактики нами рассчитывалась кривая вращения, соответствующая двухкомпонентной модели галактики. Масштабный фактор для модели с тяжелым газом рассматривался как свободный параметр.

По результатам моделирования можно разделить галактики на три подгруппы в зависимости от того, насколько хорошо модель с “тяжелым” газом воспроизводит наблюдаемую кривую вращения (см. таблицу 3.3). Будем считать (достаточно условно), что имеет место примерное соответствие модельной и наблюдаемой (сглаженной) кривых вращения, если различие между ними не превышает 30% в указанном в таблице интервале

радиальных расстояний. К первой группе отнесем галактики, где модель объясняет кривую вращения лишь в пределах $\sim(1 - 2)R_0$, где R_0 - радиальная шкала яркости (в полосе В). Вторую группу образуют галактики, где соответствие модельной и наблюдаемой кривой вращения можно считать удовлетворительным на большом интервале $R = (1 - 4)R_0$, а третью - где модель тяжелого диска не объясняет наблюдаемую форму кривой.

Рассмотрим в качестве иллюстрации примеры кривых вращения для галактик каждой группы. На Рис. 3.6 для галактики NGC 925 (соответствие модели с “тяжелым” газом можно добиться лишь для внутренней области диска) приведены наблюдаемая кривая вращения (пентаграммы), газовая и звездная составляющие кривой вращения по [135] (точки и пунктир соответственно), и кривая вращения для модели тяжелого диска (треугольники). Удовлетворительное согласие между наблюдаемой и модельной кривой имеет место для $R < 10$ кпк. На Рис. 3.7 для этой галактики показано изменение значений Q_g и Q_{sg} вдоль радиуса (по [149]) (без тяжелого газа). Параметр устойчивости Q_{sg} , полученный с учетом звездного диска, в пределах $2R_0 \sim 8$ кпк меняется менее чем на 30%. На Рис. 3.8 и 3.9 приведены аналогичные зависимости для галактики из группы II (DDO 154), для которой модель с “тяжелым” газом считалась соответствующей наблюдениям на интервале $R \sim 0.8-3.2$ кпк. На Рис. 3.10 и 3.11 представлена галактика низкой яркости F568-3, для которой рассматриваемая модель плохо описывает наблюдаемую кривую вращения. Это не удивительно, поскольку для нее Q_g меняется в очень широких пределах, и везде газовый слой имеет большой запас устойчивости.

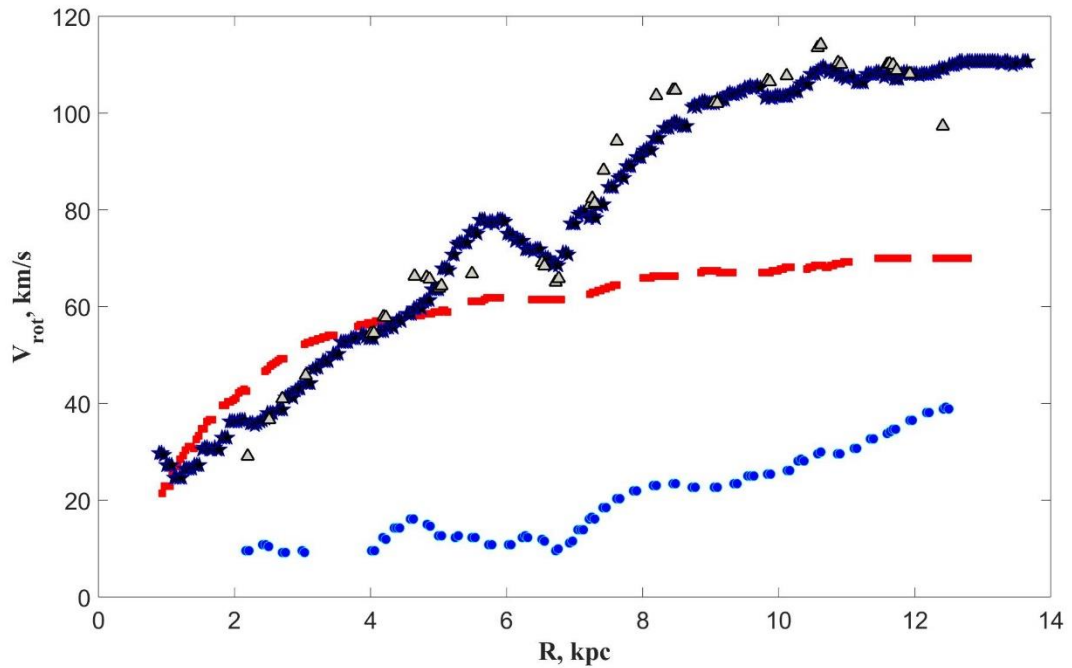


Рис. 3.6. Кривая вращения NGC 925 и ее компоненты (по [135]). Синие круги - компонент кривой вращения, связанный с газовой, а красный пунктир - со звездной составляющей. Черно-синие пентаграммы - наблюдаемая кривая вращения. Треугольники - кривая вращения в модели с тяжелым газом.

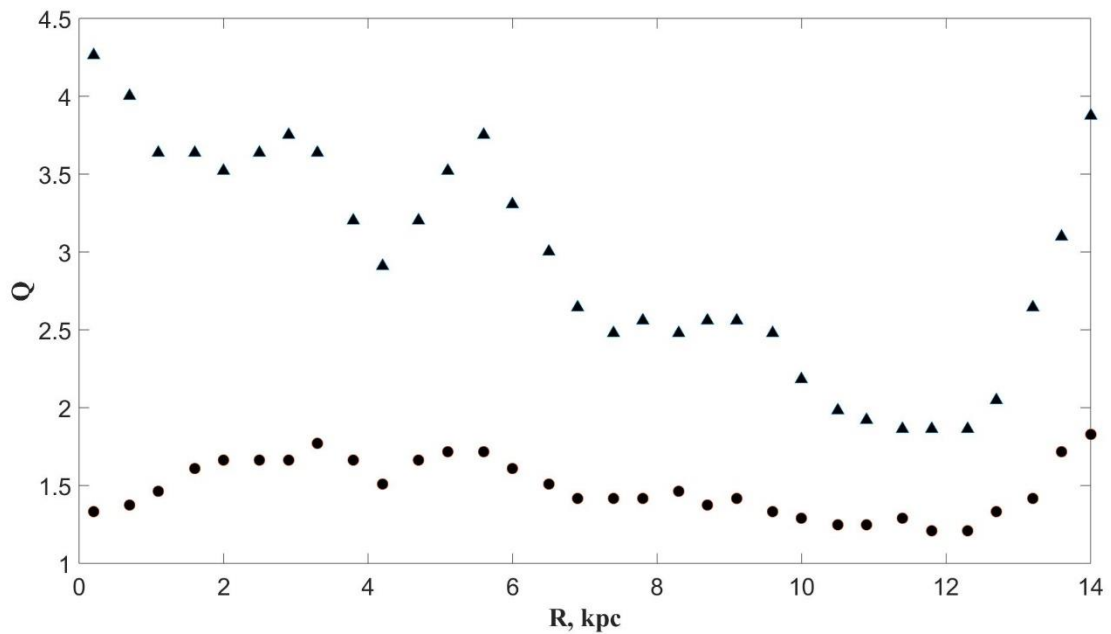


Рис. 3.7. Параметр гравитационной устойчивости для газового слоя NGC 925 без учета (треугольники) и с учетом звездного диска (точки).

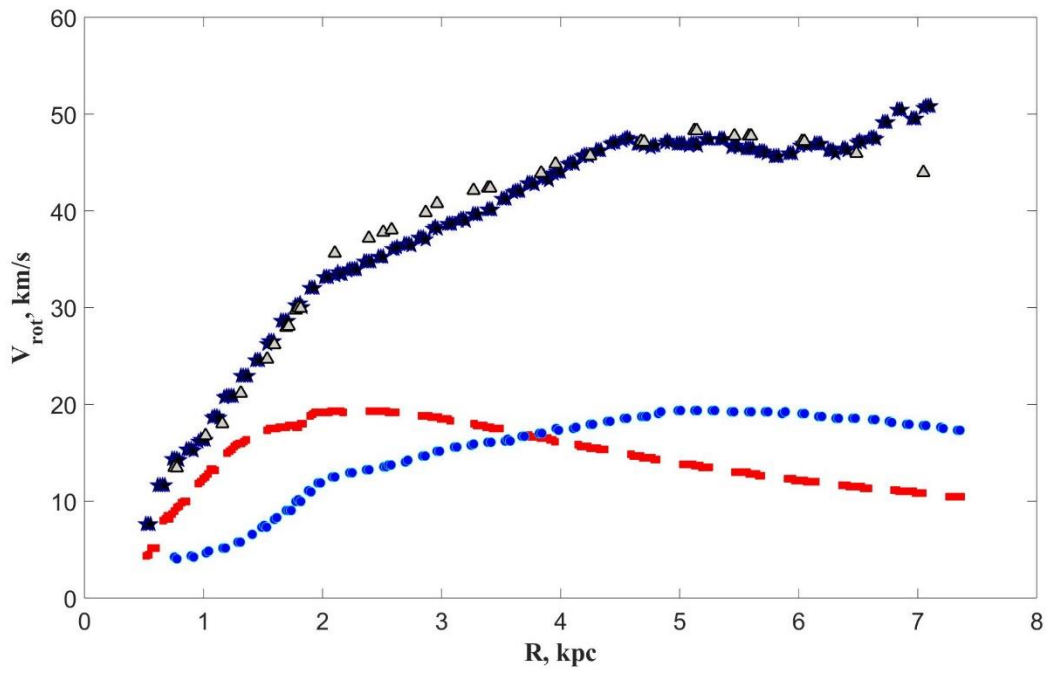


Рис. 3.8. Кривая вращения DDO 154. Обозначения аналогичны Рис. 3.6. Форма кривой хорошо описывается в модели с тяжелым газом.

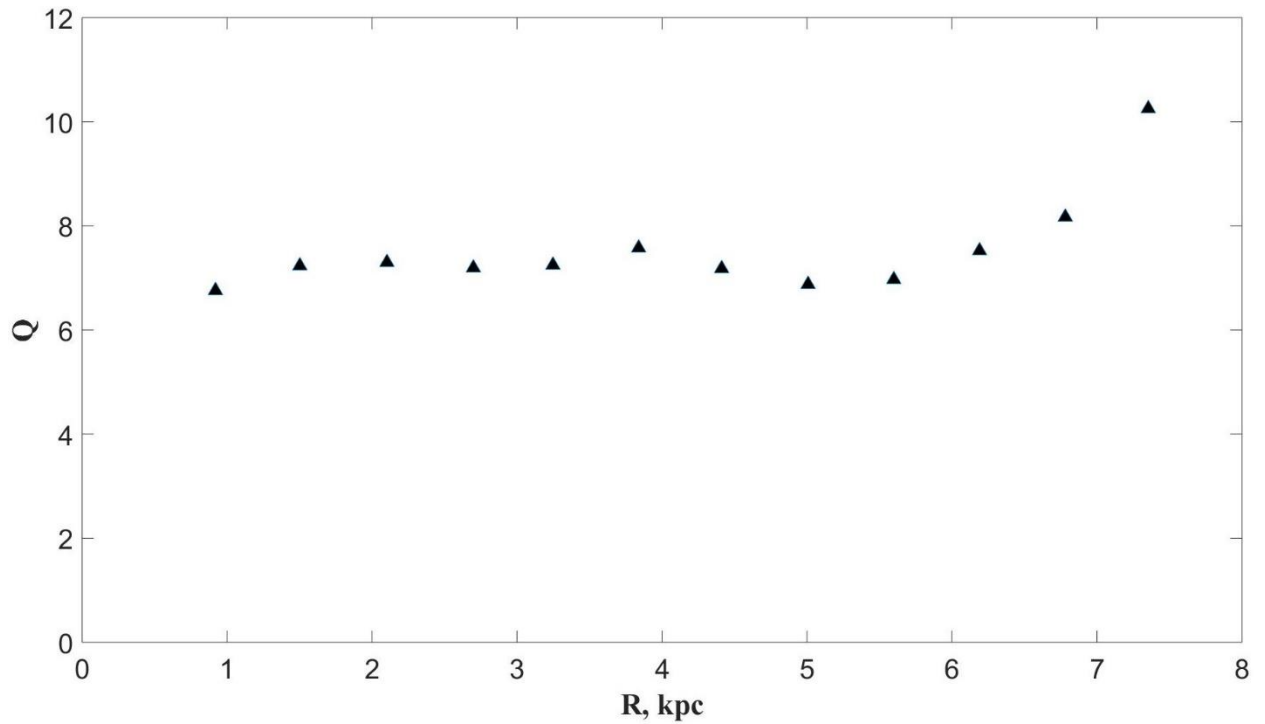


Рис. 3.9. Параметр гравитационной устойчивости Q_g для газового слоя DDO 154.

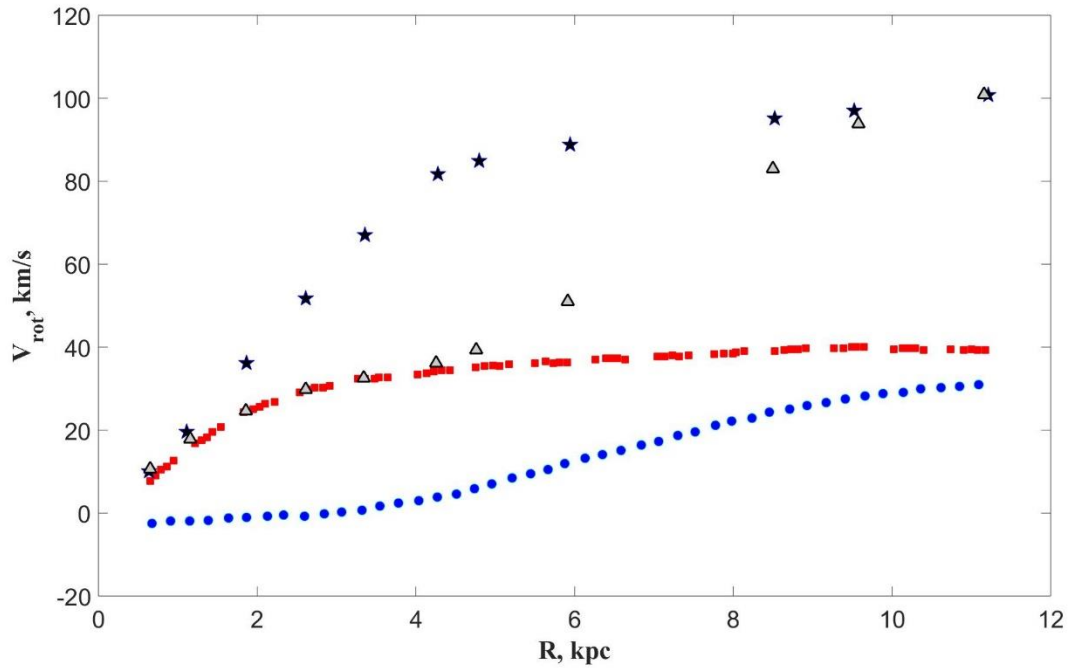


Рис. 3.10. Кривая вращения F568-3 и ее компоненты (по [163]). Обозначения аналогичны Рис. 3.6. Форма кривой не описывается в модели с “тяжелым” газом (треугольники).

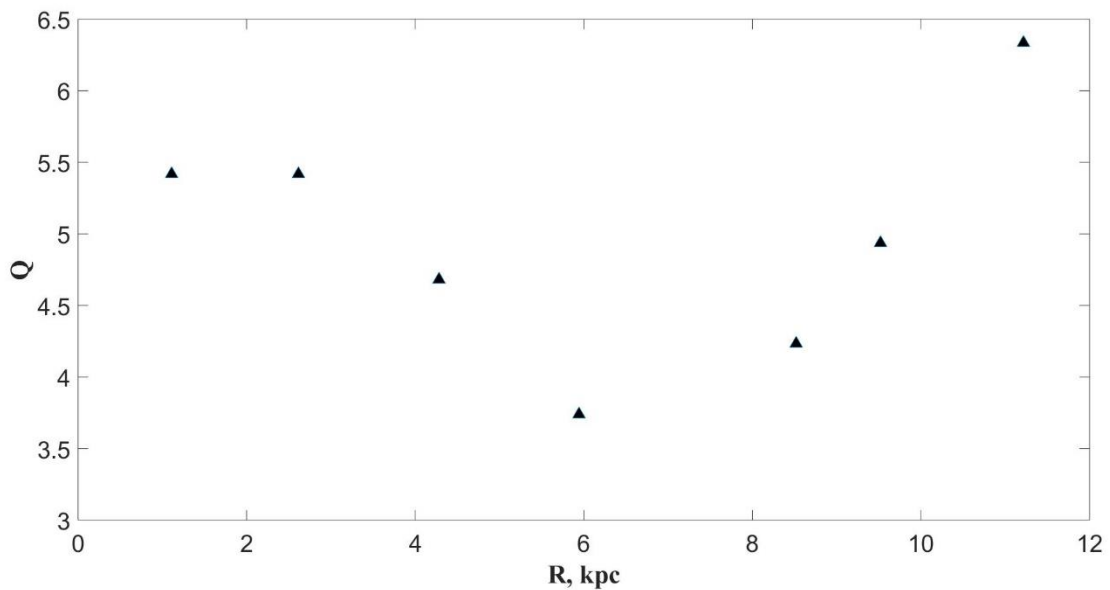


Рис. 3.11. Параметр гравитационной устойчивости Q_g для газового слоя F568-3 характеризуется большим интервалом значений. Газовый слой везде гравитационно устойчив.

В таблице 3.3 для всех трех групп приведены также интервалы параметра устойчивости газового слоя (наблюдаемого, а не тяжелого) для указанного интервала R как без учета влияния звездного диска (Q_g), так и с его учетом (Q_{sg}). Значения последнего параметра взяты из работы [149], в которой для его определения использовались косвенные оценки дисперсии скоростей звезд для равновесного звездного диска в предположении

постоянной толщины диска. Для остальных галактик параметры устойчивости были получены нами для дисперсии скоростей газа $c_g = 11$ км/с.

Таблица 3.3. Интервал значений Q_g , Q_{sg} для рассмотренных галактик.

Галактика	R_0 , кпк	Q_g	Q_{sg}
Группа I (модель соответствует наблюдениям частично)			
NGC 925	4.1 [149]	2.5-3.8	1.5-1.7
NGC 2976	0.9 [149]	8.9-12.2	1.6-2.0
NGC 3109	4.0 [142]	2.9-3.3	-
Группа II (модель соответствует наблюдениям)			
NGC 1560	1.3 [164]	1.1-1.6	-
NGC 2366	1.59 [165]	1.3-1.9	-
NGC 2403	1.6 [149]	4.4-10.4	1.7-2.7
NGC 3741	0.16 [166]	3.3-3.8	-
NGC 6946	2.5 [149]	1.8-7.03	1.2-1.9
NGC 7793	1.3 [149]	3.99-8.71	1.5-2.1
IC 2574	2.1 [165]	1.5-2.7	1.1-2.3
DDO 154	0.8 [149]	6.8-7.2	-
F563-1	3.2 [163]	4.4-5.7	-
F571-8	2.8 [163]	2.0-2.7	-
Группа III (модель не объясняет кривую вращения)			
NGC 3521	2.7 [149]	1.8-7.4	1.1-2.3
NGC 5055	3.2 [149]	0.3-3.0	0.9-2.9
NGC 5585	1.4 [167]	4.1-7.8	-
F568-V1	3.8 [163]	4.6-11.3	-
F568-3	3.0 [163]	3.7-6.3	-
F574-1	3.5 [163]	5.0-9.8	-
F579-V1	3.1 [163]	6.2-11.3	-
F583-1	1.2 [163]	3.7-7.6	-

Примечание. значения радиальной шкалы диска R_0 в В -диапазоне взяты из литературы (см. соответствующие ссылки).

Как видно из таблицы 3.3, из тех тринадцати галактик (Группы I и II), где модель с тяжелым газом не входит в очевидный конфликт с наблюдениями, лишь в трех случаях (NGC 2403, NGC 6946 и NGC 7793) значения параметров устойчивости реального газа значительно изменяются (на 30% и более) в указанном интервале R , то есть в основном для этих галактик Q_g мало меняется на большом радиальном протяжении. При этом, оценки Q_{sg}

(если они имеются) заключены в более узких пределах, чем Q_g . Однако, в тех случаях, когда модель тяжелого диска не проходит (Группа III), значения параметров устойчивости меняются в очень широком интервале. Иными словами, распределение азимутально усредненной плотности газа в них нельзя считать пропорциональным $\Sigma_{crit}(R)$, что, по-видимому, и является причиной плохого соответствия модели с “тяжелым” газом с наблюдаемой кривой вращения этих галактик.

Таким образом, хотя модель с “тяжелым” газом, действительно, удовлетворительно объясняет кривую вращения, но это имеет место только тогда, когда реальный, а не гипотетический газ распределен в соответствии с $Q \sim const$, то есть объяснение кривой вращения в рамках этой модели всего лишь следствие того, что плотность реального газового слоя на большом протяжении остается близкой к условию маргинальной устойчивости.

Парадокс “тяжелого” газа получает объяснение.

Заметим, что после публикации нашей работы к аналогичным вводам независимо пришли авторы работы Meurer et al. [168].

3.2.3 Сравнение модельных толщин дисков с наблюдениями

Еще один аргумент против гипотезы “тяжелого” газа связан с тем, что тяжелый диск оказывается неприемлемо толстым. Рассмотрим это на примере конкретных галактик.

В работе [149] на основе результатов THINGS [4], а также имеющихся данных по распределению H_2 и фотометрии на 3.6 мкм (SINGS) приведены радиальные профили поверхностных плотностей звездного диска и газа для галактик NGC 2841, NGC 2976, NGC 3198, NGC 3521, NGC 4736, NGC 5055, NGC 6822, NGC 7331 и NGC 7793. Эти данные были использованы нами для оценки дисперсии скоростей населения диска c_r^{crit} , необходимой для устойчивости диска в рамках модели, где плотность темного вещества пропорциональна плотности HI (т.е. при наличии “тяжелого” газа). Дисперсию скоростей темного вещества в диске (тяжелого газа) можно принять такой же, как у звездного компонента; в этом случае мы будем иметь темный диск с той же толщиной, что и у звездного диска. Проблема устойчивости только усугубится, если темный диск взять более тонким.

Из вышеперечисленных галактик для NGC 2841, NGC 5055 и NGC 7331 имеются оценки дисперсии скоростей звезд балджа и внутренних областей диска, для галактики NGC 4736 есть только оценка центральной дисперсии скоростей [148–152]. Для остальных галактик, поскольку для них нет наблюдательных оценок дисперсии скоростей звезд, ограничимся оценкой ожидаемой толщины диска, которая соответствует c_r^{crit} –

минимальной дисперсии скоростей, требуемой для маргинальной устойчивости диска в отсутствии темного гало (т.е. при наличии “тяжелого” газа).

В качестве примера на Рис. 3.12 приведены радиальные распределения c_r^{crit} для NGC 3198, для двух значений параметра Тумре: $Q_{c,g} = 1$ и 2. Как и для рассмотренных выше галактик, если считать, что вся масса сосредоточена в диске, то значения c_r^{crit} даже при $Q_{c,g} = 1$ оказываются неприемлемо высокими (для $Q_{c,g} = 2$ и более сложных зависимостей $Q_{c,g}(R)$ они сопоставимы или превышают даже скорость вращения диска).

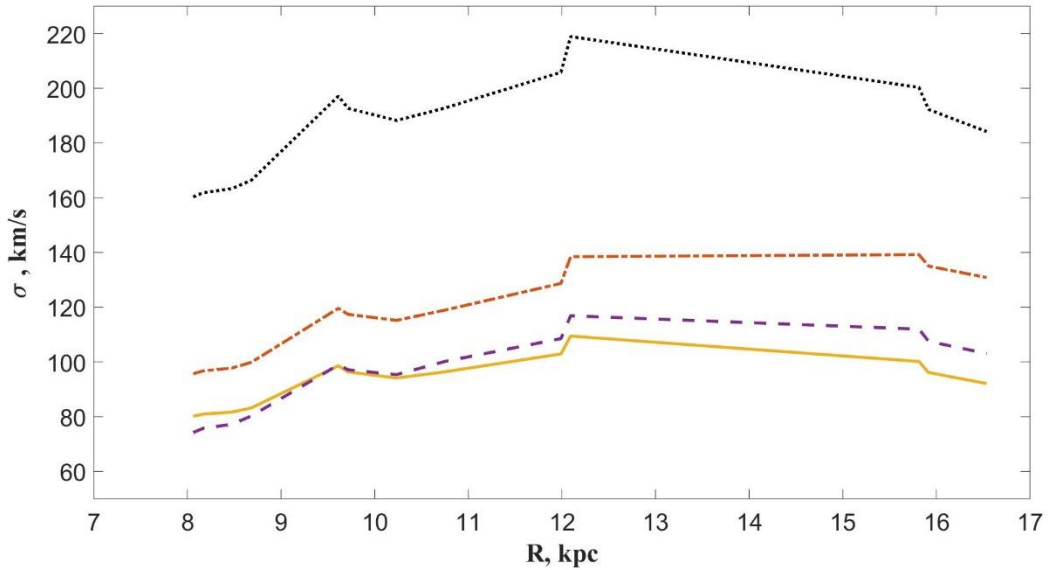


Рис. 3.12. Дисперсия скоростей звезд для NGC 3198 в модели с тяжелым газом. Значения дисперсии скоростей получаются неправдоподобно высокими. Сплошная и пунктирная линии - оценки критических значений радиальной дисперсии скоростей в звездном диске, соответствующие $Q_{c,g} = 1$ и $Q_{c,g} = 2$; штрих-пунктирная и штриховая линии – оценки c_r^{crit} для звездного диска, полученные в предположении маргинально-устойчивого трехмерного бесстолкновительного диска по [169] и при учете дестабилизирующего влияния холодного газа по [170], соответственно.

Рассмотрим теперь более общий случай, когда лишь часть темной материи связана с НГ.

Вертикальная шкала диска, включающего как звезды, так и темное вещество, в предположении плоско-параллельного изотермического слоя равна

$$h_z = \frac{c_z^2}{\pi G(\Sigma_s + k\Sigma_{DM})}, \quad (3.4)$$

где c_z – дисперсия скоростей по z -координате, принимавшаяся одинаковой для обоих компонент; k – доля темной материи галактики, находящейся не в гало, а в звездном диске

(случаю полного отсутствия темного гало соответствует $k = 1$). Оценка полутолщины диска по формуле (3.4) может рассматриваться как нижний предел, так как она верна только для тонких дисков ($h_z \ll R_0$, где R_0 – радиальная шкала диска), и при ее определении использовалось значение c_r^{crit} , являющееся нижним пределом дисперсии скоростей. Мы оценили h_z на расстоянии двух радиальных шкал диска ($R \approx 2R_0$), где вклад диска в скорость вращения максимален, используя полученные значения $c_r = c_r^{crit}$ и приняв отношение для дисперсии скоростей по двум осям $c_z/c_r = 0.7$ как величину, согласующуюся с наблюдениями галактик [171]. При $k = 1$ (то есть, когда вся темная масса сосредоточена в диске) во всех рассмотренных случаях величина h_z , оцененная по (3.4), оказалась превышающей R_0 даже для предельного случая $Q_{c,g} = 1$, что говорит о неприемлемо большой толщине диска. Фактически при этом модель диска сводится к сплюснутому гало.

О том же свидетельствуют высокие значения c_z/V_{disc} , приведенные в таблице 3.4 (для тонкого диска $(c_z/V_{disc})^2$ должно быть $\ll 1$). При $k = 1$, по крайней мере, 9 из рассмотренных галактик (NGC 2841, NGC 2976, NGC 3198, NGC 3521, NGC 4736, NGC 5055, NGC 6822, NGC 7331 и NGC 7793) не соответствуют этому условию даже при $Q_{c,g} = 1$, и ни для одной галактики не выполняется условие для тонкого диска, если использовать описанные выше критерии устойчивости с зависящим от R параметром $Q_{c,g}(R)$.

Для иллюстрации, оценки отношения c_r^{crit}/V_{disc} , полученные для расстояния, примерно равного двум радиальным шкалам диска от центра, приведены в таблице 3.4.

Таким образом, высокие значения $(c_r^{crit}/V_{disc})^2$, которые вытекают из модели с тяжелым газом, позволяют говорить о том, что тонкий и тяжелый диск не совместим с требованием гравитационной устойчивости, если в нем сосредоточена вся темная материя. Он должен быть очень толстым. Для того, чтобы $(c_r^{crit}/V_{disc})^2$ было меньше, к примеру, 0.4, как это имеет место для большинства спиральных галактик, требуется $k < 0.3-0.5$.

Таблица 3.4. Отношение $(c_r^{crit}/V_{disc})^2$ для различных значений $Q_{c,g}$ в зависимости от доли k темной материи в диске.

Галактика	$Q_{c,g} = 1$			$Q_{c,g} (R)$ по [169]			$Q_{c,g} (R)$ по [170]		
	$k = 0.2$	$k = 0.5$	$k = 1$	$k = 0.2$	$k = 0.5$	$k = 1$	$k = 0.2$	$k = 0.5$	$k = 1$
NGC 2841	0.55	0.92	>1	0.89	>1	>1	>1	>1	>1
NGC 2976	0.22	0.30	0.44	0.10	0.19	0.35	0.46	0.47	0.47
NGC 3198	0.27	0.45	0.76	0.32	0.54	0.90	0.70	0.72	0.76
NGC 3521	0.29	0.44	0.67	0.48	0.72	>1	>1	>1	>1
NGC 4736	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
NGC 5055	0.73	0.99	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1
NGC 6822	0.66	>1	>1	0.80	>1	>1	>1	>1	>1
NGC 7331	0.42	0.49	0.61	0.33	0.62	>1	>1	>1	>1
NGC 7793	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1	>1

3.3 Зависимость “Масса - удельный угловой момент” для газа и эволюция содержания газа в диске

3.3.1 Содержание газа в дисках галактик

Дисковые галактики сильно различаются по содержанию холодного газа, и, как следствие, по темпу звездообразования и связанным с ним характеристикам, что обусловлено большим количеством факторов, влияющих на расход газа и на его поступление в диск (см. схему на Рис. 3.13). Основной канал расхода газа — это превращение его в звезды, а также выброс газа из диска в гало или межгалактическое пространство как результат активности молодых звезд (вспышки сверхновых и звездный ветер) или всплеска активности ядра. В свою очередь, источниками поступления газа в диск могут быть: сброс газа проэволюционировавшими звездами, аккреция остывающего горячего газа гало (“горячая” мода аккреции), аккреция газовых филаментарных потоков из межгалактического пространства (“холодная” мода аккреции), а также разрушение и поглощение карликовых спутников, содержащих межзвездный газ. Газ может также “выдуться” из диска галактики при ее взаимодействии с окружающей средой.

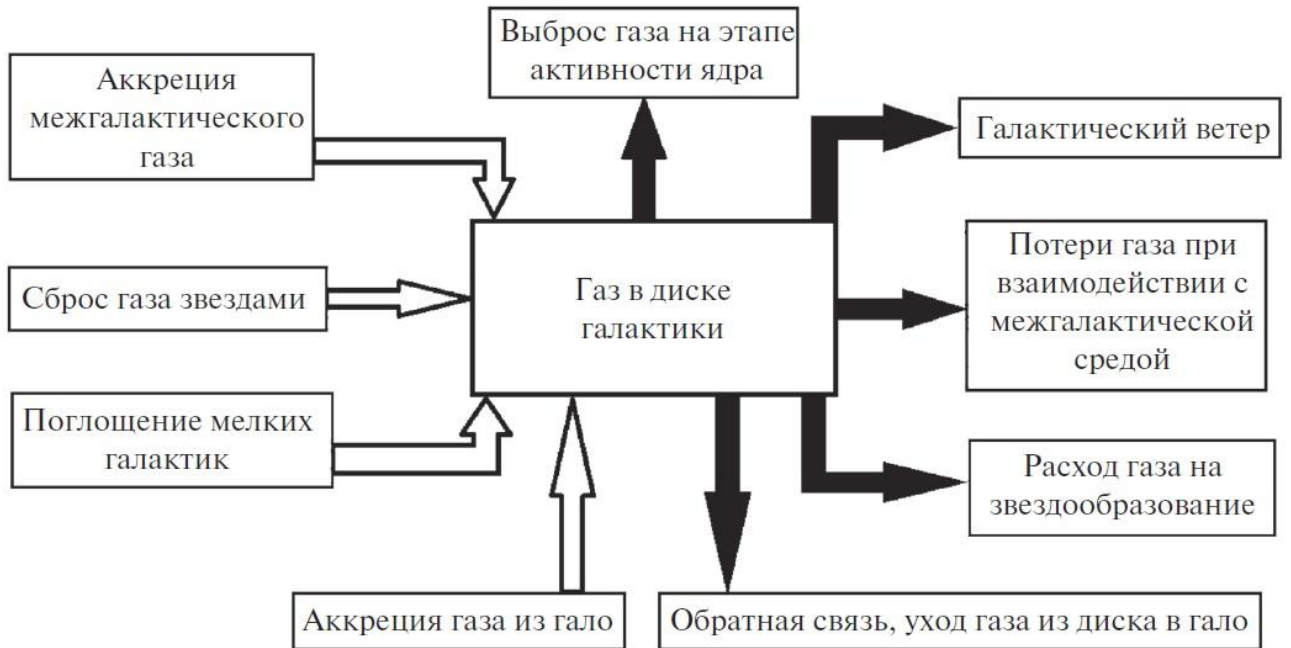


Рис. 3.13. Схема процессов, определяющих эволюционное изменение массы газа в галактиках.

По содержанию газа, показателям цвета или по темпам звездообразования (SFR) на единицу массы звездного населения распределение галактик имеет бимодальный характер (см., например, [172]). Условно галактики принято разделять на пассивные, с низким содержанием газа и темпом рождения звезд, к которым, как правило, относятся галактики типов $E - S0 - Sa$, и звездообразующие, масса газа в которых достаточна велика для поддержания интенсивного звездообразования. Большинство звездообразующих галактик относятся к типам Sbc и более поздним. Именно такие галактики рассматриваются в последующих разделах.

Потеря газа способна перевести галактики из категории звездообразующих в пассивные, причем переход между ними должен быть достаточно быстрым, чтобы объяснить бимодальность распределения галактик по цвету или SFR (см., например, [173], [174]). Но до тех пор, пока галактики остаются звездообразующими, их эволюция протекает удивительным образом сходно. Об этом свидетельствует существование корреляций между интегральной массой нейтрального водорода M_{HI} и такими глобальными медленно эволюционирующими параметрами галактик, как радиус оптического или газового диска ([17], [175-177]), светимость или звездная масса диска ([7], [176], [178-180]), скорость вращения галактики ([176], [181], см. также Раздел 2.4), масса или спин гало ([180], [182]), а также удельный угловой момент вращения диска J , пропорциональный произведению круговой скорости внешних областей диска на его оптический радиус [183-186].

Очевидно, что перечисленные выше корреляции нельзя считать взаимно независимыми, хотя априори неясно, какие из них являются физически обусловленными, а

какие отражают опосредованные взаимосвязи между различными параметрами галактик. Так, между скоростью вращения и размером диска существует зависимость, близкая к линейной (см., например, [18]), поэтому соотношения “ M_{HI} – размер диска”, “ M_{HI} – скорость вращения” и “ M_{HI} – удельный угловой момент диска”, по-видимому, имеют общую причину, вероятно, связанную с условием гравитационной устойчивости газового диска (см. обсуждение ниже).

Наиболее тесная зависимость с минимальным разбросом значений возникает при сопоставлении M_{HI} с радиусом R_{HI} , который соответствует фиксированному пороговому значению азимутально усредненной поверхностной плотности, например, $\Sigma_{HI} \approx 1 M_{\odot}/\text{пк}^2$ ([177], [179]). Однако здесь сравниваемые параметры изначально нельзя считать независимыми: эволюционное изменение M_{HI} неизбежно повлечет изменение R_{HI} , обеспечивая положительную корреляцию между этими параметрами. Тем не менее тесная корреляция между M_{HI} и R_{HI} , одинаковая для галактик различных масс (от маломассивных богатых газом карликов до гигантских спиралей), указывает на то, что общая форма радиального профиля поверхностной плотности HI во внешней области дисков, где сосредоточена основная масса газа, должна быть сходной для большинства галактик: только в этом случае радиус R_{HI} окажется связанным с интегральной массой водорода M_{HI} . Прямые измерения профилей плотности газа Σ_{HI} в галактиках поздних типов, действительно, демонстрируют его универсальный характер—за исключением центральных областей галактик, где распределение HI отличается большим разнообразием, и существенная, если не основная, доля газа, как правило, приходится на молекулярный водород, а не на HI [187-188].

Радиальные профили азимутально усредненной поверхностной плотности газа $\Sigma_{HI}(R)$ галактик поздних типов оказываются особенно близкими по форме, если расстояния R выражать в единицах радиуса R_{HI} ([177], [189]), или оптического радиуса $R_{25} = D_{25}/2$, который соответствует граничной изофоте 25 зв.вел. с кв.сек. [187]. Подобие радиальных профилей плотности газа, в свою очередь, свидетельствует о сходных механизмах эволюции газа в дисках звездообразующих галактик различной массы. Этому важному выводу, на наш взгляд, не уделяется достаточно внимания.

Исходя из наблюдаемой зависимости Σ_{HI} от нормированного значения радиуса R/R_{25} , полученной Bigiel et al. [190], можно заключить, что в пределах оптического радиуса R_{25} содержится, в среднем, около половины интегральной массы HI. Лишь для части галактик низкой светимости эта доля значительно ниже. По оценке [188], среднее значение отношения радиусов R_{HI}/R_{25} для спиральных галактик составляет 1.35 ± 0.22 .

Заметим, что интегральный вклад молекулярного газа H_2 в общую массу газа, как правило, невелик. Согласно Bothwell et al. [191], доля H_2 в спиральных галактиках составляет в среднем 0.09–0.13 и падает с уменьшением массы звездного населения. Для изолированных галактик обзора AMIGA, используемого в настоящей работе, Lisenfeld et al. [192] получили среднее значение $M_{H_2}/M_{HI} \approx 0.2$. Таким образом, интегральная масса HI может характеризовать полную массу нейтрального газа в диске (с учетом более тяжелых элементов и молекулярного газа интегральная масса газа в среднем в 1.6-1.7 раз выше M_{HI}).

3.3.2 Соотношение “масса водорода – удельный момент вращения”

$$(M_{HI} - VD)$$

Существование корреляции между удельным моментом вращения газового диска и содержанием газа и ее физическая интерпретация уже рассматривалась ранее (см. ссылки в предыдущем разделе). Удельный момент вращения газового диска зависит от формы кривой вращения и радиального профиля распределения плотности газа, но, поскольку в области, содержащей основную массу газа, скорость вращения, как правило, слабо меняется с радиусом, а профиль плотности HI у большинства звездообразующих галактик сходен (см. выше), удельный момент можно считать пропорциональным произведению скорости вращения на размер диска VD или на радиальную шкалу диска VR_0 . Здесь мы обращаем внимание на то, что, помимо поиска физической интерпретации зависимости, соотношение между M_{HI} , D и V дает возможность проверки или уточнения оценок расстояния до галактик, поскольку скорость вращения не зависит от принятого расстояния, размер или шкала диска зависят линейно, а M_{HI} - квадратично от расстояния, так что отношение M_{HI}/VD линейно связано с принятым расстоянием до галактики.

Для сопоставления M_{HI} с VD мы использовали две выборки галактик поздних типов в качестве основных: объекты из Каталога изолированных галактик AMIGA [77] с углом наклона $i > 35^\circ$, построенном на основе Каталога изолированных галактик Караченцевой [193], и “плоские”, т.е. видимые с ребра (*edge-on*) галактики с большим отношением полуосей (a/b) из каталога RFGC Караченцева и др. [7]. Они представляют наиболее однородную выборку галактик поздних типов, обладающих сходной структурой (тонким диском и маломассивным балджем). Были исключены все галактики, ошибка определения скорости вращения которых (согласно каталогу All Digital HI [8]) превышает 20 км/с, а также галактики, угловой размер которых превышает 400” (для большей однородности выборок, поскольку для галактик большого углового размера усложняется процедура оценки интегральной массы HI). Выборки не содержат явно взаимодействующих галактик. Значения массы газа, линейных оптических размеров D_{25} , углов наклона (для галактик

AMIGA) и скоростей вращения V_{rot} были взяты из базы данных HYPERLEDA (leda.univ-lyon1.fr, [6]) или определены по содержащимся в ней данным. Значения радиальных шкал диска R_0 основаны на фотометрии изображений в обзоре *SDSS* (в полосе i) и были взяты из работы Hall et al. [194]. Принимаемая шкала расстояний соответствует $H_0 = 75$ км/с/Мпк.

На Рис. 3.14 приведена трехмерная зависимость $M_{HI} - V_{rot} - D_{25}$ для изолированных галактик. Сходную картину дают “плоские” галактики (здесь не приводится), хотя, как уже обсуждалось в разделе 1.4, между “плоскими” и изолированными галактиками имеется заметный сдвиг. Параметры регрессионных прямых k и b , среднеквадратичные отклонения MSE и коэффициенты корреляции r приведены в таблице 3.5. Наклон и нуль-пункт регрессионных прямых рассчитывались для биссектрисы между прямой и обратной регрессией. Нами были рассмотрены два варианта построения регрессии: простой МНК и робастная регрессия. В последней наиболее отклоняющимся точкам приписываются меньшие весовые коэффициенты. Полученные статистические параметры показали практически совпадающие результаты.

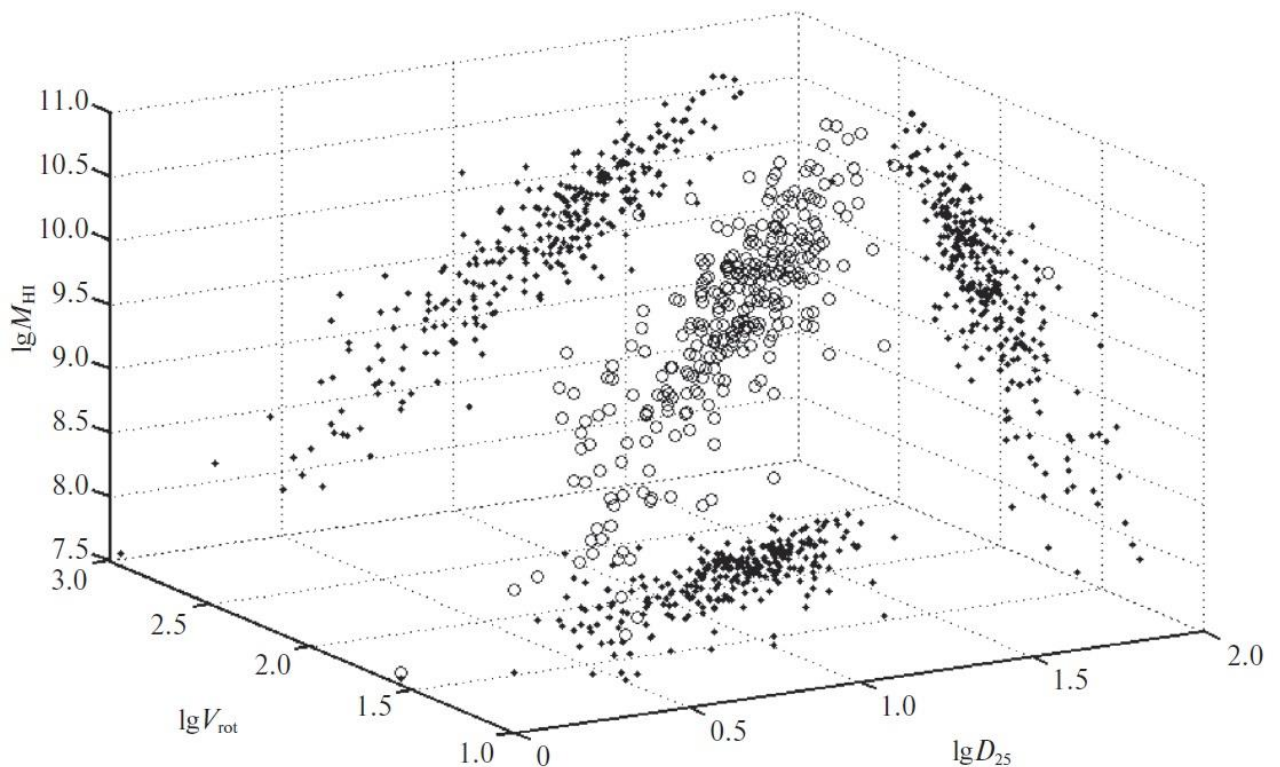


Рис. 3.14. Зависимости между массой водорода, скоростью вращения и линейным размером диска для изолированных галактик поздних типов.

Для обеих выборок галактик наиболее высокий коэффициент корреляции имеет место между M_{HI} и размером диска или его удельным угловым моментом. Хотя связь M_{HI} со скоростью вращения менее тесная, чем с размером галактики, она не является простым отражением известной зависимости “оптический размер–скорость вращения” (см.,

например, [195]), о чем свидетельствует корреляция между V_{rot} и отклонением от линейной зависимости $\log M_{HI} - \log D_{25}$ для галактик AMIGA (Рис. 3.15). Среднеквадратичные отклонения от 2D-линейных зависимостей составляют $\Delta \log M_{HI} = 0.07 - 0.08$ (см. таблицу 3.5), что соответствует среднеквадратичной ошибке определения логарифма расстояния около 0.04 (или точности оценки расстояния, соответствующему принятому при построении зависимостей значению постоянной Хаббла— около 10%, что несколько уступает точности определения расстояния по соотношению Талли-Фишера (см. предыдущую Главу), но тем не менее дает достаточно надежные результаты).

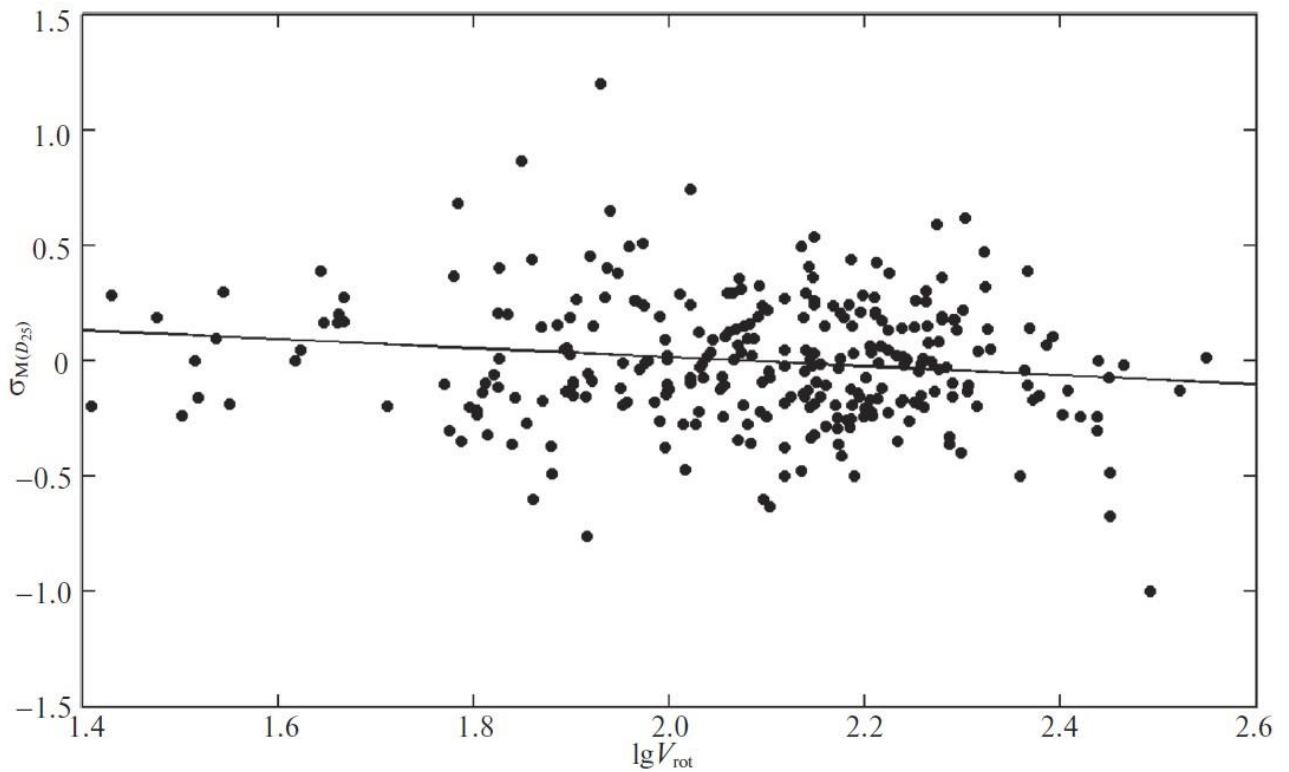


Рис. 3.15. Соотношение между скоростью вращения галактик и отклонением галактик от регрессионной прямой на зависимости “ $M_{HI} - D_{25}$ ”.

Таблица 3.5. Итоговые зависимости (см. Примечание)

Зависимости	Edge-on				AMIGA			
	2	3	4	5	2	3	4	5
$lgf(x) - k \cdot lgx + b$	k	b	MSE	p	k	b	MSE	p
Число объектов в выборке	256				293			
$lgM_{HI} - f(lgD_{25})$	1.43	7.90	0.079	0.80	1.59	7.50	0.076	0.87
$lgM_{HI} - f(lgV_{rot})$	2.26	5.00	0.084	0.78	1.83	5.69	0.144	0.73
$lgM_{HI} - f(lg(V_{rot}D_{25}))$	0.95	6.52	0.069	0.83	0.98	6.24	0.079	0.86
Число объектов в выборке	256				71			
$lgM_{HI} - f(lgR_0)$	1.45	9.02	0.092	0.76	1.49	8.85	0.071	0.83
$lgM_{HI} - f(lg(V_{rot}R_0))$	1.02	7.09	0.069	0.83	1.03	6.91	0.071	0.83
$lgf(x,y) - k_1 \cdot lgx + k_2 \cdot lgy + b$	Трехмерная зависимость							
$lgM_{HI} - f(lgV_{rot}, lgD_{25})$	$k_1 = 1.11$ $k_2 = 0.86$	6.30	0.069	0.83	$k_1 = 0.45$ $k_2 = 1.35$	6.88	0.072	0.88

Примечание. (1) - вид зависимости, (2), (3) - параметры линейной регрессии, (4) - среднеквадратичное отклонение, (5) - коэффициент корреляции.

3.3.3 Зависимость $M_{HI} - VD$ или чем определяется количество HI в диске

Как отмечалось в начале этого раздела, корреляция современной массы водорода с медленно эволюционирующими характеристиками галактик (размер, скорость вращения, удельный угловой момент) свидетельствует о сходном характере эволюции газа для большинства звездообразующих галактик. Заметим, что размер диска любой галактики все же подвержен медленной эволюции, поскольку со временем меняется звездный состав и распределение яркости вдоль радиуса. Фотометрия галактик поздних типов (без заметных балджей) в Глубоком Хаббловском поле (HDF) [196] демонстрирует медленное возрастание диаметров дисков с эпохи $z = 1$ на несколько десятков процентов, однако это не относится к радиальным шкалам дисков R_0 , которые за это время заметно не изменились. Поэтому параметр R_0 можно считать более консервативным, т.е. медленнее эволюционирующим, чем изофотный диаметр D_{25} , а, значит, произведение на V_{rot} должно быть меньше подвержено эволюционным (возрастным) изменениям, чем $V_{rot}D_{25}$, хотя обе величины характеризуют удельный угловой момент диска.

Скорость вращения диска галактики, установившаяся после того, как он сформировался, также является консервативной величиной, которая может меняться только при крупномасштабном перераспределении массы, например, при тесном взаимодействии галактик. Поэтому корреляции между массой газа и параметрами D_{25} , R_0 или $J \sim V_{rot}R_0$

свидетельствуют о том, что содержание газа за последние несколько миллиардов лет либо мало менялось (что требует наличия аккреции газа, компенсирующей процесс перехода газа в звезды), либо у различных галактик масса газа менялась со временем сходным образом, так что зависимости массы газа от медленно эволюционирующих параметров (углового момента диска) не “размылись” за миллиарды лет.

В принципе, возможны оба указанные выше варианта. Имеющиеся численные модели вполне могут воспроизвести такой характер эволюции, при котором звездообразование и аккреция компенсируют друг друга, и, как следствие, интегральная масса газа в течение долгого времени поддерживается примерно на одном уровне (в так называемой модели *bathhtub*, см., например, [197]). Однако при этом остается открытым вопрос, что тогда определяет тот уровень, на котором устанавливается равновесная плотность Σ_{HI} или интегральная масса M_{HI} в галактиках, и почему этот уровень должен зависеть от оптического размера или углового момента диска, а, например, не от плотности окружения галактики, а также почему за пределами центральных областей галактических дисков сохраняется сходное радиальное распределение плотности газа $\Sigma_{HI}(R)$. Скорее можно было бы ожидать, что темпы аккреции и распределение приобретенного газа по диску сильно различаются для галактик различных масс и морфологических типов, как и для галактик, изолированных и находящихся в более плотном окружении.

Очевидным регулятором процесса эволюции газа в диске может служить выполнение условия локальной гравитационной устойчивости вращающегося газового слоя, поскольку неустойчивость должна приводить к росту локальных неоднородностей плотности на килопарсековых масштабах, и, как следствие, к интенсификации процесса звездообразования — до выхода вращающегося газового слоя на пороговое (маргинально устойчивое) состояние.

В предыдущем разделе диссертации предположение о том, что поверхностная плотность газа равна или пропорциональна критической плотности, уже была использована при обсуждении модели тяжелого диска. Ниже обсудим вопрос о плотности газа и его интегральной массе в диске более детально.

Идея о том, что слой газа близок к состоянию маргинальной устойчивости в значительной части галактического диска, предлагалась для объяснения распределения газа в галактиках в целом ряде работ, начиная со статей [155], [198-200]. Косвенным подтверждением роли гравитационной устойчивости в эволюции содержания газа является вывод, полученный в работах [201] (см. Раздел 3.2) и [168] о том, что параметр устойчивости газового слоя на большом радиальном протяжении остается почти

постоянным, хотя и превышает единицу. Но соответствует ли он условию пороговой (маржинальной) устойчивости?

Основная сложность, с которой встречается предположение о маржинальной устойчивости газового слоя в достаточно протяженном интервале значений R , заключается в том, что во внешних областях дисков спиральных галактик, где атомарный газ преобладает над молекулярным, а также в Irr-галактиках газовый слой имеет существенно меньшую плотность, чем требуется для выполнения этого условия (см., например, [202-204]).

Рассмотрим ситуацию подробнее.

Как и ранее (см. Раздел 3.2), будем характеризовать условие гравитационной устойчивости газового диска к локальным гравитационным возмущениям значением параметра Тумре

$$Q_g = \frac{c_g \kappa}{\pi G \Sigma_g}, \quad (3.5)$$

где c_g — дисперсия скоростей газа, связанная с турбулентными движениями, а κ — эпициклическая частота. Для круговой скорости V_c , не меняющейся вдоль радиуса, $\kappa = \sqrt{2V_c/R}$. Ниже будем считать, что круговая скорость близка к скорости вращения газа ($V_c \approx V_{rot}$).

В простейшем случае тонкого осесимметричного диска критическое значение для устойчивости к радиальным возмущениям соответствует $Q_g = Q_{c,g} = 1$. Учет нерадиальных возмущений делает диск менее устойчивым, в то время как конечная толщина стабилизирует диск. Когда речь идет о маржинальной устойчивости диска, эти два фактора в значительной степени компенсируют друг друга. Анализ условия устойчивости в применении к реальным галактикам упрощается благодаря тому, что одномерная дисперсия скоростей газа c_g медленно меняется с радиусом, и для внешних областей галактик с различной светимостью (массой) составляет 6–10 км/с (см. обсуждение в [149]; [205]).

Заметим, что все аналитически полученные критерии (не)устойчивости диска имеют приближенный и локальный характер, и в общем случае анализ роста гравитационных возмущений требует построения численных трехмерных моделей. Последние показывают, что в зависимости от радиального расстояния R и соотношения между массой диска и массой сфероидальных подсистем в пределах R критическое значение $Q_{c,g} \sim 1.2 \div 2$ (см., например, [169], [202], [206]). В численных 3D-моделях [202] для диска с параметрами, близкими к локальным параметрам околосолнечной окрестности Галактики, критическое значение для устойчивости газового слоя найдено равным $Q_{c,g} = 1.4$. К сходным выводам приводят и аналитические оценки $Q_{c,g}$ с учетом неосесимметричных возмущений. Так, для

газового диска с плоской кривой вращения Поляченко и др. [207] было получено $Q_{c,g} = \sqrt{3}$.

Как было впервые показано в работе Засова [208], если использовать средние значения c_g и $Q_{c,g}$ и считать, что плотность газа на большом интервале радиальных расстояний R соответствует маргинальной устойчивости газового слоя (уравнение (3.5)), то масса газа в пределах выбранного значения радиуса R_{lim} будет определяться уравнением

$$M_{gas}^c = \int_0^{R_{lim}} 2\pi R \Sigma_g(R) dR = 2 \frac{c_g}{Q_{c,g}} \int_0^{R_{lim}} R \cdot \kappa(R) dR, \quad (3.6)$$

т.е. масса газа в пределах R_{lim} должна зависеть от радиального изменения $\kappa(R)$ и определяться кинематикой диска.

Пусть кривая вращения имеет форму $V(R) = V_c (R/R_{lim})^n$, где V_c — круговая скорость на $R = R_{lim}$; $n = 0$ для плоской кривой вращения и $n = 1$ для линейно растущей скорости вращения. Тогда $\kappa(R) = \sqrt{2} \Omega(R) (1+n)^{1/2}$, где угловая скорость $\Omega(R) = V(R)/R$.

Для критического значения $\Sigma_g = \frac{c_g}{Q_{c,g}} \frac{\kappa}{\pi G}$ предельная масса газа в пределах R_{lim} составит:

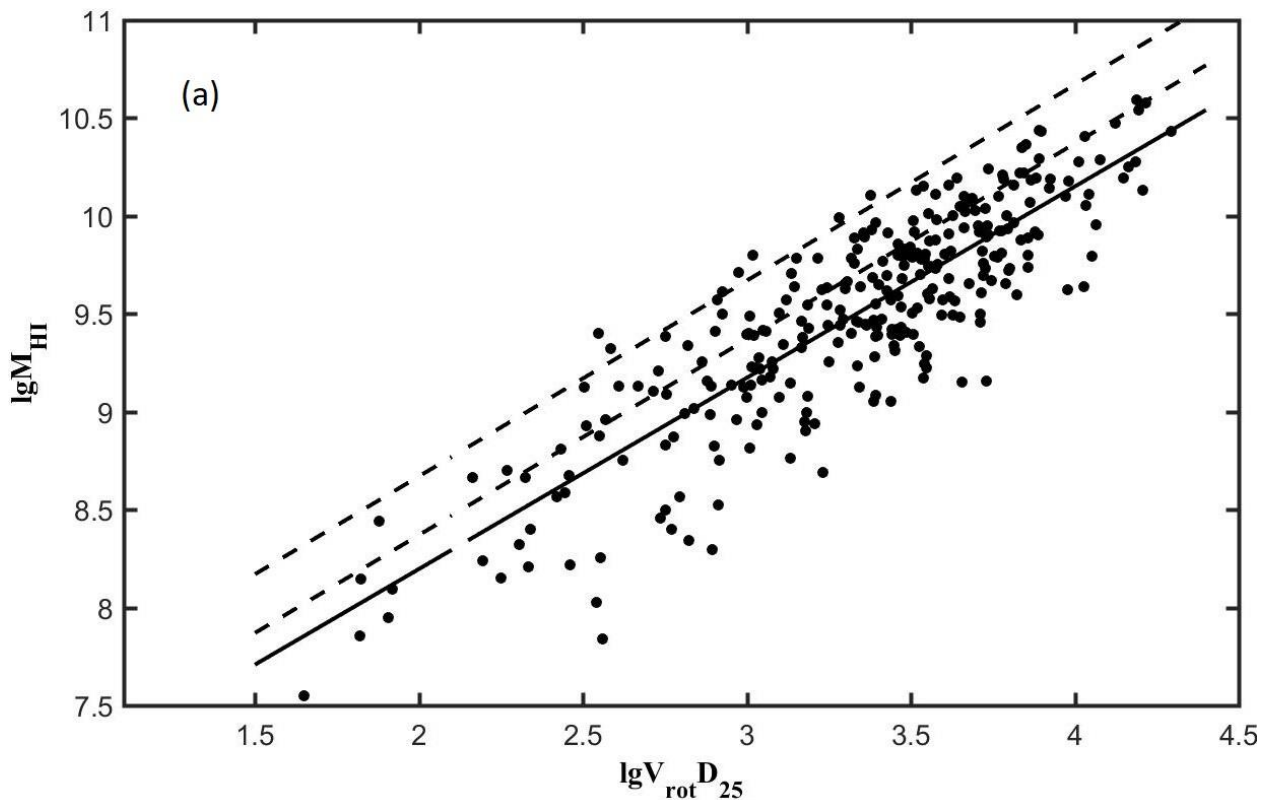
$$M_{gas}^c = 2^{3/2} K (1+n)^{-1/2} V_c R_{lim}, \quad (3.7)$$

где фактор $K = (c_g/Q_{c,g})$ считается примерно постоянным вдоль радиуса. Отсюда следует, что масса газа маргинально устойчивого диска слабо зависит от формы кривой вращения и пропорциональна удельному моменту вращения галактического диска $J \sim V_c R_{lim}$. Для плоской кривой вращения $V_c = const$ масса HI в маргинально устойчивом газовом слое составит $M_{HI}^c = 2^{3/2} \eta \frac{K}{G} V_c R_{lim}$, где $\eta^{-1} \approx 0.5 - 0.7$ — переходной коэффициент от M_g к M_{HI} , учитывающий долю молекулярного водорода (небольшую для внешних областей) и гелия в общей массе газа.

Для рассматриваемых нами изолированных галактик соотношение между M_{HI} и J , а по сути — между массой газа и параметрами $V_{rot} D_{25}$ или $V_{rot} R_0$, приведены на Рис. 3.16а,б. Сплошная прямая линия — это линейная регрессия для изолированных галактик, а две параллельные штриховые линии — ожидаемые зависимости для маргинально устойчивых дисков для $\eta = 0.5$ и двух значений параметра $K = (c_g/Q_{c,g}) = 10$ км/с (верхняя линия) и 5 км/с (нижняя линия). При дисперсии скоростей газа 10 км/с верхняя штриховая линия соответствует параметру устойчивости $Q_{c,g} = 1$, нижняя — $Q_{c,g} = 2$. Коридор между этими линиями соответствует ожидаемому для маргинальной устойчивости газового слоя. Разброс точек на диаграмме в значительной мере обусловлен реальным различием в значениях относительной доли интегральной массы HI в пределах R_{25} для разных галактик. Тем не менее, обращает на себя внимание то, что большая часть галактик находится ниже

полосы, ограниченной пунктирными линиями для высокого и низкого значения K . Это ставит вопрос о том, действительно ли газовые слои можно считать маргинально устойчивыми на большом интервале R , в пределах которого находится основная масса газа, или же они в большинстве случаев обладают значительным запасом устойчивости ($Q_g > 2$)?

На Рис. 3.16(б) с галактиками AMIGA сравниваются также галактики низкой яркости (LSB), рассмотренные ранее в работе Абрамовой и Засова [209] (отмечены звездочками); к ним добавлена необычная карликовая галактика—LSB-спутник спиральной галактики NGC4656, описанный в работе Schechtman-Rook & Hess [210], который обладает крайне низкой поверхностной яркостью в оптическом диапазоне с подъемом яркости в ультрафиолетовую область. Последнее обстоятельство свидетельствует о происходящем или недавно происходившем звездообразовании. Оценки радиальной шкалы и скорости вращения этого LSB-карлика были получены в работе Засова и др. [211].



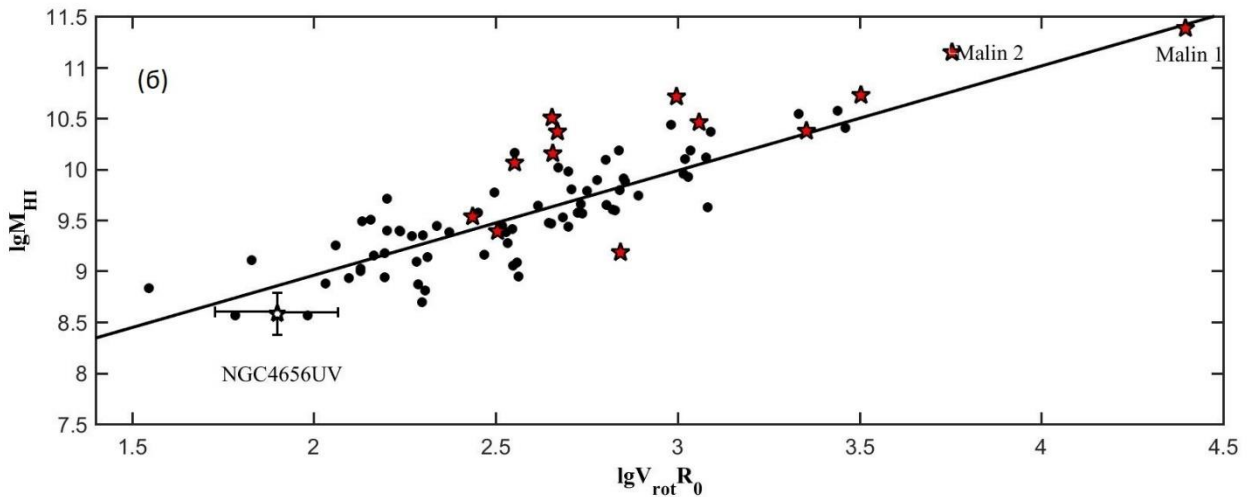


Рис. 3.16. Сравнение M_{HI} для изолированных галактик с параметрами, пропорциональными удельному моменту галактик: $V_{rot}D_{25}$ (а) и $V_{rot}R_0$ (б) (точки). На Рис. (б) нанесены также положения нескольких LSB-галактик, включая Malin 1,2 и NGC4656UV (звездочки). Две параллельные пунктирные линии на Рис. (а) — ожидаемые соотношения для маргинально устойчивых дисков с плоскими кривыми вращения для вероятного интервала значений параметра $K = c/Q_g = 10$ км/с и 5 км/с (верхняя и нижняя линии соответственно) (см. текст). Сплошная прямая—линейная регрессия для изолированных галактик.

В отличие от Рис. 3.16(а), на Рис. 3.16(б) вместо изофотного диаметра D_{25} используется радиальная шкала диска R_0 , оценка которой не должна зависеть от поверхностной яркости диска, что позволяет сравнивать объекты “нормальной” и низкой поверхностной яркости. Компиляция значений M_{HI} и V_{rot} взята из работы Абрамовой и Засова [209], данные по NGC4656—из Schechtman-Rook & Ness [210] для скорости вращения 40 ± 10 км/с. Как следует из Рис. 3.16(б), LSB-галактики следуют той же зависимости, что и галактики нормальной яркости, хотя разброс значений M_{HI} для них значительно выше. Часть LSB-галактик с большим удельным моментом обладает повышенным содержанием HI, и располагается на диаграмме там же, где галактики с аномально высоким содержанием HI (ромбики), которые будут отдельно рассмотрены ниже. Невысокая точность оценок параметров для LSB-галактик (характерная ошибка ~ 0.3 dex по обеим осям) и небогатая статистика не позволяют сделать из сравнения галактик далеко идущих выводов. Однако, исходя из положения LSB-галактик на диаграмме, можно заключить, что для большинства из них, за возможным исключением галактик с наиболее высокими значениями M_{HI} , зависимость $M_{HI}(J)$ имеет тот же вид, что и для галактик нормальной яркости, что говорит о сходных процессах, регулирующих содержание газа в их дисках.

Идея о том, что на некотором радиальном расстоянии плотность газа проходит через порог устойчивости, и темпы звездообразования за пределами этой зоны становятся низкими, была впервые рассмотрена (с учетом молекулярного газа) в работе [155]. Martin & Kennicutt пришли к выводу, что граница устойчивости соответствует радиальному расстоянию, на котором отношение $K = c_g/Q_{c,g}$ опускается ниже 4 км/с, что при реальных значениях c_g на периферии дисков $\sim 6-10$ км/с соответствует $Q_{c,g} \approx 1.5 \div 2$. Однако, как показало распределение яркости галактик в УФ-диапазоне, звездообразование в дисках часто продолжается, не испытывая резкого падения там, где предполагается переход к устойчивому режиму [212]. Это свидетельствует лишь о том, что звездообразование является локальным процессом и может определяться локальными флуктуациями плотности и температуры (см. обсуждение в [213]), в то время как гравитационная неустойчивость вращающегося диска развивается на масштабах порядка джинсовской длины волны λ_J , составляющей для массивных галактик ~ 1 кпк и больше (на периферии).

Чтобы выяснить, насколько далек газовый слой реальных галактик от состояния пороговой устойчивости в звездообразующих галактиках, обратимся к прямым оценкам параметра Q_g на различных расстояниях от центра.

Прямые оценки ([149], [186], [190], [203], [214], [215]) показали, что во внешних областях галактик параметр Q_g , определяемый классическим выражением (3.5) для азимутально усредненной плотности газа, составляет несколько единиц (как правило, $Q_g = 2-4$, и выше—за пределами R_{25}). Это подтверждает, что газовый слой обладает запасом устойчивости, если считать, что критическому значению плотности соответствует $Q_g = Q_{c,g} \approx 1$, хотя на различных расстояниях от центра ситуация может быть неодинаковой: газ в плоскости диска может обладать плотностью, близкой к критической в центральной части галактики, и иметь значительный запас устойчивости на периферии.

Как уже отмечалось, важным фактором, понижающим порог устойчивости, т.е. увеличивающим критическое значение Q_c для диска галактики в целом, является дестабилизирующая роль гравитации звездного диска. При оценке устойчивости двухкомпонентного диска, состоящего из звездного и газового компонентов, хорошим приближением является критерий, согласно которому результирующее значение Q_{sg} определяется сложением обратных величин Q для газа (Q_g) и для звезд (Q_s) с весовым коэффициентом W , уменьшающим вклад компонента с более высоким Q ([198], [216]):

$$\frac{1}{Q_{sg}} = \begin{cases} \frac{W}{Q_s} + \frac{1}{Q_g}, & \text{если } Q_s \geq Q_g \\ \frac{1}{Q_s} + \frac{W}{Q_g}, & \text{если } Q_g \geq Q_s \end{cases} \quad (3.8)$$

$$W = \frac{2c_s c_g}{c_g^2 + c_s^2} \quad (3.9)$$

В работе [149] для галактик обзора THINGS был сделан вывод о том, что вклады звездного и газового компонента в устойчивость сопоставимы. Параметр Q_g для газа держится на уровне 2–3, но оказывается в несколько раз выше на далекой периферии диска. А с учетом гравитации звездного диска, на большом интервале R значения комбинированного параметра $Q_{sg} \approx 2$. Позднее анализ изменения $Q_g(R)$, как и $Q_{sg}(R)$, на большом интервале радиальных расстояний R был выполнен в работе [168], где авторы проанализировали выборку из 20 галактик (в основном спиральных галактик поздних типов из обзора THINGS) с известными профилями плотности Σ_{HI} и показали, что в среднем более 50% полной массы HI заключено в пределах радиальных расстояний, где $\Sigma_{HI}(R)$ падает примерно как $1/R$ и коррелирует с профилем изменения эпициклической частоты $\kappa(R)$, а параметры Q_g , как и Q_{sg} , при фиксированном значении c_g остаются примерно постоянными, хотя и превышающими единицу. Однако, в работе [214] авторы пришли к иному заключению, что в галактиках THINGS газ играет определяющую роль в устойчивости только во внутренней области диска, где его значительная часть молекуляризована, а на больших расстояниях от центра параметр устойчивости определяется звездным диском.

Можно предположить, что относительная роль звездного диска при оценке устойчивости внешних областей дисков в цитированных выше работах, по-видимому, преувеличена. Во-первых, дисперсия скоростей газа c_g как в спиральных, так и неправильных галактиках $c_g(R)$ медленно уменьшается с R , опускаясь ниже 10 км/с на $(1 - 2)R_{25}$ ([4], [149], [205]). Во-вторых, в этих работах используется косвенная оценка дисперсии скоростей звезд по полутолщине (шкале высот) диска, которая считается не зависящей от радиуса ([149], [214]), в то время как в реальных галактиках во внешних областях диска она возрастает с R [218-219], что ослабляет вывод о сильном дестабилизирующем влиянии звезд. К примеру, увеличение принимаемой толщины звездного диска вдвое означает увеличение оценки дисперсии скоростей звезд примерно в $\sqrt{2}$ раз. При этом весовой коэффициент W в (3.8–3.9) уменьшается вдвое, так что относительный вклад гравитации звездного диска в результирующее значение $1/Q_{sg}$ (3.8) во столько же раз падает. Как следствие, при оценке параметра устойчивости диска газовый компонент может играть существенную роль на большой площади диска, хотя вывод о гравитационной устойчивости на больших R , по-видимому, сохраняется.

Для иллюстрации, в таблице 3.6 мы приводим оценки Q_g на радиусе $R = R_{25}$, полученные для галактик THINGS с использованием кривых вращения [135] и профилей поверхностной плотности газа $\Sigma_g = 1.3\Sigma_{HI}$ по работе [4], а также прямых оценок дисперсии скоростей HI на данном радиусе по работе [205]. Результаты показывают, что в большинстве галактик параметр Q_g на краю оптического диска действительно лежит в интервале 3–6, т.е. имеет значительный запас устойчивости—в согласии с выводами других авторов.

Таблица 3.6. Оценка параметра устойчивости Q_g на радиусе R_{25} .

1	2	3	4
NGC	R_{25} , кпк	σ_V , км/с	Q_g
NGC 925	14,3	8.8	1.8
NGC 2366	2.2	11.3	3.1
NGC 2403	7.4	8.4	2.9
NGC 2903	15.2	9.9	4.3
NGC 2976	3.8	9.6	13.8
NGC 3198	12.9	12.5	2.8
IC 2574	7.5	8.1	1.5
NGC 3621	9.4	10.0	3.3
NGC 4736	5.3	7.7	10.4
DDO 154	1.2	8.7	2.4
NGC 5055	17.2	8.9	3.5
NGC 6946	9.8	7.7	4.6
NGC 7793	5.9	9.6	2.3

Примечание. (1)—галактика, (2)—изофотный радиус, (3)—дисперсия скоростей HI [205], (4)—параметр устойчивости Q_g на R_{25} .

3.3.4 Эволюция соотношения $M_{HI} - VD$

Складывается противоречивая ситуация. С одной стороны, радиальный профиль поверхностной плотности HI в галактиках в широком диапазоне R по форме близок к ожидаемому при $Q_g = const$, и об этом же говорит корреляция массы газа в галактиках с кинематическими параметрами диска. С другой стороны, параметр Q_g , по имеющимся оценкам, существенно превышает критическое значение $Q_{c,g} \approx 1.5 \div 2$, требуемое для условия маргинальной устойчивости. В первую очередь это относится к внешним областям галактик, где Q_g доходит до пяти и более, и лишь гравитация звездного диска позволяет приблизиться к порогу устойчивости диска ($Q_{sg} \approx 2$). Но в этом случае причина

наблюдаемой согласованности количества газа M_{HI} или профиля плотности Σ_{HI} со скоростью или угловым моментом, ожидаемая для маргинально устойчивого диска, становится не очевидной.

Рассмотрим два возможных варианта.

1. Можно предположить, что имеющиеся оценки параметра устойчивости газового слоя галактик завышают Q_g по отношению к его пороговой величине. Уменьшить оценку Q_g , приблизить Q_g к критическому значению $Q_{c,g} \approx 1.5 \div 2$ на большом интервале R можно, если допустить, например, что существенная доля газа имеет дисперсию скоростей в 2–4 раза более низкую, чем обычно принимаемое значение ≈ 10 км/с на R_{25} , но для такого вывода наблюдения не дают достаточных оснований. Как альтернативу, можно допустить, что порог устойчивости газового слоя соответствует более высокому $Q_{c,g} \approx 3 \div 4$, например, как результат процесса диссипации энергии в газе, делающего газовый слой менее устойчивым к гравитационным возмущениям (см., например, [213]). Другим фактором, завышающим азимутально усредненные значения Q_g , является неоднородность в распределении газа: при среднем значении Q_g , соответствующем значительному запасу устойчивости, существенная часть газа может находиться в областях, где его плотность Σ_{HI} в несколько раз выше средней на данном расстоянии R . Однако отсюда еще не следует, что азимутально усредненный профиль $\Sigma_{HI}(R)$ будет при этом такой же, какой вытекает из уравнения (3.5) для маргинально устойчивого осесимметричного распределения газа с $Q_g = const$ (см. выше).

2. Условие $Q_g \approx Q_{c,g}$, где $Q_{c,g}$ - критическое значение параметра Тумре, соответствующее маргинально устойчивому состоянию газового слоя, имело место на большей части диска несколько миллиардов лет назад, когда плотность и интегральная масса газа были как минимум вдвое выше, чем в настоящее время. Тогда и сформировалась тесная зависимость между удельным моментом вращения диска и M_{HI} . Это могло относиться к той эпохе, когда прекратился рост массы звездного диска (упал темп аккреции), и дисперсия турбулентной скорости газа, высокая на стадии формирования диска, снизилась до современного уровня, где она примерно соответствует скорости звука в “теплом” HI.

В этом случае уменьшение поверхностной плотности газа в процессе эволюции должно свидетельствовать о том, что при дальнейшей эволюции диска аккреционный приток газа в диск не компенсировал расхода газа на звездообразование—по крайней мере, последние несколько миллиардов лет, и, как результат, рождение звезд привело к уменьшению M_{HI} до современного значения. При этом зависимости $M_{HI} - V_{rot}R_{25}$ или

$M_{HI} - V_{rot}R_0$ останутся линейными, если эффективность звездообразования SFE (темп звездообразования на единицу массы газа) или обратная ей величина—характерное время исчерпания газа τ_{HI} — были примерно одинаковыми для галактик с различными массами или угловыми моментами.

Имеющиеся наблюдения, действительно, согласуются с примерно постоянным значением τ_{HI} . Так, по данным обзора GASS для 190 массивных галактик со звездной массой $M_s > 10^{10}M_\odot$ средние значения τ_{HI} составляют $3 \cdot 10^9$ лет независимо от массы галактик [219]. В более поздней работе Wong et al. [220] для широкого интервала масс и скоростей вращения галактик, содержащих HI (от карликов до гигантских галактик), получено в среднем одинаковое значение SFE , соответствующее $\tau_{HI} = 4.5 \cdot 10^9$ лет с дисперсией 0.3 dex. При отсутствии аккреции величину τ_{HI} можно рассматривать как минимальное время, прошедшее с той эпохи, когда масса газа в диске была в несколько раз выше, чем в настоящее время.

Отметим, что здесь речь идет об интегральных массах HI: внутри каждой галактики эффективность звездообразования не остается постоянной и обычно падает с удалением от центра, так что можно ожидать эволюционное изменение профиля поверхностной плотности газа $\Sigma_{HI}(R)$, которое в общем случае зависит от соотношения темпов звездообразования, темпов аккреции и темпов потери газа на данном R . Задача описания эволюции содержания газа требует построения многопараметрических моделей эволюции, что выходит за рамки настоящей работы. Для нас важно то обстоятельство, что если значения τ_{HI} для интегрального количества HI примерно одинаковы для галактик разной массы, то рассматриваемые зависимости в процессе эволюции будут оставаться лог-линейными с тем же углом наклона.

Очевидно, что естественный разброс интегральных значений SFE для различных галактик неизбежно должен со временем “размывать” зависимость $M_{HI} - V_{rot}R_0$ и $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$. Согласно [220], дисперсия оценок SFE для галактик невелика, и составляет около 0.3 dex (т.е. фактор ~ 2), причем с учетом ошибок измерений реальный разброс значений SFE может быть еще меньше. Если характерное время уменьшения содержания газа в галактиках составляет $(3 - 5) \cdot 10^9$ лет, то за этот промежуток времени галактики, имевшие первоначально одинаковое количество газа, разойдутся по значениям $\log M_{HI}$ на 0.2–0.35 dex. Поэтому зависимости типа представленных на Рис. 3.16, которые прослеживаются на интервале в несколько порядков по угловому моменту, за несколько миллиардов лет не успеют размываться. В этом случае положение галактик с аномально высоким содержанием HI на диаграмме “ $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$ ” в верхней части коридора, отмеченного пунктирными

линиями (Рис. 3.16(a)), может свидетельствовать о том, что они, в отличие от большинства других галактик, сохранили состояние, близкое к маргинальной устойчивости $Q_g \approx Q_{c,g} \leq 2$ до настоящего времени.

3.3.5 Галактики с аномально высокой массой водорода на диаграмме $M_{HI} - VD$

Диаграммы, аналогичные приведенной на Рис. 3.16а, могут быть использованы для диагностики содержания HI в галактиках и выявления среди звездообразующих галактик таких систем, которые имеют аномально высокую, или, наоборот, аномально низкую массу газа по сравнению с изолированными галактиками со сходными кинематическими параметрами. В качестве примера, сравним с изолированными галактиками нормальной яркости, какими являются галактики выборки AMIGA (их расположение на диаграммах на Рис. 3.17 характеризуется сплошной регрессионной линией), галактики с наиболее высоким содержанием HI по выборке галактик HIghMass galaxy sample [221], в которых масса HI превышает $10^{10} M_{\odot}$ и составляет в большинстве случаев более трети от массы звездного населения. На диаграммах, приведенных на Рис. 3.17, эти галактики отмечены ромбиками. Масса HI в них оказывается систематически выше, чем в других галактиках с аналогичным угловым моментом, что говорит об особенностях эволюции содержания газа в них, возможно, связанной, с низкой эффективностью звездообразования при формировании звездных дисков, с аккрецией, как минимум компенсирующей расходы газа на звездообразование, или с недооценкой их момента вращения, если при той же скорости вращения они обладают очень большой протяженностью диска по сравнению с другими галактиками.

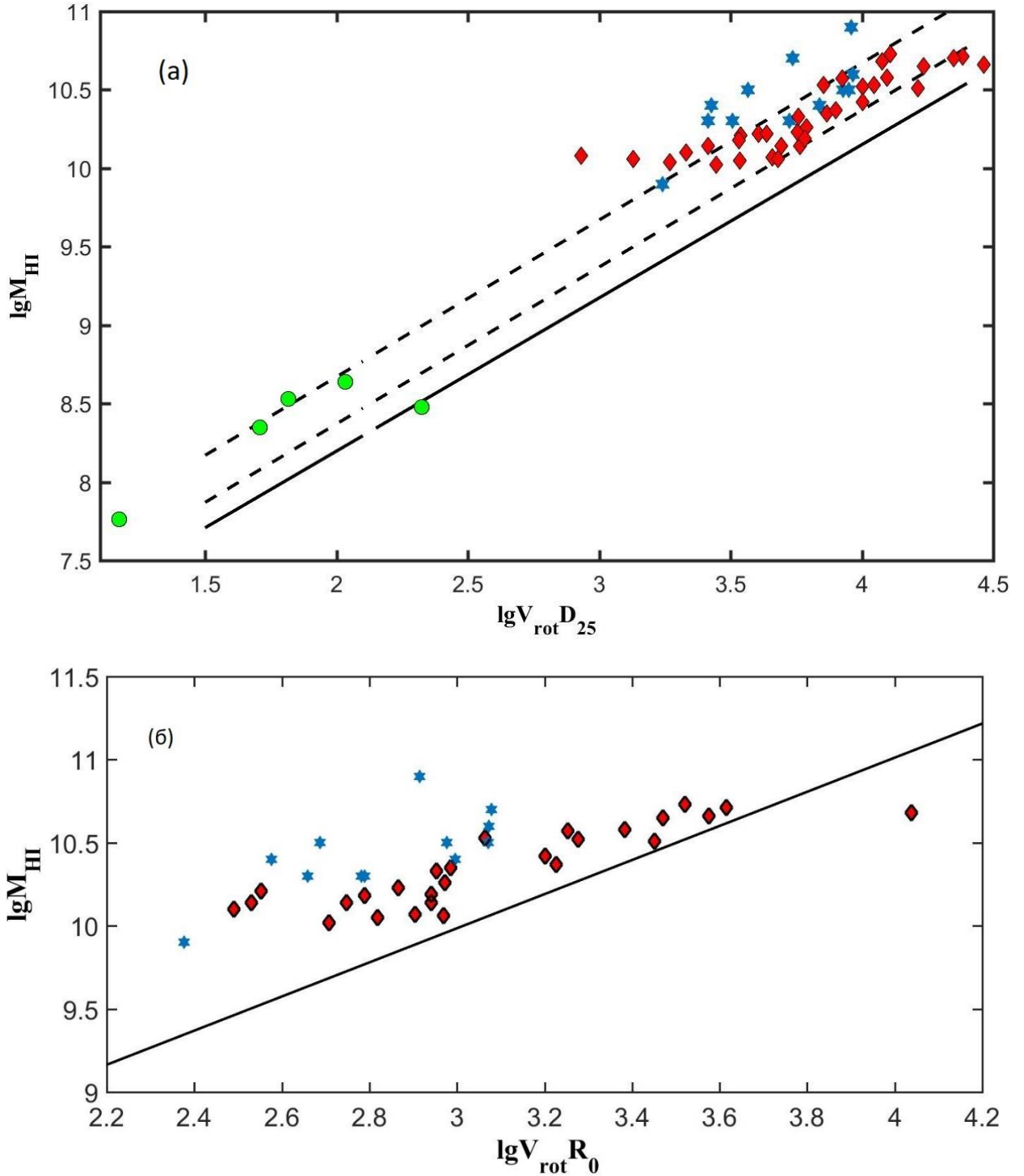


Рис. 3.17. Сравнение M_{HI} для галактик с высоким содержанием HI с параметрами $V_{\text{rot}} D_{25}$ (а) и $V_{\text{rot}} R_0$ (б) (сплошная прямая—линейная регрессия для изолированных галактик). Красные ромбики на обеих диаграммах относятся к галактикам с аномально высоким содержанием HI [221], а синие звездочки – галактики с избыточным содержанием HI по работе [222]. На Рис. (а) добавлены еще одна группа галактик с высоким содержанием HI – карликовые галактики, богатые водородом по [223] (отмечены зелеными кругами). Две параллельные пунктирные линии на Рис. (а) —ожидаемые соотношения для маргинально устойчивых дисков с плоскими кривыми вращения для вероятного интервала значений параметра $K = c/Q_g = 10 \text{ км/с}$ и 5 км/с (верхняя и нижняя линии соответственно) (см. 3.3.3).

Для увеличения выборки галактик с отличающихся необычно высоким содержанием HI, на Рис. 3.17(a) мы рассмотрели еще две группы подобных галактик, Chowdhury et al. [223] исследовали пять карликовых галактик в ближней вселенной, с барионной массой $< 10^9 M_{\odot}$, для которых масса HI в 8 и более раз превышает звездную массу и для которых имеются надежные интерференционные данные по кривым вращения. Эти галактики представлены на Рис. 3.17(a) в виде зеленых кружочков. Они находятся на продолжении приведенных выше зависимостей в область карликовых галактик, позволяя считать, что выводы, полученные для гигантских галактик с высоким содержанием газа, остаются верны и для маломассивных объектов. Другая группа объектов, обозначенных на Рис. 3.17(a,б) синими гексаграммами (звездочками), представляют собой выборку галактик, богатых водородом, для которых [222] недавно получили оценки ряда структурных параметров (наибольший интерес для нас представляли линейные размеры, скорость вращения и масса газа в этих галактиках). В эту выборку вошли объекты, имеющий угол наклона $< 30^\circ$ по данным Australian Telescope Compact Array (ATCA), абсолютную величину в фильтре K < -22.0 зв.вел. и для которых измерения HIPASS дают массу HI по крайней мере в 2.5 раза превышающую значение, предсказанное масштабным соотношением между M_{HI} и $M_{R,abs}$ ($lg M_{HI} = (3.47 \pm 0.11) + (-0.3 \pm 0.01)M_{R,abs}$, где $M_{R,abs}$ – абсолютная звездная величина в фильтре R) в работе [224] (подробнее см. [225]). Как можно видеть из приведенных графиков, часть объектов выборки [222] выходит за границы теоретической полосы устойчивости (на диаграмме $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$), располагаясь на диаграмме $M_{HI} - V_{rot}R_0$ значительно выше, чем галактики AMIGA.

Однако, причину такой аномалии легко понять на примере выборки [222], для которой получены радиальные профили HI галактик. Оказывается, HI в них в большинстве случаев распространяется чрезвычайно далеко за пределы оптического диаметра. Условно, эту выборку (см. Рис. 3.17(a), синие звездочки) можно разделить на две группы: для первой отношение $R_{HI}/R_{25} \lesssim 2$, и объекты этой группы лежат внутри полосы стабильности; представители же второй группы, для которых $R_{HI}/R_{25} > 2$ (реально это отношение составляет $\sim 3 - 4$) заметно выбиваются из общей закономерности (например, см. Рис. 3.18).

Простые оценки на основе радиальных профилей газа показали, что, если рассматривать не полную массу водорода, а M_{HI} в пределах D_{25} , то рассматриваемые галактики с высоким отношением R_{HI}/R_{25} из выборки [222] попадают в ту же область, что и остальные галактики, богатые водородом. В качестве примера, на Рис. 3.18 показано положение шести объектов из второй подгруппы как для полной массы HI, так и их

смещение при переходе к $3 R_{25}$. Это обстоятельство указывает на то, что имеется недооценка углового момента вращения галактик, богатых водородом (то есть, газ распространяется значительно дальше, чем R_{25}).

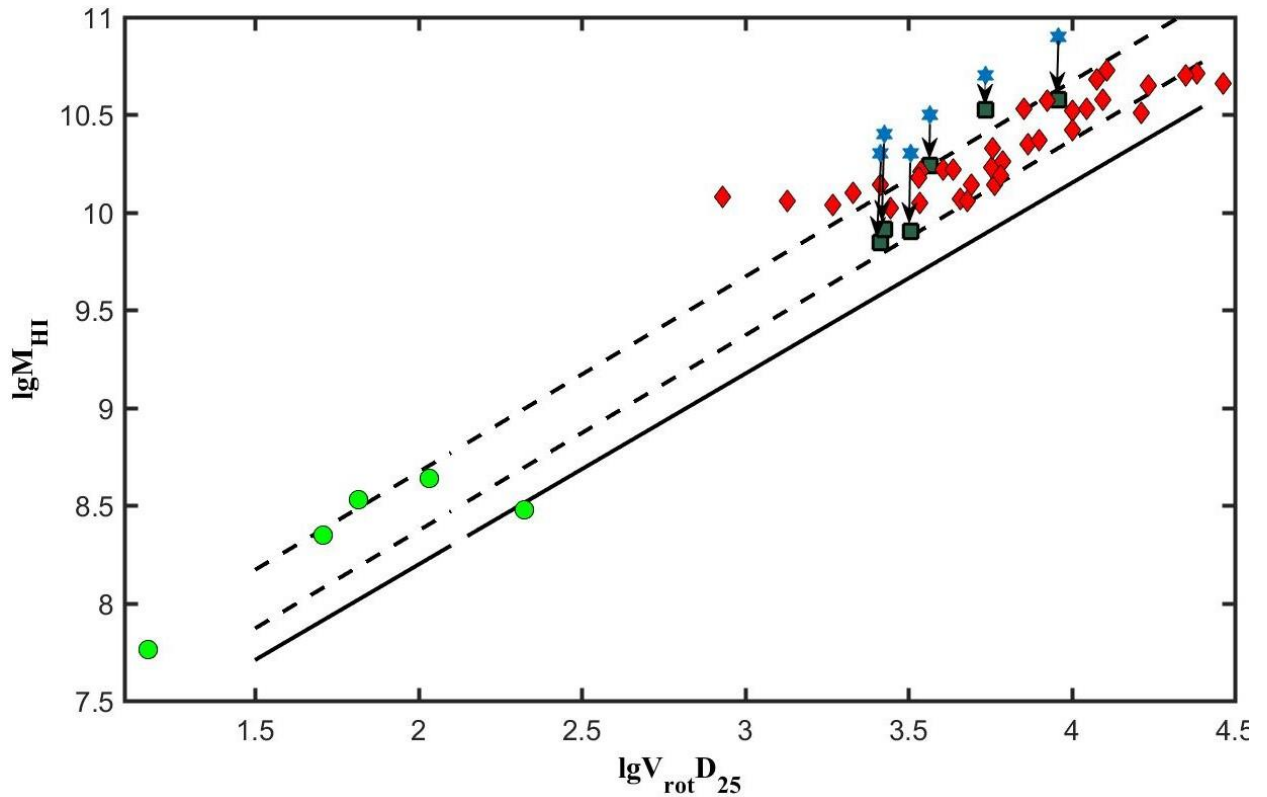


Рис. 3.18. Диаграмма, аналогичная приведенной на Рис. 3.17, $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$. Обозначения аналогичны Рис. 3.17. Звездочки и зеленые квадратики соответствуют галактикам с высоким содержанием HI по [222], квадратики - для массы газа в пределах $3 R_{25}$.

Для этих галактик из второй группы с протяженным диском HI ($R_{HI}/R_{25} > 2$) мы рассмотрели изменения параметра Q_g вдоль радиуса (см. Рис. 3.19) на основе данных о поверхностных плотностях HI, дисперсии скоростей газа и скорости вращения, представленных в работе [222]. За исключением самых центральных областей, мало нас интересующих, параметр устойчивости Тумре сохраняется в интервале 2-4, что говорит о том, что характер гравитационной устойчивости дисков этих богатых газом галактик ничем принципиально не отличается от остальных галактик данного типа, а отличие положения на диаграмме $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$, по-видимому, обуславливается лишь чрезвычайно протяженным газовым диском, содержащим за пределами 2-3 R_{25} существенную долю газа. К примеру, в работе [168] авторы показали, что параметр устойчивости газового диска для галактик их выборки изменяется в интервале, схожем с полученными нами значениями, имея среднюю величину 3.7 (среднее значение Q_g и интервал значений R, к которому оно относится, отмечены на Рис. 3.19).

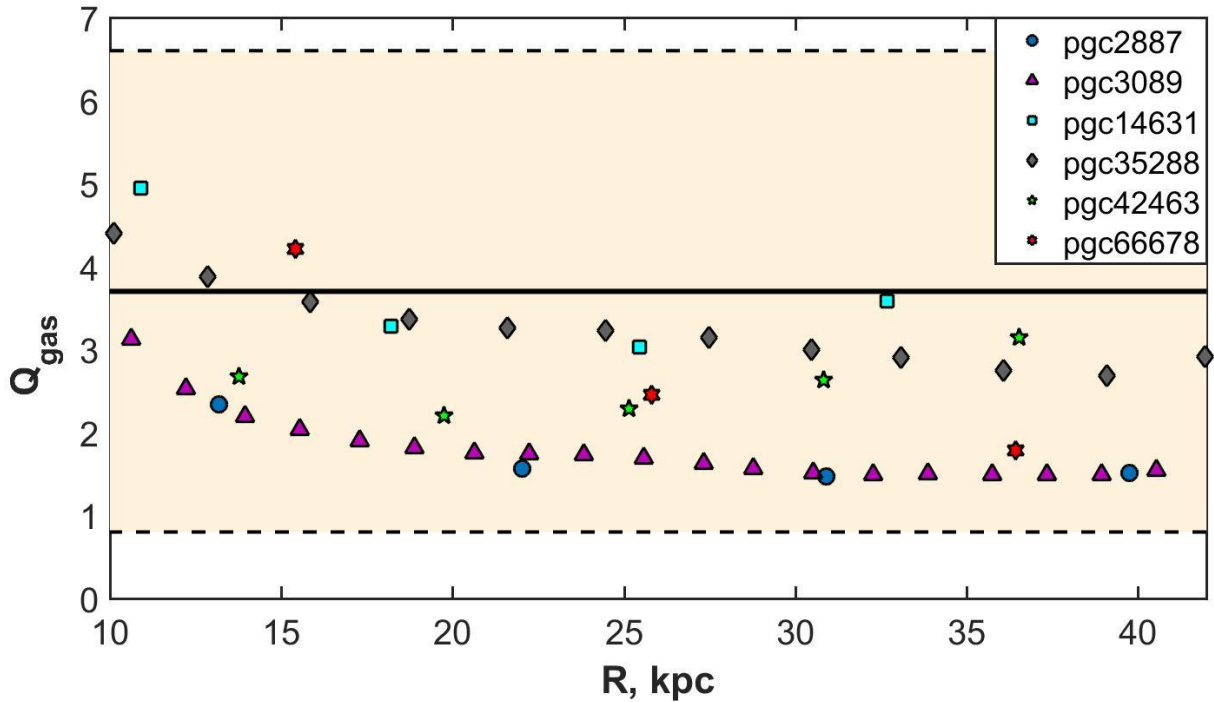


Рис. 3.19. Изменение параметра Тумре с радиусом для галактик с протяженными дисками HI (по нашим расчетам на основе данных о поверхностных плотностях из [222]). Каждая из галактик с аномально высоким содержанием HI представлена своим символом (см. легенду). Сплошная черная линия обозначает среднее значение Q_g для галактик выборки [168]. Бежевый интервал, ограниченный пунктирной линией, соответствует разбросу значений Q_g по той же работе.

Остается вопрос, чем обусловлено различие в эволюции газа для галактик, богатых водородом, по сравнению с “нормальными” изолированными галактиками. Исходя из проведенных сравнений, можно сделать следующий вывод. Все галактики с аномально высоким содержанием газа - за исключением нескольких объектов выборки [221], лежат внутри полосы пороговой устойчивости на диаграмме “ $M_{HI} - VD$ ”, либо, если выходят за пределы полосы, то, по-видимому, вследствие очень большой радиальной протяженности газового диска, поскольку основная масса HI для них лежит за пределами трех радиальных шкал диска. Следовательно, даже в галактиках с аномально высокой массой HI содержание газа связано с динамикой равновесного диска, поскольку масса HI в них согласуется с плотностью газа, близкой к пороговому значению для гравитационной устойчивости ($Q_g \sim 2 \div 3$). Этим рассматриваемые галактики отличаются от галактик с “нормальным” содержанием газа, представленным здесь выборкой одиночных галактик AMIGA, которые в среднем смещены вниз относительно полосы пороговой устойчивости.

3.4 Заключение и выводы

1. Кривые вращения галактик во многих случаях действительно можно объяснить, не прибегая к темному гало, и считая, что выполняется условие пропорциональности между плотностью темной материи и HI. Из рассматриваемых галактик этот вывод относится к следующим: NGC 925, NGC 2403, NGC 2903, NGC 2976, NGC 3031, NGC 3198, NGC 4736, DDO 154, NGC 5055, NGC 6822, NGC 6946, NGC 7331, NGC 7793. Однако, данное объяснение не является универсальным для всех галактик, и в некоторых случаях такой подход не приводит к удовлетворительным результатам (например, NGC 2841, NGC 3521 и NGC 3621). Но и тогда, когда удовлетворительно объясняется кривая вращения, для каждой из галактик требуется свое значение коэффициента пропорциональности (в интервале от 3 до 30), что делает схему физически мало привлекательной. При этом, как видно из таблицы 3.1-3.2, нет очевидной зависимости между значением этого коэффициента и определенной пространственной структурой или морфологическим типом галактики. К тому же, если считать, что вся темная материя сосредоточена в диске, ни одна из рассмотренных галактик выборки THINGS [4] в модели тяжелого газа (без гало) не удовлетворяет критерию устойчивости диска и (или) условию его малой относительной толщины. Поэтому связь между плотностями темной материи и HI, по-видимому, не имеет физической обусловленности, и отражает то обстоятельство, что характер распределения плотности газа во многих галактиках сам зависит от формы кривой вращения диска, что связано с условием гравитационной устойчивости газового слоя.

2. Для двух различных выборок галактик позднего типа (“плоских” и изолированных) подтверждено существование тесных корреляций между интегральной массой водорода M_{HI} и удельным угловым моментом диска J , пропорциональным произведению скорости вращения на оптический диаметр ($V_{rot}D_{25}$) или на радиальную шкалу диска ($V_{rot}R_0$).

3. Рассмотрены два варианта объяснений существования зависимости, близкой к линейной, между M_{HI} и удельным угловым моментом J : либо критическое значение параметра Тумре для азимутально усредненной плотности газа в несколько раз превышает обычно принимаемое значение $Q_{c,g} \approx 1-2$, и газовый диск на большом протяжении остается близким к состоянию пороговой устойчивости, либо указанная зависимость сформировались в ту эпоху, когда формирование звездного диска в основном завершилось, но содержание газа в галактических дисках было в несколько раз выше современного. Газовый слой в эту эпоху находился в состоянии маргинальной устойчивости, после чего его масса медленно уменьшалась. Этот вариант не входит в противоречие с наблюдениями,

согласно которым $Q_g \geq Q_{c,g}$, и качественно согласуется с медленным уменьшением содержания HI во Вселенной, происходящим последние миллиарды лет [226]. Однако он противоречит моделям со сбалансированным притоком и расходом газа, т.е. требует, чтобы расход газа на звездообразование в большинстве случаев не компенсировался аккрецией газа на диск.

4. Зависимости $M_{HI} - V_{rot}D_{25}$ и $M_{HI} - V_{rot}R_0$ могут быть использованы как для уточнения расстояний до галактик, так и для диагностики содержания HI, выявляя галактики с аномально высоким или аномально низким содержанием HI по сравнению с галактиками поздних типов со сходными кинематическими характеристиками. Так, в галактиках с аномально высоким содержанием HI [221-223] масса газа оказалась систематически выше, чем в изолированных галактиках со сходным размером и скоростью вращения, в то время как галактики низкой яркости, по-видимому, следуют общей зависимости, но с большим разбросом значений. Галактики, богатые водородом, исследованные в работах указанных авторов, так же систематически лежат выше зависимости, полученной для “нормальных” изолированных галактик. Более того, 6 объектов из выборки [222] выходят за границы полосы устойчивости, в которой располагаются другие богатые водородом галактики, что должно быть связано с особенностями эволюции содержания газа в этих галактиках. Мы планируем более подробно изучить галактики, богатые водородом, в дальнейшем.

Заключение

Выводы из проделанной работы представлены в конце каждой главы диссертации. На их основе формируются два основных направления дальнейших исследований:

- 1) Построение Барионного соотношения Талли-Фишера (связь барионной массы диска, или массы звёздной составляющей галактики со скоростью вращения) с использованием разработанного в диссертации многопараметрического подхода. Эта задача требует составления численных моделей, описывающих самопоглощение в галактиках (как в оптических, так и в радио-диапазонах), видимых с ребра, а также анализ соотношения “масса-светимость” (M/L) для различных галактик. Кроме того, мы планируем проведение наблюдений “плоских” галактик, чтобы дополнить сформированную выборку (особенно в области карликов);
- 2) Более глубокое изучение особенностей галактик, необычно богатых газом в которых масса HI составляет существенную долю интегральной массы звёзд (см. раздел 3.3.5. Их эволюция происходила иначе, чем у “обычных” галактик, и позволила им сохранить (или приобрести) большое количество газа в диске (особенно на больших радиальных расстояниях). Анализ возможных процессов, отвечающих за подобную эволюцию, представляет значительный интерес.

Список литературы

1. Bosma A. *21-cm line studies of spiral galaxies. II. The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types* // AJ – 1981 - vol. 86 - p. 1825 – 1846
2. Bizyaev D.V., Kautsch S.J., Mosenkov A. V. et al. *The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks* // ApJ – 2014 - vol. 787 - id. 24
3. Tully R.B., Rizzi L., Shaya E.J. et al. *The Extragalactic Distance Database* // AJ – 2009 - vol. 138 - p. 323-331
4. Walter F., Brinks E., de Blok W.J.G. et al. *THINGS: The HI Nearby Galaxy Survey* // AJ – 2008 - vol. 136 - p. 2563-2647
5. Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agüeros M.A. et al. *The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey* // ApJ Supp. S. – 2009 - vol. 182 - p. 543-558
6. Makarov D., Prugniel P., Terekhova (Zaitseva) N. et al. *HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances* // A&A – 2014 - vol. 570 - id. A13
7. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Y.N. et al. *The revised Flat Galaxy Catalogue* // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory – 1999 - vol. 47 - p. 5
8. Courtois H.M., Tully R.B., Fisher J.R. et al. *The Extragalactic Distance Database: All Digital HI Profile Catalog* // AJ – 2009 - vol. 138 - p. 1938-1956
9. Hubble E.P. *Extragalactic nebulae* // ApJ – 1926 – vol. 64 - p. 321-369
10. Hubble E. *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae* // Proc. National Academy of Science – 1929 – vol. 15 - p. 168
11. Tully R.B., Shaya E.J., Karachentsev I.D. et al. *Our Peculiar Motion Away from the Local Void* // ApJ – 2008 – vol. 676 - p. 184-205
12. Karachentsev I.D., Kashibadze O.G., Makarov D.I., Tully R.B. *The Hubble flow around the Local Group* // MNRAS – 2009 – vol. 393 - p. 1265-1274
13. Courtois H.M., Hoffman Y., Tully R.B., Gottlober S. *Three-dimensional Velocity and Density Reconstructions of the Local Universe with Cosmicflows-1* // ApJ – 2012 – vol. 744 – id 43
14. Riess A.G., Filippenko A.V., Challis P. et al. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant* // AJ – 1998 – vol. 116 - p. 1009-1308
15. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae* // ApJ – 1999 – vol. 517 – p. 565-586

16. Jarosik N., Bennett C.L., Dunkley J. et al. *Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results* // *ApJ Supp.* – 2011 – vol. 192 – id 14
17. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Huchtmeier W.K., Makarov D.I. *A Catalog of Neighboring Galaxies* // *AJ* – 2004 – vol. 127 – p. 2031-2068
18. Karachentsev I.D., Makarov D.I., Kaisina E.I. *Updated Nearby Galaxy Catalog* // *AJ* – 2013 – vol. 145 – id 101
19. Courtois H.M., Tully R.B., Heraudeau P. *Cosmic flows: University of Hawaii 2.2-m I-band photometry* // *MNRAS* – 2011 – vol. 415 – p. 1935-1942
20. Jacobs B.A., Rizzi L., Tully R.B. et al. *The Extragalactic Distance Database: Color-Magnitude Diagrams* // *AJ* – 2009 – vol. 138 – p. 332-337
21. Paturel G., Petit C., Prugniel P. et al. *HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies* // *A&A* - 2003a – vol. 412 – p. 45-55
22. Paturel G., Theureau G., Bottinelli L. et al. *HYPERLEDA. II. The homogenized HI data* // *A&A* - 2003b – vol. 412 – p. 57-67
23. Paturel G., Bottinelli L., Fouque P., Gouguenheim L. *The extragalactic database of the Lyon-Meudon Observatories* // *ESO Conference Workshop Proceedings* – 1988 – vol. 28 – p. 435-440
24. Prugniel P., Simien F. *The fundamental plane of early-type galaxies: stellar populations and mass-to-light ratio* // *A&A* – 1996 – vol. 309 – p. 749-759
25. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G.Jr. et al. *3d Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0h and 12h. Volume III: Data for galaxies between 12h and 24h* // 1991
26. Tully R.B., Fisher J.R. *A new method of determining distances to galaxies* // *A&A* – 1977 – vol. 54 – p. 661-673
27. Golev V., Prugniel P. *A catalogue of Mg₂ indices of galaxies and globular clusters* // *A&A Supp.* – 1998 – vol. 132 – p. 255-260
28. Gavrilovic N., Mickaelian A., Petit C. et al. *Activity type of galaxies in HyperLeda* // *Black Holes from Stars to Galaxies -- Across the Range of Masses*. Edited by V. Karas and G. Matt. *Proceedings of IAU Symposium #238* – 2007 – p. 371-372
29. Veron-Cetty M.-P., Veron P. *A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition* // *A&A* – 2010 – vol. 518 – id A10
30. Paturel G., Garcia A.M., Fouque P., Buta R. *An extragalactic database. III - Diameter reduction* // *A&A* – 1991 – vol. 243 – p. 319-327

31. Paturel G., Andernach H., Bottinelli L. et al. *Extragalactic database. VII. Reduction of astrophysical parameters* // A&A Supp. – 1997 – vol. 124 – p. 109-122
32. Prugniel P., Zasov A., Busarello G., Simien F. *A catalogue of spatially resolved kinematics of galaxies: Bibliography* // A&A Supp. – 1998 – vol. 127 – p. 117-118
33. Ahn C.P., Alexandroff R., Allende Prieto C. et al. *The Tenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment* // ApJ Supp. – 2014 – vol. 211 – id 17
34. Paturel G., Fouque P., Bottinelli L., Gouguenheim L. *An extragalactic database. I - The Catalogue of Principal Galaxies* // A&A Supp. – 1989 – vol. 80 – p. 299-315
35. Humphreys E.M.L., Reid M.J., Moran J.M. et al. *Toward a New Geometric Distance to the Active Galaxy NGC 4258. III. Final Results and the Hubble Constant* // ApJ – 2013 – vol. 775 – id 13
36. Rozanski R., Rowan-Robinson M. *The Accuracy of the Brightest Stars in Galaxies as Distance Indicators* // MNRAS – 1994 – vol. 271 – p. 530
37. Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K. et al. *Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant* // ApJ – 2001 – vol. 553 – p. 47-72
38. Feast M.W., Catchpole R.M. *The Cepheid period-luminosity zero-point from HIPPARCOS trigonometrical parallaxes* // MNRAS – 1997 – vol. 286 – p. L1-L5
39. Storm J., Gieren W., Fouque P. et al. *Calibrating the Cepheid period-luminosity relation from the infrared surface brightness technique. II. The effect of metallicity and the distance to the LMC* // A&A – 2011 – vol. 534 – id A95
40. Dolphin A.E. *Hubble Space Telescope Studies of the WLM Galaxy. II. The Star Formation History from Field Stars* // ApJ – 2000 – vol. 531 – p. 804-812
41. Battinelli P., Demers S. *The standard candle aspect of carbon stars* // A&A – 2005 – vol. 442 – p. 159-163
42. Kudritzki R.-P., Urbaneja M.A., Bresolin F. et al. *Quantitative Spectroscopy of 24 A Supergiants in the Sculptor Galaxy NGC 300: Flux-weighted Gravity-Luminosity Relationship, Metallicity, and Metallicity Gradient* // ApJ – 2008 – vol. 681 – p. 269-289
43. Di Criscienzo M., Caputo F., Marconi M., Musella I. *RR Lyrae-based calibration of the Globular Cluster Luminosity Function* // MNRAS – 2006 – vol. 365 – p. 1357-1366
44. Jordan A., Cote P., Blakeslee J.P. et al. *The ACS Virgo Cluster Survey. X. Half-Light Radii of Globular Clusters in Early-Type Galaxies: Environmental Dependencies and a Standard Ruler for Distance Estimation* // ApJ – 2005 – vol. 634 – p. 1002-1019
45. Carretta E., Gratton R.G., Clementini G., Fusi Pecci F. *Distances, Ages, and Epoch of Formation of Globular Clusters* // ApJ – 2000 – vol. 533 – p. 215-235

46. Ita Y., Matsunaga N. *Period-magnitude relation of Mira-like variables in the Large Magellanic Cloud as a tool to understanding circumstellar extinction* // MNRAS – 2011 – vol. 412 – p. 2345-2352
47. Ciardullo R., Feldmeier J.J., Jacoby G.H. et al. *Planetary Nebulae as Standard Candles. XII. Connecting the Population I and Population II Distance Scales* // ApJ – 2002 – vol. 577 – p. 31-50
48. Girardi L., Salaris M. *Population effects on the red giant clump absolute magnitude, and distance determinations to nearby galaxies* // MNRAS – 2001 – vol. 323 – p. 109-129
49. Pierce M.J., Jurcevic J.S., Crabtree D. *Period-luminosity relations for red supergiant variables - I. The calibration* // MNRAS – 2000 – vol. 313 – p. 271-280
50. Tonry J., Schneider D.P. *A new technique for measuring extragalactic distances* // AJ – 1988 – vol. 96 – p. 807-815
51. Rizzi L., Tully R.B., Makarov D. et al. *Tip of the Red Giant Branch Distances. II. Zero-Point Calibration* // ApJ – 2007 – vol. 661 – p. 815-829
52. Tully R.B., Courtois H.M., Dolphin A.E. et al. *Cosmicflows-2: The Data* // AJ – 2013 – vol. 146 – id 86
53. Kelson D.D., Illingworth G.D., Tonry J.L. et al. *The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXVII. A Derivation of the Hubble Constant Using the Fundamental Plane and Dn- σ Relations in Leo I, Virgo, and Fornax* // ApJ – 2000 – vol. 529 – p. 768-785
54. Paturel G. *Direct determination of extragalactic distances from the 21 centimeter line width and the method of 'sosies'* // ApJ – 1984 – vol. 282 – p. 382-386
55. Tully R.B., Courtois H.M. *Cosmicflows-2: I-band Luminosity-H I Linewidth Calibration* // ApJ – 2012 – vol. 749 – id 78
56. McGaugh S.S., Schombert J.M., Bothun G.D., de Blok W.J.G. *The Baryonic Tully-Fisher Relation* // ApJ – 2000 – vol. 533 – p. L99-L102
57. De Rijcke S., Zeilinger W.W., Hau G.K.T. et al. *Generalizations of the Tully-Fisher Relation for Early- and Late-Type Galaxies* // ApJ – 2007 – vol. 659 – p. 1172-1175
58. Tully R.B., Pierce M.J. *Distances to Galaxies from the Correlation between Luminosities and Line Widths. III. Cluster Template and Global Measurement of H0* // ApJ – 2000 – vol. 533 – p. 744-780
59. Makarov D., Makarova L., Rizzi L. et al. *Tip of the Red Giant Branch Distances. I. Optimization of a Maximum Likelihood Algorithm* // AJ – 2006 – vol. 132 – p. 2729-2742
60. Makarov D I., Makarova L.N., Uklein R.I. *Distances to dwarf galaxies of the Canes Venatici I cloud* // Astrophys. Bull. – 2013 – vol. 68 – p. 125-138

61. Radburn-Smith D.J., de Jong R.S., Seth A.C. et al. *The GHOSTS Survey. I. Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Data* // *ApJ Supp.* – 2011 – vol. 195 – id 18
62. Dalcanton J.J., Williams B.F., Seth A.C. et al. *The ACS Nearby Galaxy Survey Treasury* // *ApJ Supp.* - 2009 – vol. 183 – p. 67-108
63. Lee M.G., Freedman W.L., Madore B.F. *The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator for Resolved Galaxies* // *ApJ* – 1993 – vol. 417 – p. 553
64. Saha A., Thim F., Tammann G.A. et al. *Cepheid Distances to SNe Ia Host Galaxies Based on a Revised Photometric Zero Point of the HST WFPC2 and New PL Relations and Metallicity Corrections* // *ApJ Supp.* – 2006 – vol. 165 – p. 108-137
65. Fouque P., Storm J., Gieren W. *Calibration of the Distance Scale from Cepheids* // *Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale*, Edited by D. Alloin and W. Gieren, *Lecture Notes in Physics* – 2003 – vol. 635 – p. 21-44
66. Kanbur S.M., Ngeow C., Nikolaev S. et al. *The extra-galactic Cepheid distance scale from LMC and Galactic period-luminosity relations* // *A&A* – 2003 – vol. 411 – p. 361-379
67. Tammann G.A., Sandage A., Reindl B. *New Period-Luminosity and Period-Color relations of classical Cepheids: I. Cepheids in the Galaxy* // *A&A* – 2003 – vol. 404 – p. 423-448
68. Lanoix P., Paturel G., Garnier R. *Direct calibration of the Cepheid period-luminosity relation* // *MNRAS* – 1999 – vol. 308 – p. 969-978
69. Udalski A., Szymanski M., Kubiak M. et al. *The Optical Gravitational Lensing Experiment. Cepheids in the Magellanic Clouds. III. Period-Luminosity-Color and Period-Luminosity Relations of Classical Cepheids* // *Acta Astron.* – 1999 – vol. 49 – p. 201-221
70. Gieren W.P., Fouque P., Gomez M. *Cepheid Period-Radius and Period-Luminosity Relations and the Distance to the Large Magellanic Cloud* // *ApJ* – 1998 – vol. 496 – p. 17-30
71. Madore B.F., Freedman W.L. *The Cepheid distance scale* // *PASP* – 1991 – vol. 103 – p. 933-957
72. Jensen J.B., Tonry J.L., Barris B.J. et al. *Measuring Distances and Probing the Unresolved Stellar Populations of Galaxies Using Infrared Surface Brightness Fluctuations* // *ApJ* – 2003 – vol. 583 – p. 712-726
73. Tonry J. L., Blakeslee J.P., Ajhar E.A., Dressler A. *The Surface Brightness Fluctuation Survey of Galaxy Distances. II. Local and Large-Scale Flows* // *ApJ* – 2000 – vol. 530 – p. 625-651
74. Ciardullo R., Jacoby G.H., Ford H.C., Neill J.D. *Planetary nebulae as standard candles. II - The calibration in M31 and its companions* // *ApJ* – 1989 – vol. 339 – p. 53-69
75. Sakai S., Madore B.F., Freedman W.L. *Tip of the Red Giant Branch Distances to Galaxies. III. The Dwarf Galaxy Sextans A* // *ApJ* – 1996 – vol. 461 – p. 713

76. Bellazzini M., Ferraro F.R., Pancino E. *A Step toward the Calibration of the Red Giant Branch Tip as a Standard Candle* // *ApJ* – 2001 – vol. 556 – p. 635-640
77. Lisenfeld U., Verdes-Montenegro L., Sulentic J. et al., *The AMIGA sample of isolated galaxies. III. IRAS data and infrared diagnostics* // *A&A* – 2007 – vol. 462 – p. 507-523
78. Heidmann J., Heidmann N., de Vaucouleurs G. *Inclination and absorption effects on the apparent diameters, optical luminosities and neutral hydrogen radiation of galaxies—I. Optical and 21-cm line data* // *MmRAS* – 1972 – vol. 75 – p. 85
79. Peters S.P.C., van der Kruit P.C., Allen R.J. et al., *The shape of dark matter haloes – II. The GALACTUS HI modelling & fitting tool* // *MNRAS* – 2017 – vol. 464 – p. 21-31
80. Dalcanton J.J., Yoachim P., Bernstein R. A. *The Formation of Dust Lanes: Implications for Galaxy Evolution* // *ApJ* – 2004 – vol. 608 – p. 189-207
81. Strauss M.A., Willick J.A. *The density and peculiar velocity fields of nearby galaxies* // *Physics Repots* – 1995 – vol. 261 – p. 271-431
82. Sakai S., Mould J.R., Hughes S.M.G. et al. *The Hubble Space Telescope Key Project on the Extragalactic Distance Scale. XXIV. The Calibration of Tully-Fisher Relations and the Value of the Hubble Constant* // *ApJ* – 2000 – vol. 529 – p. 698-722
83. Karachentsev I.D., Kaisina E.I., Kashibadze O.G. *The local Tully-Fisher relation for dwarf galaxies* // *AJ* – 2017 – vol. 153 – id 6
84. Brook C.B., Santos-Santos I., Stinson G. *The different baryonic Tully-Fisher relations at low masses* // *MNRAS* – 2016 – vol. 459 – p. 638-645
85. Komatsu E., Dunkley J., Nolte M.R. et al. *Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation* // *ApJ Supp.* – 2009 – vol. 180 – p. 330-376
86. Papastergis E., Adams E.A.K., van der Hulst J.M. *An accurate measurement of the baryonic Tully-Fisher relation with heavily gas-dominated ALFALFA galaxies* // *A&A* – 2016 – vol. 593 – id A39
87. Sales L.V., Navarro J.F., Oman K. et al. *The low-mass end of the baryonic Tully-Fisher relation* // *MNRAS* – 2017 – vol. 464 – p. 2419-2428
88. Di Teodoro E.M., Fraternali F., Miller S.H. *Flat rotation curves and low velocity dispersions in KMOS star-forming galaxies at $z \sim 1$* // *A&A* – 2016 – vol. 594 – id A77
89. Puech M., Hammer F., Flores H. et al. *The Evolution of the Tully-Fisher Relation over the Past 6 Gyr* // *Galaxies in Isolation: Exploring Nature Versus Nurture*, proceedings of a conference held 12 to 15 May 2009 in Granada, Spain. Edited by Lourdes Verdes-Montenegro, Ascención del Olmo, and Jack Sulentic. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific – 2010 – p. 281
90. Karachentsev I. *Thin edge-on galaxies as a tool for the investigation of large-scale streaming motions in the universe* // *AJ* – 1989 – vol. 97 – p. 1566-1575

91. Karachentsev I.D. *Flat edge-on galaxies on the Tully-Fischer diagram* // Pisma v Astronomicheskii Zhurnal – 1991 – vol. 17 – p. 671-683
92. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Parnovskij S.L. *Flat galaxy catalogue* // Astronomische Nachrichten – 1993 – vol. 314 p. 97-222
93. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Y.N., Parnovsky S.L. *Largescale Streaming of Flat Galaxies* // Astronomische Nachrichten – 1995 – vol. 316 – p. 369
94. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Y.N., Parnovskii S.L. *The Bulk Motion of FGC Galaxies on Scales of 100 Mpc* // ARep – 2000a – vol. 44 – p. 150-160
95. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Y.N. et al. *A list of peculiar velocities of RFGC galaxies* // Bulletin of the Special Astrophysics Observatory – 2000b – vol. 50 – p. 5-38
96. Парновский С.Л., Кудря Ю.Н., Караченцева В.Е., Караченцев И.Д. *Коллективное движение плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и октупольном приближениях* // ПАЖ – 2001 – том 27 – с. 890-900
97. Kudrya Y.N., Karachentseva V.E., Karachentsev I.D. et al. *The bulk motion of flat edge-on galaxies based on 2MASS photometry* // A&A – 2003 – vol. 407 – p. 889-898
98. Парновский С.Л., Тугай А.В. *Коллективные движения плоских галактик на масштабе 100 Мпк с использованием новых данных* // ПАЖ – 2004 – том 30 – с. 403-413
99. Kashibadze O.G. *Multiparametric infrared Tully-Fisher relation as a tool for mapping cosmic flows* // Astrophysics – 2008 – vol. 51 – p. 336-348
100. Parnovsky S.L., Parnowski A.S. *Large-scale collective motion of RFGC galaxies* // Ap&SS – 2010 – vol. 325 – p. 163-175
101. Kudrya Y.N., Karachentseva V.E., Karachentsev I.D. *Apparent magnitudes and Tully-Fisher's diagram for FGC galaxies* // AstL – 1997 – vol. 23 – p. 633-637
102. Karachentsev I.D., Mitronova S.N., Karachentseva V.E. et al. *The 2MASS Tully-Fisher relation for flat edge-on galaxies* // A&A – 2002 – vol. 396 – p. 431-438
103. Courtois H.M., Tully R.B., Makarov D.I. et al. *Cosmic Flows: Green Bank Telescope and Parkes HI observations* // MNRAS – 2011 – vol. 414 – p. 2005-2016
104. Zasov A.V., Makarov D.I., Mikhailova E.A. *Thickness of Thin Stellar Disks and the Mass of the Dark Halo* // Soviet Astronomy Letters – 1991 – vol. 17 – p. 374
105. Сотникова Н.Я., Родионов С.А. *Оценка массы темно-го гало по относительной толщине звездного диска* // ПАЖ – 2006 – том 32 – с. 723-736
106. Karachentsev I.D., Tully R.B., Wu P.-F. et al. *Infall of Nearby Galaxies into the Virgo Cluster as Traced with Hubble Space Telescope* // ApJ – 2014 – vol. 782 – id 4
107. Courtois H.M., Tully R.B. *Update on HI data collection from Green Bank, Parkes and Arecibo telescopes for the Cosmic Flows project* // MNRAS – 2015 – vol. 447 – p. 1531-1534

108. Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M. *Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds* // *ApJ* – 1998 – vol. 500 – p. 525-553
109. Chilingarian I.V., Melchior A.-L., Zolotukhin I.Y. *Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands* // *MNRAS* – 2010 – vol. 405 – p. 1409-1420
110. Chilingarian I.V., Zolotukhin I.Y. *A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies* // *MNRAS* – 2012 – vol. 419 – p. 1727-1739
111. Karachentseva V.E., Kudrya Y N., Karachentsev I.D. et al. *Ultra-flat galaxies selected from RFGC catalog. I. The sample properties* // *Astrophysical Bulletin* – 2016 – vol. 71 – p. 1-13
112. Tully R.B., Courtois H., Hoffman Y., Pomarede D. *The Laniakea supercluster of galaxies* // *Nature* – 2014 – vol. 513 – p. 71-73
113. Hoffman Y., Courtois H.M., Tully R.B. *Cosmic bulk flow and the local motion from Cosmicflows-2* // *MNRAS* – 2015 – vol. 449 – p. 4494-4505
114. Fixsen D.J., Cheng E.S., Gales J.M. et al. *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE FIRAS Data Set* // *ApJ* – 1996 – vol. 473 – p. 576
115. Karachentsev I.D., Makarov D.A. *The Galaxy Motion Relative to Nearby Galaxies and the Local Velocity Field* // *AJ* – 1996 – vol. 111 – p. 794
116. Haynes M.P., Giovanelli R., Martin A.M. et al. *The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The α .40 HI Source Catalog, Its Characteristics and Their Impact on the Derivation of the HI Mass Function* // *AJ* – 2011 – vol. 142 – id 170
117. Theureau G., Bottinelli L., Coudreau-Durand N. et al. *Kinematics of the local universe. VII. New 21-cm line measurements of 2112 galaxies* // *A&A Supp.* – 1998 – vol. 130 – p. 333-339
118. Pantoja C.A., Alschuler D.R., Giovanardi C., Giovanelli R. *21-cm Line Observations of Galaxies in the Zone of Avoidance* // *AJ* – 1997 – vol. 113 – p. 905-936
119. Matthews L.D., van Driel W. *An HI survey of highly flattened, edge-on, pure disk galaxies* // *A&A Supp.* – 2000 – vol. 143 – p. 421-456
120. Sanchez-Janssen R., Mendez-Abreu J., Aguerri J.A.L. *Thin discs, thick dwarfs and the effects of stellar feedback* // *MNRAS* – 2010 – vol. 406 – p. L65-L69
121. Guo Q., White S., Boylan-Kolchin M. et al. *From dwarf spheroidals to cD galaxies: simulating the galaxy population in a Λ CDM cosmology* // *MNRAS* – 2011 – vol. 413 – p. 101-131
122. Springel V., White S.D.M., Jenkins A. et al. *Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars* // *Nature* – 2005 – vol. 435 – p. 629-636
123. Boylan-Kolchin M., Springel V., White S.D.M. et al. *Resolving cosmic structure formation with the Millennium-II Simulation* // *MNRAS* – 2009 – vol. 398 – p. 1150-1164

124. Tully R.B., Pierce M.J., Huang J.-S. et al. *Global Extinction in Spiral Galaxies* // AJ – 1998 – vol. 115 – p. 2264-2272
125. Karachentsev I.D., Tully R.B., Makarova L.N. et al. *Peculiar Velocities of Galaxies in the Leo Spur* // ApJ – 2015 – vol. 805 – id 144
126. Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А. *Звездные подсистемы разного возраста в спиральных и иррегулярных галактиках* // ПАЖ – 2012 – том 38 – с. 172-182
127. Radburn-Smith D.J., de Jong R.S., Seth A.C. et al. *The GHOSTS Survey. I. Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Data* // ApJ Supp. – 2011 – vol, 195 – id 18
128. Tully R.B., Rizzi L., Dolphin A.E. et al. *Associations of Dwarf Galaxies* // AJ – 2006 – vol. 132 – p. 729-748
129. Seth A.C., Dalcanton J.J., de Jong R.S. *A Study of Edge-On Galaxies with the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. I. Initial Results* // AJ – 2005 – vol. 129 – p. 1331-1349
130. Mouhcine M., Ferguson H.C., Rich R.M. et al. *Halos of Spiral Galaxies. I. The Tip of the Red Giant Branch as a Distance Indicator* // ApJ – 2005 – vol. 633 – p. 810-820
131. Tikhonov N.A., Galazutdinova O.A. *Stellar Disks and Halos of Edge-on Spiral Galaxies: NGC 891, NGC 4144, and NGC 4244* // Astrophysics – 2005 – vol. 48 – p. 221-236
132. Karachentsev I.D., Sharina M.E., Dolphin A.E. et al. *Galaxy flow in the Canes Venatici I cloud* // A&A – 2003 – vol. 398 – p. 467-477
133. Засов А.В., Бизяев Д.В., Макаров Д.И., Тюрина Н.В. *Связь толщины звездных дисков с относительной массой темного гало галактик* // ПАЖ – 2002 – том 28 – с. 599-608
134. Palunas P., Williams T.B. *Maximum Disk Mass Models for Spiral Galaxies* // AJ – 2000 – vol. 120 – p. 2884-2903
135. de Blok W.J.G., Walter F., Brinks E. et al. *High-Resolution Rotation Curves and Galaxy Mass Models from THINGS* // ApJ – 2008 – vol. 136 – p. 2648-2719
136. Засов А.В., Хоперсков А.В., Сабурова А.С. *Гравитационная устойчивость и динамическая перегретость звездных дисков галактик* // ПАЖ – 2011 – том 37 – с. 410-421
137. Read J.I., Mayer L., Brooks A.M. et al. *A dark matter disc in three cosmological simulations of Milky Way mass galaxies* // MNRAS – 2009 – vol. 397 – p. 44-51 (2009)
138. Garbari S., Liu Ch., Read J.I., Lake G. *A new determination of the local dark matter density from the kinematics of K dwarfs* // MNRAS – 2012 – vol. 425 – p. 1445-1458
139. Carignan C. *Light and mass distribution of the Magellanic-type spiral NGC 3109* // ApJ – 1985 – vol. 299 – p. 59-73
140. Carignan C., Puche D. *H I studies of the Sculptor group galaxies. II - NGC 7793* // AJ – 1990 – vol. 100 – p. 394-402

141. Sancisi R. *Neutral Hydrogen and Dark Matter in Spiral Galaxies* // Ap&SS – 1999 – vol. 269 – p. 59-76
142. Jobin M., Carignan C. *The dark side of NGC 3109* // AJ – 1990 – vol. 100 – p. 648-662
143. Hoekstra H., van Albada T.S., Sancisi R. *On the apparent coupling of neutral hydrogen and dark matter in spiral galaxies* // MNRAS – 2001 – vol. 323 – p. 453-459
144. Hessman F.V., Ziebart M. *The Bosma effect revisited. I. HI and stellar disc scaling models* // A&A – 2011 – vol. 532 – id A121
145. Swaters R.A., Sancisi R., van der Hulst J. M. et al. *The link between the baryonic mass distribution and the rotation curve shape* // MNRAS – 2012 – vol. 425 – p. 2299-2308
146. Pfenniger D., Combes F., Martinet L. *Is dark matter in spiral galaxies cold gas? I. Observational constraints and dynamical clues about galaxy evolution* // A&A – 1994 – vol. 285 – p. 79-93
147. Pfenniger D., Combes F. *Is dark matter in spiral galaxies cold gas? II. Fractal models and star non-formation* // A&A – 1994 – p. 285 – p. 94-118
148. Heraudeau Ph., Simien F. *Stellar kinematical data for the central region of spiral galaxies. I.* // A&A Supp. – - vol. 133 – p. 317-323
149. Leroy A.K., Walter F., Brinks E. et al. *The Star Formation Efficiency in Nearby Galaxies: Measuring Where Gas Forms Stars Effectively* // ApJ – 2008 – vol. 136 – p. 2782-2845
150. Bottema R. *The Stellar Kinematics of Galactic Disks* // A&A – 1993 – vol. 275 – p. 16
151. Whitmore B.C., Kirshner R. P., Schechter P.L. *Velocity dispersions in the bulges of spiral galaxies* // ApJ – 1979 – vol. 234 – p. 68-75
152. Mulder P.S. *Optical morphology and kinematics of the inner regions of NGC 4736* // A&A – 1995 – vol. 303 – p. 57
153. Терехова (Зайцева) Н.А. *О связи темной материи с нейтральным водородом в спиральных галактиках* // АЖ – 2012 – том 89 – с. 560-567
154. Weldrake D.T.F., de Blok W.J.G., Walter F. *A high-resolution rotation curve of NGC 6822: a test-case for cold dark matter* // MNRAS – 2003 – vol. 340 – p. 12-28
155. Martin C.L., Kennicutt R.C.Jr. *Star Formation Thresholds in Galactic Disks* // ApJ – 2001 – vol. 555 – p. 301-321
156. Wong T., Blitz L. *The Relationship between Gas Content and Star Formation in Molecule-rich Spiral Galaxies* // ApJ – 2002 – vol. 569 – p. 157-183
157. Boissier S., Prantzos N., Boselli A., Gavazzi G. *The star formation rate in disc galaxies: thresholds and dependence on gas amount* // MNRAS – 2003 – vol. 346 – p. 1215-1230
158. Hunter D.A., Elmegreen B.G., Oh S.-H. et al., *The Outer Disks of Dwarf Irregular Galaxies* // AJ – 2011 – vol. 142 – id 121

159. van Zee L., Haynes M.P., Salzer J.J., Broeils A.H. *A Comparative Study of Star Formation Thresholds in Gas-Rich Low Surface Brightness Dwarf Galaxies* // AJ – 1997 – vol. 113 – p. 1618-1637
160. Noordermeer E., van der Hulst J.M., Sancisi R.E. et al. *The Westerbork HI survey of spiral and irregular galaxies. III. HI observations of early-type disk galaxies* // A&A – 2005 – vol. 442 – p. 137-157
161. Rafikov R.R. *The local axisymmetric instability criterion in a thin, rotating, multicomponent disc* // MNRAS – 2001 – vol. 323 – p. 445-452
162. Casertano S. *Rotation curve of the edge-on spiral galaxy NGC 5907: disc and halo masses* // MNRAS – 1983 – vol. 203 – p. 735-747
163. de Blok W.J.G., McGaugh S.S., Rubin V.C. *High-Resolution Rotation Curves of Low Surface Brightness Galaxies. II. Mass Models* // AJ – 2001 – vol. 122 – p. 2396-2427
164. Broeils A.H. *The mass distribution of the dwarf spiral NGC 1560* // A&A – 1992 – vol. 256 – p. 19-32
165. Oh S.-H., de Blok W.J.G., Walter F. et al. *High-Resolution Dark Matter Density Profiles of THINGS Dwarf Galaxies: Correcting for Noncircular Motions* // AJ – 2008 – vol. 136 – p. 2761-2781
166. de Blok W.J.G., McGaugh S.S., van der Hulst J.M. *HI observations of low surface brightness galaxies: probing low-density galaxies* // MNRAS – 1996 – vol. 283 – p. 18-54
167. Cote S., Carignan C., Sancisi R. *A dark-halo-dominated galaxy - NGC 5585* // AJ – 1991 – vol. 102 – p. 904-913
168. Meurer G.R., Zheng Zh., de Blok W.J.G. *Disc stability and neutral hydrogen as a tracer of dark matter* // MNRAS – 2013 – vol. 429 – p. 2537-2549
169. Khoperskov A.V., Zasov A.V., Tyurina N.V. *Minimum Velocity Dispersion in Stable Stellar Disks. Numerical Simulations* // ARep – 2003 – vol. 47 – p. 357-376
170. Wang B., Silk J. *Gravitational instability and disk star formation* // ApJ – 1994 – vol. 427 – p. 759-769
171. Shapiro K.L., Gerssen J., and van der Marel R.P. *Observational Constraints on Disk Heating as a Function of Hubble Type* // ApJ – 2003 – vol. 126 – p. 2707-2716
172. Brammer G.B., Whitaker K.E., van Dokkum P.G. et al. *The Dead Sequence: A Clear Bimodality in Galaxy Colors from $z = 0$ to $z = 2.5$* // ApJ – 2009 – vol. 706 – p. L173-L177
173. Bundy K., Scarlata C., Carollo C.M. et al. *The Rise and Fall of Passive Disk Galaxies: Morphological Evolution Along the Red Sequence Revealed by COSMOS* // ApJ – 2010 – vol. 719 – p. 1969-1983

174. Vulcani B., Poggianti B.M., Fritz J. et al. *From Blue Star-forming to Red Passive: Galaxies in Transition in Different Environments* // ApJ – 2015 – vol. 798 – id 52
175. Solanes J.M., Giovanelli R., Haynes M.P. *The H I Content of Spirals. I. Field Galaxy H I Mass Functions and H I Mass--Optical Size Regressions* // ApJ – 1996 – vol. 461 – p. 609
176. Toribio M.C., Solanes J.M., Giovanelli R. et al. *H I Content and Optical Properties of Field Galaxies from the ALFALFA Survey. II. Multivariate Analysis of a Galaxy Sample in Low-density Environments* // ApJ – 2011 – vol. 732 – id 93
177. Wang J., Koribalski B.S., Serra P. et al. *New lessons from the H I size-mass relation of galaxies* // MNRAS – 2016 – vol. 460 – p. 2143-2151
178. Bradford J.D., Geha M.C., Blanton M.R. *A Study in Blue: The Baryon Content of Isolated Low-mass Galaxies* // ApJ – 2015 – vol. 809 – id 146
179. Lelli F., McGaugh S.S., Schombert J.M. *SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves* // AJ – 2016 – vol. 152 – id 157
180. Evoli C., Salucci P., Lapi A., Danese L. *The H I Content of Local Late-type Galaxies* // ApJ – 2011 – vol. 743 – id 45
181. Begum A., Chengalur J.N., Karachentsev I.D., Sharina M.E. *Baryonic Tully-Fisher relation for extremely low mass Galaxies* // MNRAS – 2008 – vol. 386 – p. 138-144
182. Huang S., Haynes M.P., Giovanelli R., Brinchmann J. *The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The Galaxy Population Detected by ALFALFA* // ApJ – 2012 – vol. 756 – id 113
183. Сафонова Е.С. *Дефицит атомарного водорода в галактиках скоплений Virgo и Coma: новый метод оценки* // АЖ – 2011 – том 88 – с. 1102
184. Zasov A.V., Sulentic J.W. *Interaction, star formation, and H I deficiency in E + S pairs* // ApJ – 1994 – vol. 430 – p. 179-185
185. Засов А.В., Смирнова А.А. *Содержание газа в дисках галактик: связь с кинематикой* // ПАЖ – 2005 – том 31 – с. 178-189
186. Obreschkow D., Glazebrook K., Kilborn V., Lutz K. *Angular Momentum Regulates Atomic Gas Fractions of Galactic Disks* // ApJ – 2016 – vol. 824 – id L26
187. Bigiel F., Blitz L. *A Universal Neutral Gas Profile for nearby Disk Galaxies* // ApJ – 2012 – vol. 756 – id 183
188. Martinsson Th.P.K., Verheijen M.A.W., Bershady M.A. et al. *The DiskMass Survey. X. Radio synthesis imaging of spiral galaxies* // A&A – 2016 – vol. 585 – id A99
189. Swaters R.A., van Albada T.S., van der Hulst J.M., Sancisi R. *The Westerbork HI survey of spiral and irregular galaxies. I. HI imaging of late-type dwarf galaxies* // A&A – 2002 – vol. 390 – p. 829-861

190. Bigiel F., Leroy A., Walter F. et al. *Extremely Inefficient Star Formation in the Outer Disks of Nearby Galaxies* // AJ – 2010 – vol. 140 – p. 1194-1213
191. Bothwell M.S., Wagg J., Cicone C. et al. *ALLSMOG: an APEX Low-redshift Legacy Survey for MOlecular Gas - I. Molecular gas scaling relations, and the effect of the CO/H₂ conversion factor* // MNRAS – 2014 – vol. 445 – p. 2599-2620
192. Lisenfeld U., Espada D., Verdes-Montenegro L. et al. *The AMIGA sample of isolated galaxies. IX. Molecular gas properties* // A&A – 2011 – vol. 534 – id A102
193. Karachentseva V.E., Lebedev V.S., Shcherbanovskij A.L. *Catalogue of Isolated Galaxies* // Bull. Inf. CDS – 1986 – vol. 30 – p. 125
194. Hall M., Courteau S., Dutton A.A. et al. *An investigation of Sloan Digital Sky Survey imaging data and multiband scaling relations of spiral galaxies* // MNRAS – 2012 – vol. 425 – p. 2741-2765
195. Russell D.G. *The H I Line Width/Linear Diameter Relationship as an Independent Test of the Hubble Constant* // ApJ – 2002 – vol. 565 – p. 681-695
196. Sachdeva S., Saha K. *Survival of Pure Disk Galaxies over the Last 8 Billion Years* // ApJ Lett. – 2016 – vol. 820 – id L4
197. Stinson G.S., Dutton A.A., Wang L. et al. *NIHAO III: the constant disc gas mass conspiracy* // MNRAS – 2015 – vol. 454 – p. 1105-1116
198. Quirk W.J. *On the Gas Content of Galaxies* // ApJ – 1972 – vol. 176 – p. L9
199. Засов А.В., Симаков С.Г. *Распределение газа в галактиках и гравитационная устойчивость газовых дисков* // Астрофизика – 1988 – том 29 – с. 190-198
200. Kennicutt R.C.Jr. *The star formation law in galactic disks* // ApJ – 1989 – vol. 344 – p. 685-703
201. Засов А.В., Терехова (Зайцева) Н.А. *О связи распределения нейтрального водорода с темной массой в галактиках* // ПАЖ – 2013 – том 39 – с. 323-331
202. Kim W.-T., Ostriker E.C. *Gravitational Runaway and Turbulence Driving in Star-Gas Galactic Disks* // ApJ – 2007 – vol. 660 – p. 1232-1245
203. Westfall K.B., Andersen D.R., Bershadsky M.A. et al. *The DiskMass Survey. VIII. On the Relationship between Disk Stability and Star Formation* // ApJ – 2014 – vol. 785 – id 43
204. Elmegreen B.G., Hunter D.A. *A Star Formation Law for Dwarf Irregular Galaxies* // ApJ – 2015 – vol. 805 – id 145
205. Ianjamasimanana R., de Blok W.J.G., Walter F. et al. *The Radial Variation of H I Velocity Dispersions in Dwarfs and Spirals* // AJ – 2015 – vol. 150 – id 47

206. Kim W.-T., Ostriker E.C. *Amplification, Saturation, and Q Thresholds for Runaway: Growth of Self-Gravitating Structures in Models of Magnetized Galactic Gas Disks* // *ApJ* – 2001 – vol. 559 – p. 70-95.
207. Поляченко В.Л., Поляченко Е.В., Стрельников А.В. *Критерий устойчивости для газовых самогравитирующих дисков* // *ПАЖ* – 1997 – том 23 – с. 551-560
208. Zasov A.V. *Large-scale distribution of hydrogen in galaxies* // *Soviet Astronomy* – 1975 – vol. 18 – p. 730-733
209. Абрамова О.В., Засов А.В. *Объёмная плотность газа в дисках галактик с низкой поверхностной плотностью HI* // *АЖ* – 2011 – том 88 – с. 228-240
210. Schechtman-Rook A., Hess K.M. *NGC 4656UV: A UV-selected Tidal Dwarf Galaxy Candidate* // *ApJ* – 2012 – vol. 750 – id 171
211. Zasov A.V., Saburova A.S., Egorov O.V. et al. *Interacting galaxy NGC4656 and its unusual dwarf companion* // *MNRAS* – 2017 – vol. 469 – p. 4370-4377
212. Boissier S., Gil de Paz A., Boselli A. et al. *Radial Variation of Attenuation and Star Formation in the Largest Late-Type Disks Observed with GALEX* // *ApJ Supp.* – 2007 – vol. 173 – p. 524-537
213. Elmegreen B.G. *Gravitational Instabilities in Two-component Galaxy Disks with Gas Dissipation* // *ApJ* – 2011 – vol. 737 – id 10
214. Romeo A.B., Falstad N. *A simple and accurate approximation for the Q stability parameter in multicomponent and realistically thick discs* // *MNRAS* – 2013 – vol. 433 – p. 1389-1397
215. Yim K., Wong T., Howk J.Ch., van der Hulst J.M. *The Interstellar Medium and Star Formation in Edge-on Galaxies. I. NGC 891* // *ApJ* – 2011 – vol. 141 – id 48
216. Romeo A.B., Wiegert J. *The effective stability parameter for two-component galactic discs: is $Q^{-1} \approx Q^{-1}_{stars} + Q^{-1}_{gas}$?* // *MNRAS* – 2011 – vol. 416 – p. 1191-1196
217. de Grijs R., Peletier R.F. *The shape of galaxy disks: how the scale height increases with galactocentric distance* // *A&A* – 1997 – vol. 320 – p. L21-L24
218. Yim K., Wong T., Xue R. et al. *The Interstellar Medium and Star Formation in Edge-On Galaxies. II. NGC 4157, 4565, and 5907* // *ApJ* – 2014 – vol. 148 – id 127
219. Schiminovich D., Catinella B., Kauffmann G. et al. *The GALEX Arecibo SDSS Survey - II. The star formation efficiency of massive galaxies* // *MNRAS* – 2010 – vol. 408 – p. 919-934
220. Wong O.I., Meurer J.R., Zheng Z. et al. *Characterizing uniform star formation efficiencies with marginally stable galactic discs* // *MNRAS* – 2016 – vol. 460 – p. 1106-1118
221. Huang Sh., Haynes M.P., Giovanelli R. et al. *HighMass-High HI Mass, HI-rich Galaxies at $z \sim 0$ Sample Definition, Optical and H α Imaging, and Star Formation Properties* // *ApJ* – 2014 – vol. 793 – id 40

222. Lutz K.A., Kilborn V.A., Koribalski B.S. et al. *The H I X galaxy survey - II. HI kinematics of HI eXtreme galaxies* // MNRAS – 2018 – vol. 476 – p. 3744-3780
223. Chowdhury A., Chengalur J.N. *Angular momentum content in gas-rich dwarf galaxies* // MNRAS – 2017 – vol. 467 – p. 3856-3863
224. Denes H., Kilborn V.A., Koribalski B.S. *New HI scaling relations to probe the HI content of galaxies via global HI-deficiency maps* // MNRAS – 2014 – vol. 444 – p. 667-681
225. Lutz K.A., Kilborn V.A., Catinella B. et al. *The HIX galaxy survey I: Study of the most gas rich galaxies from HIPASS* // MNRAS – 2017 – vol. 467 – p. 1083-1097
226. Neeleman M., Prochaska J.X., Ribaud J. et al. *The HI Content of the Universe Over the Past 10 GYRS* // ApJ – 2016 – vol. 818 – id 113