

УДК 524.7-327

ГАЛАКТИКИ СО СПАДАЮЩИМИ КРИВЫМИ ВРАЩЕНИЯ

© 2020 г. Д. И. Зобнина^{1,*}, А. В. Засов^{2,3,**}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

*E-mail: zobninadaria@mail.ru

**E-mail: a.v.zasov@gmail.com

Поступила в редакцию 25.10.2019 г.

После доработки 18.12.2019 г.

Принята к публикации 20.12.2019 г.

Рассматривается выборка из 22 спиральных галактик, составленная по литературным данным. Кривые вращения этих галактик проходят через максимум на расстоянии более ~ 1 кпк от центра, с последующим спадом скорости вращения. Положение галактик на диаграммах TF и VTF показывает, что на одной последовательности с другими галактиками лежат максимальные значения скоростей вращения. Скорости на периферии диска для некоторых галактик существенно ниже ожидаемых значений для данной массы или светимости, что позволяет связать спад кривой вращения с пониженным вкладом темного гало в скорость вращения. Для 7 галактик с наиболее протяженными кривыми вращения оценена масса диска с учетом темного гало (“ньютоновская” модель) и при отсутствии гало в рамках модели модифицированной ньютоновской динамики (MOND). В четырех из них модель MOND встречается со сложностями при интерпретации кривой вращения: параметр модели a_0 для согласия с наблюдениями должен сильно отличаться от ожидаемого значения $a_0 \sim 10^{-8}$ см/с², а оценка массы диска превышает значение, вытекающее из ИК фотометрии и из модели максимального диска. Наиболее резкий конфликт с MOND имеет место для NGC 157.

DOI: 10.31857/S0004629920050059

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиальные зависимости скорости кругового вращения дисков галактик (кривые вращения) $V(R)$, как правило, с ростом R выходят на протяженный плоский участок, характеризующийся почти постоянным значением скорости вращения V_{flat} . Однако в небольшом количестве случаев скорость вращения возрастает или падает на больших расстояниях от центра (см., напр., [1–4]).

Известно, что форма кривой вращения коррелирует с оптическими характеристиками галактик (см. обсуждение вопроса в работе [5]). Галактики со спадающими кривыми вращения относятся, как правило, к галактикам с высокой светимостью и поверхностной яркостью, в то время как непрерывный рост $V(R)$ обычно встречается у карликовых галактик (см., напр., [6], где авторы представляют “универсальную кривую вращения”, зависящую только от интегральной светимости галактики). Однако даже для массивных галактик заметный спад скорости вращения на периферии наблюдается не часто, а там, где он

имеет место, в некоторых случаях он может не отражать профиль круговой скорости.

Наблюдаемый спад кривой вращения может иметь несколько причин.

1. Недооценка скорости вращения, связанная с ошибками измерений, которые могут быть обусловлены такими причинами, как крупномасштабные некруговые движения газа или искривление плоскости диска на периферии галактики. Первый фактор обычно проявляется как асимметрия кривой вращения и становится очевидным при анализе двумерного поля скоростей. Для учета искривления диска, как правило, используются модели, в которых диск разбивается на концентрические кольца (“tilted rings model” [7] при обработке полей скоростей галактик.

2. Массивный, концентрированный к центру диск, ответственный за высокую скорость вращения на $R \sim 2R_d$ (R_d — радиальная шкала диска), где вклад диска в кривую вращения максимален.

3. Массивный плотный балдж, который может быть ответственен за быстрое вращение диска в центральной части галактики, и, как следствие, спад скорости на больших R .

4. Маломассивное или слабо концентрирующееся к центру гало, которое не дает большого вклада в кривую вращения в пределах области измерений.

Моделирование распределения массы в галактиках со спадающими кривыми вращения позволяет не только оценить массы основных компонентов галактик в рамках стандартного ньютоновского подхода, но и проверить возможность приложения не-ньютоновских моделей гравитации без темной материи, в которых асимптотическая скорость вращения на больших расстояниях от центра R , соответствующих очень низким ускорениям, должна выходить на константу.

Из альтернативных подходов наибольшее развитие получил подход, называемый модифицированной динамикой Ньютона (MOND), предлагающий альтернативу темной материи для объяснения плато кривых вращения на периферии галактик [8]. Подробный обзор теории MOND и ее приложения к наблюдениям можно найти, например, в работе [9]. В MOND предлагается такой характер ускорения в гравитационном поле $a_M(R)$, который асимптотически совпадает с классическим ньютоновским законом $a_M = a_N$ при достаточно больших ускорениях $a_M \gg a_0 \sim 10^{-8}$ см/с². Однако с уменьшением ускорения оно все больше отличается от ньютоновского значения, так что при $a_M \ll a_0$ ускорение в поле тяготеющей сферы падает как R^{-1} вместо R^{-2} , что обеспечивает постоянство круговой скорости при фиксированной массе вещества. Параметр a_0 при этом имеет универсальный характер.

Наиболее веский аргумент в пользу MOND заключается в том, что в рамках этой теории получается простое объяснение зависимости между массой барионного вещества M_{bar} в галактиках и скоростями вращения внешних областей дисков V_{flat} (т.н. барионная зависимость Талли-Фишера, или BTG-зависимость), которая, как показывают наблюдения, обладает удивительно малым разбросом точек вдоль предсказываемого MOND соотношения $M_{\text{bar}} \sim V^4$ [10, 11]. Универсальный характер радиального изменения дисперсии скоростей звезд в эллиптических галактиках (по данным MANGA) также не входит в противоречие с MOND [12].

Возможность использования MOND для интерпретации кривых вращения галактик рассматривалась в целом ряде работ, но результаты остаются противоречивыми. Использование дополнительного параметра, действительно, позволяет

в большинстве случаев интерпретировать кривые вращения галактик без введения темного гало столь же успешно, как и при его наличии (см., напр., [13]). При этом некоторые авторы ставят под сомнение универсальность параметра a_0 при моделировании отдельных галактик, как, например, ESO138–G014 [14] или NGC 3109 [15]. В работе [16] показано, что для карликовых и LSB-галактик MOND в 3/4 случаях хорошо объясняет наблюдаемую форму кривой вращения.

Проверкой MOND может служить возможность объяснения кривых вращения со спадающей скоростью вращения внешних областей, а также сопоставление оценки масс звездных дисков в этой модели со значениями, следующими из фотометрических оценок.

Целью данной работы являются:

1. поиск особенностей у галактик со спадающими кривыми вращения в сравнении с галактиками с плоскими кривыми вращения;
2. проверка того, насколько хорошо описываются спадающие кривые вращения галактик в теории MOND по сравнению с классическим подходом, насколько выдерживается универсальный характер постоянной a_0 , и как оценки масс дисков согласуются с их фотометрическими характеристиками.

2. ВЫБОРКИ ГАЛАКТИК

2.1. Выборка галактик со спадающими кривыми вращения

Выборка включает 22 спиральные галактики, отобранные по данным из литературы по следующим критериям:

1. галактики не относятся к тесно взаимодействующим системам (не числятся в каталогах Apg, VV) и не имеют близко расположенных соседей сопоставимой светимости;
2. измеренная кривая вращения не короче половины фотометрического радиуса $R_{25}/2$;
3. падение скорости вращения после прохождения максимума в пределах области, охватываемой имеющейся кривой вращения, составляет не менее 10–15%;
4. измеренный радиальный профиль скорости вращения симметричен относительно центра.

Околоядерный максимум кривой вращения в пределах $\sim 1-1.5$ кпк от центра, который наблюдается у части галактик, нами не принимался во внимание, поскольку его причина иная, чем у более далекого от центра максимума, и связана с особенностями динамики центральных областей, обусловленной прежде всего существованием плотного балджа и/или контрастного бара.

Таблица 1. Выборка галактик со спадающими кривыми вращения

| Галактика | d , Мпк | M_B , mag | Исп. линии | Ссылки | R_d , кпк | Ссылка |
|-----------------|-----------|-------------|--------------------------|----------|-------------|--------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) |
| NGC 157 (SABb) | 20.9 | -21.2 | H α , H I (2D) | [18, 19] | 1.6 | [20] |
| NGC 224 (Sb) | 0.79 | -21.2 | H I (2D) | [21] | 4.5 | [21] |
| NGC 512 (Sab) | 68.5 | -21.3 | H α , [N II] (1D) | [21] | 2.9 | [21] |
| NGC 582 (SBb) | 61.6 | -21 | H α , [N II] (1D) | [21] | 3.4 | [21] |
| NGC 753 (SABc) | 66.8 | -21.8 | H α (2D) | [22] | 4.6 | [23] |
| NGC 1642 (Sc) | 62.1 | -21.1 | H α , H I (2D) | [24] | 3.5 | [24] |
| NGC 2599 (Sa) | 68.4 | -21.3 | H α , H I (2D) | [24] | 9.0 | [24] |
| NGC 2841 (SBb) | 14.1 | -21.2 | H I (2D) | [17] | 4.6 | [17] |
| NGC 2903 (Sbc) | 8.9 | -20.9 | H I (2D) | [17] | 2.8 | [17] |
| NGC 3031 (Sab) | 3.6 | -20.7 | H I (2D) | [17] | 1.4 | [25] |
| NGC 3521 (SABb) | 10.7 | -20.9 | H I (2D) | [17] | 1.2 | [17] |
| NGC 3719 (Sbc) | 78.6 | -21.2 | FP H α (2D) | [22] | 3.6 | * |
| NGC 3893 (SABc) | 15.5 | -20.7 | FP H α (2D) | [26] | 2.1 | [26] |
| NGC 3992 (Sbc) | 18.6 | -21.3 | H I (2D) | [27] | 2.3 | [28] |
| NGC 4138 (S0-a) | 20.7 | -19.4 | N II, H I (2D) | [29] | 1.4 | [20] |
| NGC 4725 (SABa) | 11.9 | -20.7 | H I (1D) | [30] | 4.3 | [30] |
| NGC 4736 (SABa) | 4.7 | -19.8 | H I (2D) | [17] | 1.5 | [17] |
| NGC 5055 (Sbc) | 10.1 | -21.1 | H I (2D) | [17] | 3.6 | [17] |
| NGC 5297 (Sc) | 35 | -21.4 | FP H α | [22] | 5.7 | [31] |
| NGC 7793 (Scd) | 3.9 | -18.7 | H I (2D) | [17] | 1.3 | [17] |
| UGC 10692 (Sb) | 130 | -21.5 | H I (1D) | [21] | 8.6 | [21] |
| UGC 10981 (Sbc) | 151 | -21.9 | H α , [N II] (1D) | [21] | 5.1 | [21] |

Примечание. В столбцах приведены: (1) – название и тип галактики; (2) – принятое расстояние, Мпк; (3) – абсолютная зв. величина M_B , зв. вел.; (4) – спектральные линии, по которым строилась кривая вращения: щелевая (1D) или двумерная (2D) спектроскопия; (5) – источник кривой вращения; (6) – шкала диска R_d , кпк; (7) – источник шкалы диска. * – данные из настоящей работы.

Выборка, безусловно, является неполной и содержит те немногие сравнительно близкие галактики, которые, по мнению авторов, имеют в настоящее время наиболее надежно измеренные “спадающие” кривые вращения. Ссылки на первоисточники по кривым вращения приведены в табл. 1.

Одна из галактик выборки (NGC 753) находится в скоплении, часть галактик относится к парам или группам, но среди них нет тесных пар. В выборку входит NGC 3031, являющаяся главным членом группы, которая в линии H I демонстрирует признаки взаимодействия между галактиками. Однако мы включили ее в рассмотрение, поскольку NGC 3031 достаточно изолирована от галактик сопоставимой светимости, и имеет

хорошо изученную симметричную кривую вращения (см. [17] и ссылки на более ранние работы).

Фотометрические данные о галактиках и оценки потока в линии H I были взяты нами из базы данных HyperLeda¹ [32]. Расстояния до галактик принимались такими же, как и в статьях, из которых были взяты их кривые вращения. Во всех галактиках за пределами Местной группы расстояния примерно соответствуют постоянной Хаббла $H_0 = 75$ км/с/Мпк. В табл. 1 приведена основная информация о галактиках, включающая расстояние, абсолютную звездную величину, шкалу экспоненциального диска R_d , и данные, по которым получена кривая вращения (спектраль-

¹ <http://leda.univ-lyon1.fr>

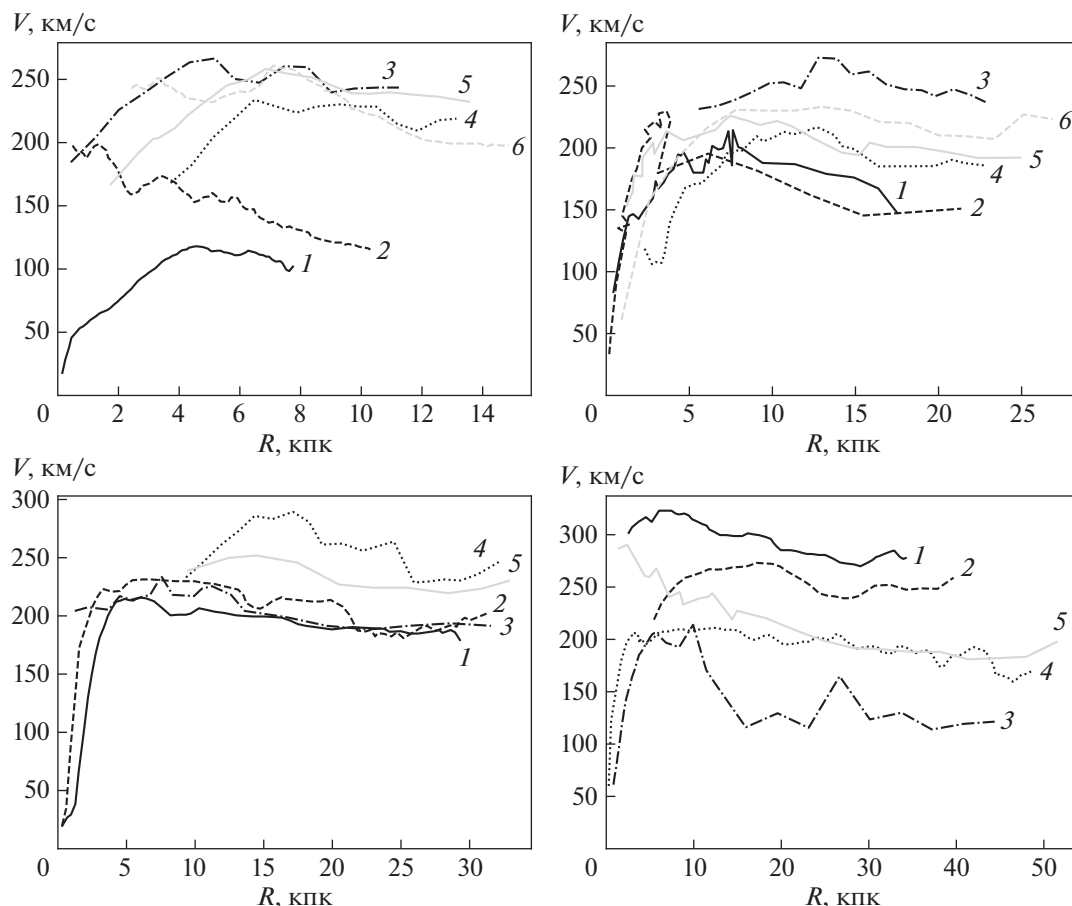


Рис. 1. Наблюдаемые кривые вращения галактик рассматриваемой выборки. Верхняя панель: слева – NGC 7793 (1), NGC 4736 (2), NGC 512 (3), NGC 582 (4), NGC 3719 (5), NGC 3031 (6); справа – NGC 3893 (1), NGC 4138 (2), UGC 10981 (3), NGC 5297 (4), NGC 753 (5), NGC 4725 (6). Нижняя панель: слева – NGC 2903 (1), NGC 3521 (2), NGC 1642 (3), UGC 10692 (4), NGC 224 (5); справа – NGC 2841 (1), NGC 3992 (2), NGC 157 (3), NGC 5055 (4), NGC 2599 (5).

ная линия, одномерное или двумерное распределение скорости).

Наблюдаемые кривые вращения для галактик, входящих в нашу выборку, приведены на рис. 1.

Среди рассматриваемых галактик есть как галактики с баром, так и без него, а именно, из 22 галактик сильные бары (тип SB) имеют две галактики, а в 14 галактиках явные признаки бара отсутствуют. Следовательно, бары не являются причиной наблюдаемого спада кривых вращения. В таблице присутствуют как галактики ранних морфологических типов (например, NGC 4138, NGC 2599), так и поздних (например, NGC 5297, NGC 7793), как галактики с флоккулентными ветвями (NGC 2841, NGC 3521, NGC 5055), так и с упорядоченной спиральной структурой Grand Design (NGC 3031, NGC 2903, NGC 3992, NGC 157). Можно заключить, что галактики со спадающими кривыми вращения не обладают какими-либо заметными морфологическими особенностями.

2.2. Подвыборка галактик с наиболее длинными кривыми вращения

Для декомпозиции кривой вращения (см. раздел 4) мы использовали только те галактики из табл. 1, кривая вращения которых по наблюдениям в линии H I по опубликованным данным прослеживается дальше оптического радиуса. Эти галактики приведены в табл. 2. Для них кривые вращения были получены с использованием “tilted rings model”, т.е. изменение наклона диска с расстоянием от центра уже учтено и не должно являться причиной спада кривой вращения. В таблице приведен фотометрический радиус R_{25} , расстояние R_{lim} , на котором наблюдается спад скорости вращения на величину ΔV , и отношение ΔV к максимальной скорости вращения V_{max} . Все кривые вращения галактик описанной выше подвыборки приведены на рис. 1.

Ниже даны краткие комментарии к отдельным галактикам этой подвыборки.

Таблица 2. Подвыборка галактик с длинными кривыми вращения

| Галактика | R_{25} , кпк | R_{lim} | $\Delta V/V_{\text{max}}$ | Ссылки |
|-----------|----------------|------------------|---------------------------|--------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| NGC 157 | 11.3 | $2R_{25}$ | 46 | [18] |
| NGC 2841 | 13.8 | $2R_{25}$ | 16 | [33] |
| NGC 2903 | 18.1 | $1.4R_{25}$ | 14 | [34] |
| NGC 3031 | 12.0 | $1.2R_{25}$ | 24 | [3] |
| NGC 3521 | 13.2 | $2R_{25}$ | 17 | [33] |
| NGC 3992 | 24.5 | $1.1R_{25}$ | 11 | [27] |
| NGC 5055 | 17.3 | $2.2R_{25}$ | 18 | [33] |

Примечание. В столбцах приведены: (1) – название галактики ; (2) – оптический радиус R_{25} , кпк; (3) – расстояние R_{lim} , на котором скорость вращения уменьшается на ΔV ; (4) – отношение ΔV к максимальной скорости вращения V_{max} ; (5) – ссылки на работы по распределению плотности Н I.

NGC 157. Расстояние от NGC 157 до ближайшей галактики сравнимой светимости составляет не менее 1.3 Мпк [18], т.е. эту галактику можно считать изолированной. Спиральный узор галактики имеет 12-й класс по Эльмегрин [35], т.е. галактика обладает четко выраженными симметричными спиральными рукавами. Но регулярная спиральная структура простирается лишь до радиуса около $1'$ (~6 кпк), потом структура становится флоккулентной или разбивается на много рукавов [19]. Наблюдения Н I демонстрируют изгиб диска, полученный из кинематических данных, и значительное уменьшение скорости вращения сразу за оптическим радиусом R_{25} , что позволяет предположить низкую массу, либо низкую концентрацию темного гало [18].

NGC 2841. Это близкая массивная галактика с флоккулентными спиральными, имеющая яркий классический балдж [36]. Галактика изолированная, и не проявляет никаких следов прошлых взаимодействий [37].

NGC 2903. Это галактика с активным звездообразованием, которую также можно отнести к числу изолированных [38]. Она богата газом, имеет звездный бар и два симметричных протяженных спиральных рукава.

NGC 3031. Это близкая галактика, имеющая симметричные ярко выраженные спиральные рукава (тип 12 по классификации Эльмегрин [35]). Горб на кривой вращения наблюдается на расстоянии ~7.5 кпк от центра [17]. Мощные спиральные ветви и связанные с ними некруговые движения газа ответственны за локальные детали на кривой вращения, однако внешние области галактики вращаются определенно медленнее, чем внутренние. Вместе с M82 и NGC 3077 эта галактика образует взаимодействующую систему (см., напр., [39]).

NGC 3521. По классификации спиральных рукавов по Эльмегрин NGC 3521 относится к типу 3 [35], т.е. у нее флоккулентные спирали. Эта галактика имеет классический балдж, очень большой и яркий, внутри которого наблюдаются очаги звездообразования [36]. Галактика не имеет близких соседей сравнимой светимости.

NGC 3992. Это одна из самых массивных галактик скопления Ursa Major. Она имеет мощный бар, два симметричных туго закрученных спиральных рукава с ответвлениями и “шпурами”.

NGC 5055. Галактика имеет тип 3 по классификации Эльмегрин [35], т.е. обладает флоккулентным спиральным узором. У галактики имеется псевдобалдж, в котором происходит активное звездообразование [36]. NGC 5055 имеет протяженный искривленный на периферии диск нейтрального водорода, простирающийся значительно дальше оптического диска [40]. Галактика входит в близкую группу M51 [41]. Ближайшая галактика сравнимой светимости (UGC 8313) находится на расстоянии 70 кпк (в картинной плоскости) от NGC 5055.

3. ОБЩИЕ СВОЙСТВА ГАЛАКТИК СО СПАДАЮЩИМИ КРИВЫМИ ВРАЩЕНИЯ

3.1. Зависимость Талли–Фишера и барионная зависимость Талли–Фишера

На рис. 2 представлено положение рассматриваемых нами галактик на зависимости Талли–Фишера (TF), где сопоставляется абсолютная звездная величина M_K с максимальной скоростью вращения V_{max} (рис. 2, слева) и скоростью вращения наиболее далеких от центра областей V_{far} (рис. 2, справа). Для сравнения, прямыми линиями показана линейная зависимость для галактик обзора GHASP, полученная в работе [42]. Мы

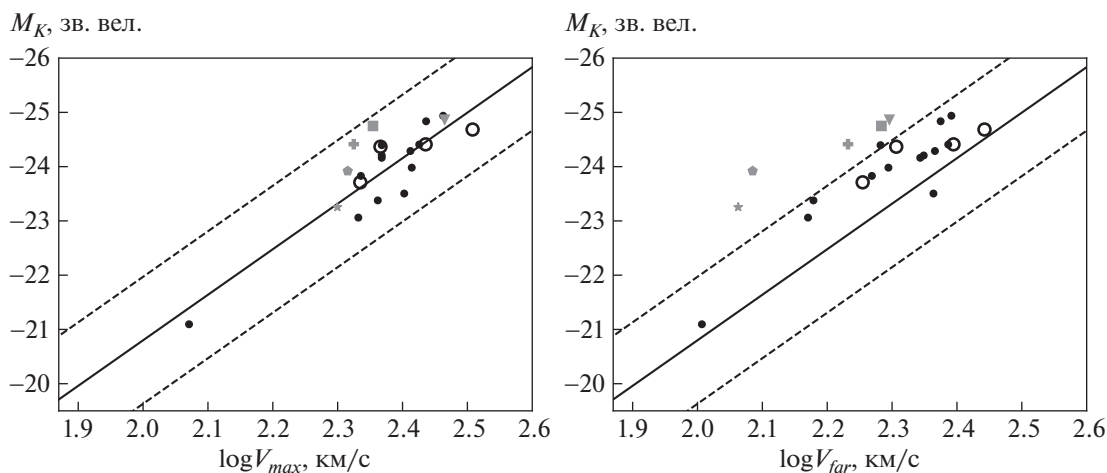


Рис. 2. Зависимости Талли–Фишера (TF) в полосе K для максимальной скорости вращения V_{\max} (слева) и скорости на периферии галактики V_{far} (справа) для галактик со спадом кривой вращения. Прямыми линиями показаны зависимости TF для галактик обзора GNASP, штриховым линиям соответствует ошибка (1σ) нуля-пункта зависимости согласно [42]. Отмечены галактики, которые выходят за пределы 1σ на рисунке справа: треугольником – NGC 2599, квадратом – NGC 753, крестом – NGC 5055, пятиугольником – NGC 157, звездочкой – NGC 4736, кружками отмечены галактики из подвыборки с наиболее длинными кривыми вращения (см. раздел 2.2).

остановили свой выбор на галактиках этого обзора в качестве галактик сравнения, поскольку их кривые вращения определены с хорошим угловым и линейным разрешением (по наблюдениям в линии H_{α}) с использованием единой методики, и на основании двумерных полей скоростей. Последнее позволяет более точно измерять углы ориентации диска, и, следовательно, скорости вращения в области максимума или выхода на плато. Среди 83 галактик обзора GNASP лишь три демонстрируют спад кривой вращения (одна из них входит в нашу выборку).

Полученная в [42] зависимость TF для галактик GNASP с $M_K < -20$ имеет вид:

$$M_K = (-4.02 \pm 1.17) - (8.39 \pm 0.52) \log V_{\max}. \quad (1)$$

Для нашей выборки галактик со спадающими кривыми вращения значение M_K определялось из интегральных величин K_s или K , взятых из базы данных NED. Кружками отмечены галактики с наиболее длинными кривыми вращения (см. раздел 2.2). Прямая линия на рисунках – зависимость для галактик GNASP [42]. Штриховым линиям соответствует ошибка (1σ) нуля-пункта этой зависимости (согласно [42]). Практически все галактики GNASP с симметричными кривыми вращения лежат внутри коридора значений, ограниченного этими линиями.

Как следует из приведенных диаграмм, галактики со спадающими кривыми вращения лучше согласуются с зависимостью (1), если скорость их вращения характеризовать величиной V_{\max} (меди-

ана отклонения значений скорости для $\log V_{\max}$ составляет 0.04, а для $\log V_{\text{far}} - 0.09$), причем для галактик из подвыборки с длинными кривыми вращения этот эффект выражен сильнее. Это позволяет считать, что у галактик со спадающими кривыми вращения чаще именно максимальная скорость вращения оказывается нормальной для их светимости. Спад кривой вращения, по-видимому, связан с пониженной (для данной светимости галактики) скоростью вращения внешних областей диска, а не с повышенной скоростью вращения центральных областей. В этом случае спадание кривой вращения на больших R должно быть обусловлено не более сконцентрированным к центру диском или балджем, а менее сконцентрированным или менее массивным гало.

Заметим, что в работе [2], где анализировались зависимости TF для галактик скопления UMa, был получен несколько иной вывод: галактики, скорости вращения которых проходят через максимум, оказываются на одной зависимости с галактиками с плоской кривой вращения, если рассматривать скорость V_{far} на больших R . Сходный вывод был получен позднее в работе [11] для выборки из 32 галактик с кривыми вращения, взятыми из различных источников. Расхождение с нашими выводами объясняется различием углов наклона и нуля-пунктов в зависимостях TF, использовавшихся в качестве сравнения, а также небольшим количеством галактик со спадом скорости вращения в цитированных работах (5 галактик в работе [2] и 9 в [11]).

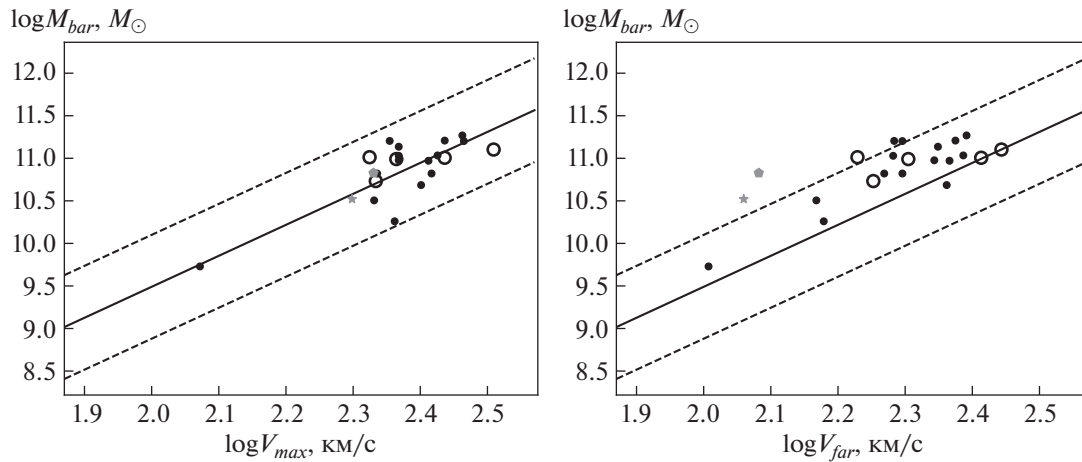


Рис. 3. Положение галактик на барионной зависимости Талли–Фишера (ВТФ) для максимальной (слева) и периферийной (справа) скоростей вращения. Обозначения те же, что на рис. 2.

Более глубокий физический смысл имеет барионная зависимость Талли–Фишера (ВТФ) между барионной массой и скоростью вращения дисков. Как и в случае зависимости TF, мы в качестве сравнения используем зависимость, полученную в [42] для галактик GHASP:

$$\log M_{\text{bar}} = (2.21 \pm 0.61) + (3.64 \pm 0.28) \log V, \quad (2)$$

где M_{bar} – полная барионная масса галактики, V – скорость вращения.

Барионная масса для галактик нашей выборки определялась как сумма массы звезд и массы H I (умноженной на 1.4 для учета более тяжелых элементов), которая вычислялась из параметра $m21$ (по HyperLeda):

$$m21 = -2.5 \log f + 17.40, \quad (3)$$

где f – интегральный поток излучения в линии H I в Ян · км/с.

Медиана отношения массы газа к барионной массе составляет ~0.2 для выборки в целом и ~0.1 для галактик с наиболее протяженными кривыми вращения, максимальное значение этого отношения равно 0.34. Поскольку масса газа составляет для рассматриваемых галактик лишь небольшую долю барионной массы, ошибки в ее определении слабо влияют на положение рассматриваемых галактик на диаграмме ВТФ.

Звездная масса галактик M_* оценивалась по абсолютной звездной величине M_K , а отношение M/L_K для удобства сравнения с галактиками контрольной выборки GHASP принималось равным 0.8, как и в работе [42]. Это значение следует из модели де Джонг [43] для звездного населения с возрастом 12 млрд. лет с солнечной металличностью,

постоянным темпом звездообразования и начальной функцией масс Солпитера. Заметим, что такое значение M/L_K , по-видимому, в большинстве галактик с активным звездообразованием является завышенным (см., напр., [11, 44]).

На рис. 3 прямой линией отмечена зависимость (2) для галактик GHASP, штриховыми линиями – коридор значений 1σ , отражающий точность определения нуля-пункта зависимости [42]. Кружками отмечены галактики из подвыборки с наиболее длинными кривыми вращения. На правом графике, построенном для скорости V_{far} , разброс точек вдоль горизонтальной оси больше по сравнению с левым, что отражает более значительный интервал значений скорости V_{far} по сравнению с V_{max} .

На рис. 3, справа, где с барионной массой сопоставляется скорость внешних областей галактик, наблюдается систематический сдвиг относительно зависимости для галактик GHASP (среднее значение отклонения $\log V_{\text{far}} = 0.09$), примерно равный сдвигу на зависимости TF. Как из зависимости TF, так и из ВТФ, следует, что по крайней мере три галактики (NGC 157, NGC 4736 и NGC 5055) отличаются аномально низкой скоростью вращения V_{far} для данной массы или светимости.

3.2. Содержание нейтрального водорода

Известно существование тесной корреляции между интегральной массой водорода M_{HI} и удельным моментом вращения диска, который, следуя более ранним работам, будем считать пропорциональным произведению скорости вращения на диаметр D_{25} или радиальную шкалу диска

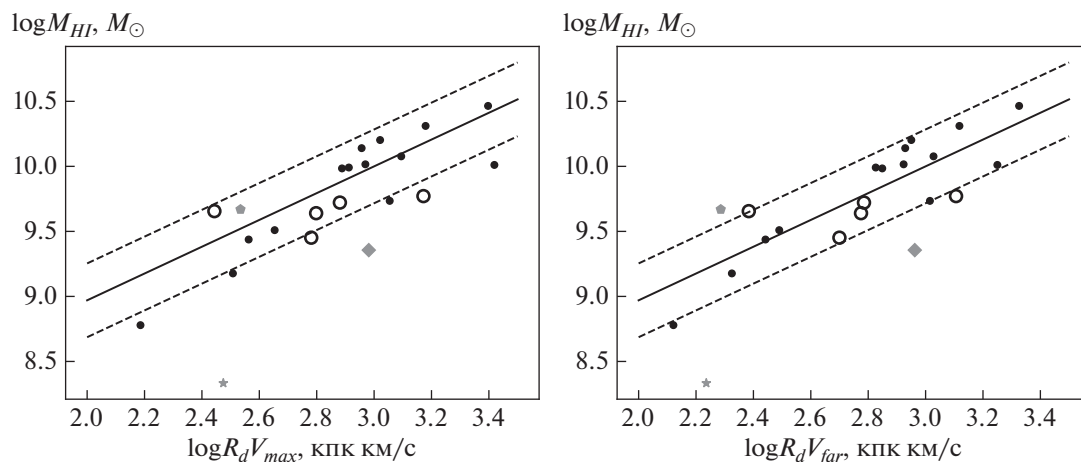


Рис. 4. Положение рассматриваемых галактик на диаграммах, связывающих интегральную массу HI с параметрами, характеризующими удельный момент вращения. Прямые линии относятся к изолированным галактикам поздних типов, используемых для сравнения согласно [45]. Штриховыми линиями показан разброс в 1σ для галактик сравнения. Отмечены галактики, наиболее сильно отклоняющиеся от опорной зависимости, на рисунке справа отмечены галактики, наиболее сильно отклоняющиеся от опорной зависимости: звездочкой – NGC 4736, ромбом – NGC 4725, пятиугольником – NGC 157, кружками обозначены галактики из подвыборки с наиболее длинными кривыми вращения.

R_d (см., напр., [45] и ссылки в этой статье). Поскольку фотометрический диаметр, в отличие от радиальной шкалы диска, зависит от поверхностной яркости диска, здесь мы рассмотрим соотношения между $\log M_{\text{HI}}$ от $R_d V_{\text{max}}$ и $R_d V_{\text{far}}$. На рис. 4 они сравниваются с зависимостью

$$\log M_{\text{HI}} = 1.03 \log(R_d V) + 6.91, \quad (4)$$

полученной в работе [45] для изолированных спиральных галактик поздних типов с умеренным углом наклона диска (сплошная линия). Масса M_{HI} выражена в массах Солнца, R_d – в кпк, и V – в км/с. Кружками отмечены галактики из подвыборки с наиболее длинными кривыми вращения.

Медианы отклонения точек выборки от зависимости (4) и для V_{max} , и для V_{far} меньше разброса 1σ относительно сплошной прямой линии. Следовательно, рассматриваемые галактики со спадающими кривыми вращения не отличаются заметным образом по содержанию нейтрального водорода от галактик, для которых было получено выражение (4). Построение аналогичной зависимости с использованием оптического диаметра D_{25} вместо R_d (здесь не приводится) демонстрирует сходный результат. Заметим, что две из рассматриваемых галактик (NGC 4725 и NGC 4736), относящиеся к типу Sa, обладают дефицитом HI, что вполне ожидаемо, поскольку зависимость, с которой проводится сравнение, построена для галактик поздних типов.

4. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ДЛИННЫХ КРИВЫХ ВРАЩЕНИЯ В МОДЕЛЯХ НЬЮТОНОВСКОЙ ГРАВИТАЦИИ И MOND

В предыдущем разделе использовались лишь грубые оценки интегральной барионной массы галактик. Для моделирования кривой вращения выбранных галактик и ее декомпозиции на составляющие, связанные с различными компонентами галактик, требуется знать распределение массы газа и звезд вдоль радиуса. Если распределение наблюдаемой массы газа следует из наблюдений HI, то учет массы звездного населения – задача более сложная. Масса звездного населения M_* оценивалась нами двумя способами: во-первых, через светимость в ближнем ИК диапазоне и отношение M/L , соответствующее показателю цвета галактики, и, во-вторых, путем моделирования кривой вращения в модели максимальной массы диска при свободном выборе M/L , что дает оценку верхнего предела M_* .

4.1. “Ньютоновская” декомпозиция кривой вращения

Кривая вращения представлялась суммой четырех компонентов: диск, балдж, газовый слой и гало. Диск и газовый слой считались тонкими, балдж и гало – сферическими. При этом принималось, что радиальное распределение поверхностной плотности звездного диска следует фотометрическому профилю в ближнем ИК диапазоне. Для выделения профиля яркости диска условно считалось, что она преобладает над ярко-

стью балджа, начиная с радиуса, где имеет место резкий подъем к центру радиального профиля яркости, выраженной в логарифмической шкале. Переход от распределения яркости диска галактики к распределению плотности осуществлялся путем умножения яркости, выраженной в солнечных единицах [$L_{\odot}/\text{пк}^2$] на отношение массы к светимости M/L , которое в общем случае считалось зависящей от показателя цвета (см. ниже). Для далеких областей диска, где нет прямых измерений фотометрического профиля, последний аппроксимировался экспоненциальным законом со шкалой, соответствующей прилежащим областям, более близким к центру. Заметим, что на периферии галактики, в присутствии массивного гало вклад диска в кривую вращения, как правило, мал, поэтому ошибка, связанная с такой экстраполяцией, невелика.

Поверхностная яркость в единицах [зв. вел./угл. с²] переводилась в солнечные единицы [$L_{\odot}/\text{пк}^2$] через соотношение

$$\log \mu \left[\frac{L_{\odot}}{\text{пк}^2} \right] = 0.4 \left(21.57 - \mu \left[\frac{\text{зв. вел.}}{\text{угл. с}^2} \right] + M_{\odot,K} \right), \quad (5)$$

где абсолютная звездная величина Солнца в полосе K $M_{\odot,K}$ принималась равной 3.28 [46].

Для оценки отношения масса-светимость на 3.6 мкм использовалась зависимость $M/L_{3.6}$ от $B-V$, предложенная Мак Го и др. [47] для модели [48]:

$$\log M/L_{3.6} = -0.861 + 0.849(B - V). \quad (6)$$

Значения $M/L_{3.6}$ и M/L_K тесно связаны между собой, поскольку оба относятся к ближнему ИК диапазону. Следуя работе [49], мы использовали линейное соотношение

$$M/L_{3.6} = 0.92M/L_K - 0.05. \quad (7)$$

Для рассматриваемых галактик полученные отношения M/L_K находятся в диапазоне от 0.44 до 0.76 солнечных единиц. Заметим, что отношения массы к светимости зависят от используемых моделей звездной эволюции и от таких трудно учитываемых параметров, как начальная функция масс и химический состав звезд. Поэтому различные модели дают заметно отличающиеся значения, однако даже для наиболее “красных” галактик с солнечным химсоставом редко превышают 0.8, что находится в согласии с независимыми динамическими оценками масс дисков (см. обсуждение в работах [4, 11]).

Декомпозиция кривой вращения проводилась с использованием программы GRVolsu, разработанной Д.С. Мухатовым (Волгоградский государственный университет), которая позволяет моделировать кривые вращения галактик, состоящих из различного числа компонентов, с задаваемым профилем распределения массы каждого компонента в рамках “ньютоновской” механики. Кривая вращения сравнивалась с моделью, включающей балдж (модель Кинга с массой, определенной по фотометрическому профилю), тонкий звездный диск, тонкий газовый диск, и гало (профиль NFW). Параметры компонентов подбирались таким образом, чтобы они с минимальной ошибкой соответствовали кривой вращения в модели максимального диска [50]. Заметим, что для галактик, где балдж (псевдобалдж) имеет относительно небольшую массу, к которым относится большинство рассматриваемых объектов, результаты слабо зависят от принимаемой модели балджа, которая в нашем случае является довольно грубым приближением: балдж определяет форму кривой вращения лишь во внутренней области диска и мало влияет на скорость спадающей части кривой вращения.

Проверка показала, что при использовании изотермического профиля гало вместо профиля NFW, как и при учете конечной толщины диска ($2z_0/D \approx 0.2$, где z_0 и D – полутолщина и диаметр диска соответственно) результаты качественно не меняются.

4.2. Построение кривой вращения в модели MOND

По теории MOND, ускорение тела на круговой орбите a_M при малых ускорениях превышает ускорение a_N , ожидаемое в ньютоновской теории гравитации. Отличие между этими ускорениями пренебрежимо мало при $a_N \gg a_0$ и является существенным при $a_N \approx a_0$ или меньше, где a_0 является универсальным физическим параметром. Интерпретация зависимости ВТФ в рамках MOND приводит к оценке $a_0 = (1.3 \pm 0.3) \times 10^{-8}$ см/с² [10]. Переход между этими предельными случаями можно описать простым выражением [30]: $a_N = a_M \mu(x)$, где $\mu(x) = x/\sqrt{1+x^2}$, $x = (a_M/a_0)$. При малых ускорениях $a_M = \sqrt{a_N a_0}$.

Для построения кривой вращения в модели MOND бралась описанная выше “ньютоновская” модель галактики, из которой убиралось гало, то есть сохранялись радиальные профили плотности барионных компонентов, взятые из фотометрии, однако отношение массы к светимости звездного населения рассматривалось уже как свободный параметр. Затем для ряда значений M/L_K вычислялось “ньютоновское” ускоре-

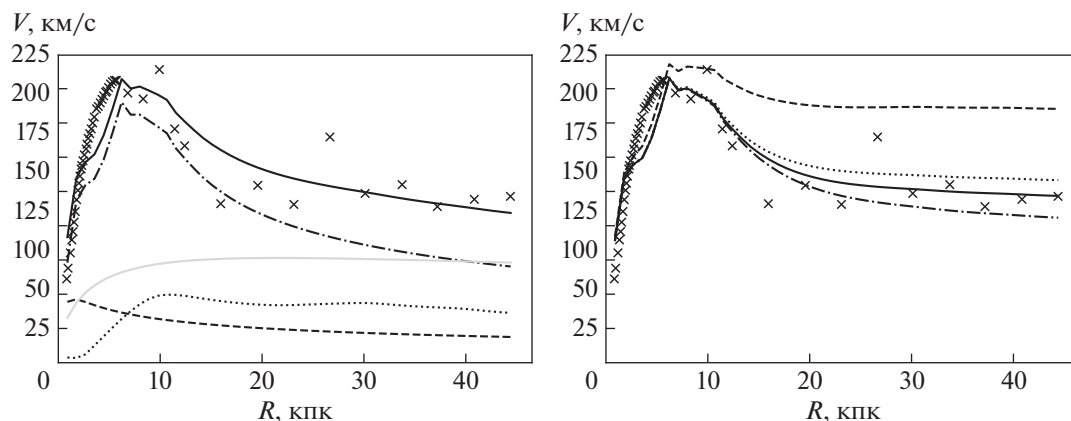


Рис. 5. NGC 157. Слева – декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска. Крестиками показана наблюдаемая кривая вращения, черной сплошной линией – модельная кривая вращения, остальными линиями – профили различных компонентов: балджа (пунктиром), диска (штрих-пунктиром), газа (штриховой линией), гало (серой сплошной линией); справа – сопоставление с моделями MOND; крестиками показана наблюдаемая кривая вращения, пунктирной линией, сплошной, штриховой и штрих-пунктирной – для моделей с $a_0 = 1.2, 0.2, 0.3$ и 0.1×10^{-8} см/с² соответственно.

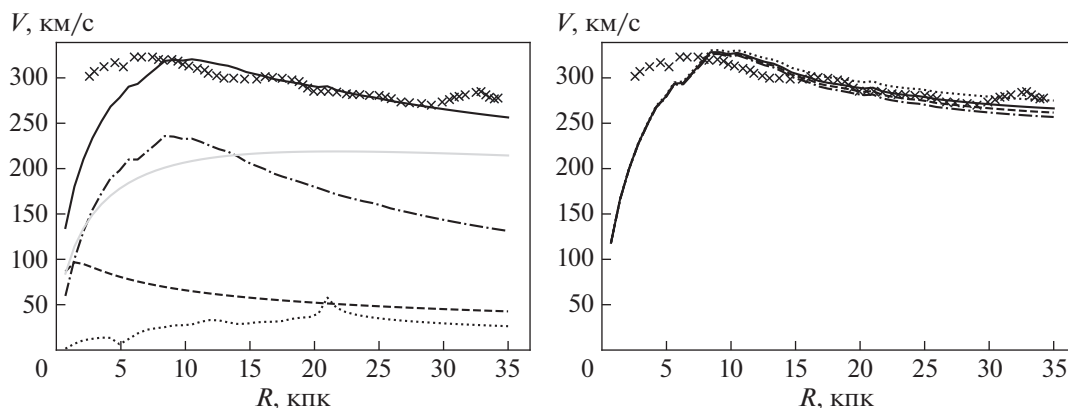


Рис. 6. NGC 2841. Слева – декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа – сопоставление с моделями MOND, крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, сплошной, штриховой и штрих-пунктирной линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 1.3, 1.5$ и 1.1×10^{-8} см/с² соответственно.

ние, связанное с барионными компонентами (их масса приходится в основном на звездные диски)

$a_N = V^2/R$, где V – скорость вращения, которая была бы при отсутствии гало, и определялись соответствующие значения a_M с использованием приведенных выше соотношений. Это позволяло для выбранного значения M/L_K построить кривую вращения галактики, соответствующую MOND (см. рис. 5–11). Величина a_0 рассматривалась как свободный параметр, выбор его модельного значения проводился по наилучшему согла-

сию (по визуальной оценке) с наблюдаемой кривой вращения для внешних областей галактики с модельной кривой.

Отметим важную особенность MOND: ускорения тел, которыми оперирует эта теория, включают ускорения, связанные как с внутренними гравитационными силами в рассматриваемой системе, так и с внешними полями (с очевидным нарушением строгого выполнения принципа эквивалентности (см. обсуждение в [9])). Однако в нашем случае это обстоятельство не играет роли: вблизи галактик, выбранных для моделирования,

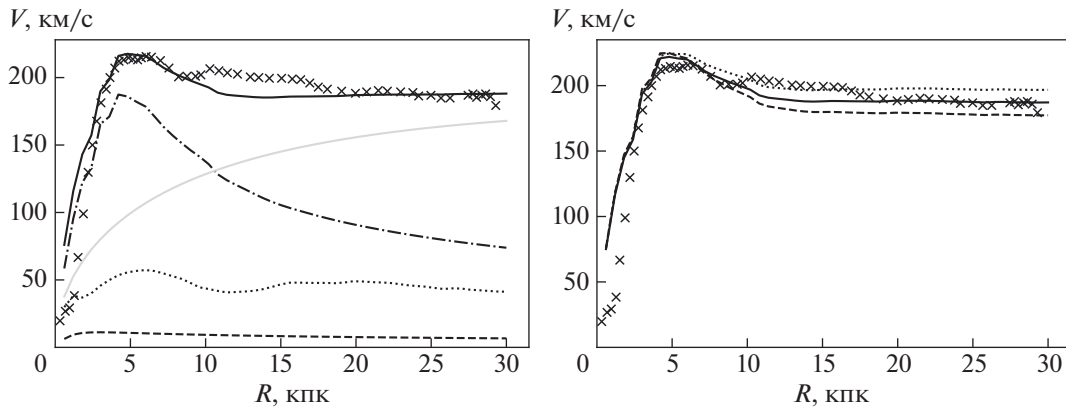


Рис. 7. NGC 2903. Слева — декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа — сопоставление с моделями MOND; крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, сплошной и штриховой линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 1.6$ и $2.0 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$ соответственно.

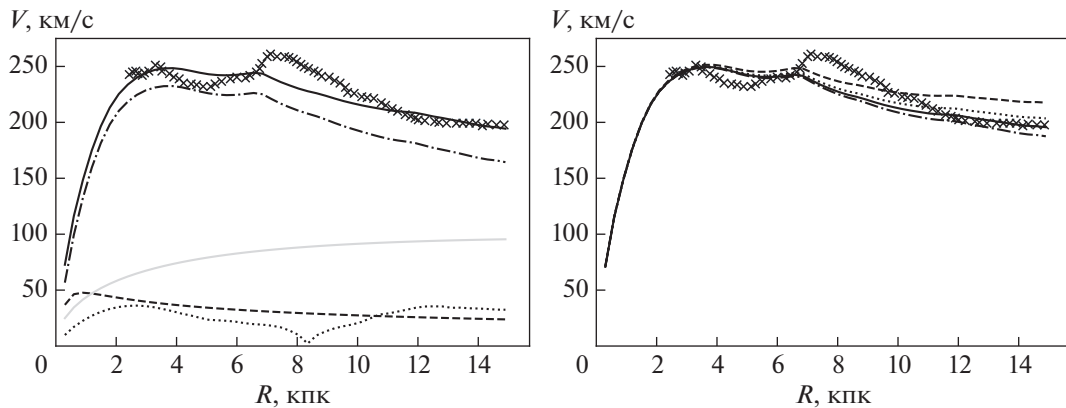


Рис. 8. NGC 3031. Слева — декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа — сопоставление с моделями MOND; крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, сплошной, штриховой и штрих-пунктирной линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 0.6, 0.8$ и $0.4 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$ соответственно.

нет массивных соседей, способных создать преобладающее ускорение.

4.3. Результаты и обсуждение

Результаты декомпозиции кривых вращения в модели ньютоновской гравитации и построение кривых вращения в модели MOND для семи галактик, входящих в подвыборку галактик с наиболее длинными кривыми вращения, приведены на рис. 5–11 и в табл. 3. Отношения массы к светимости для “ньютоновской” модели (M/L_K^N) или для MOND (M/L_K^M) обозначаются с верхним индексом N или M соответственно (с указанием фотометрической полосы).

Сделаем замечания по каждой из семи галактик.

NGC 157. Модель, построенная в предположении “ньютоновской” гравитации, объясняет наблюдаемую кривую вращения вблизи максимума и на периферии. При этом полученное отношение M/L_K^N отличается на $\sim 30\%$ от значения, которое базируется на фотометрических оценках. В MOND наилучшее соответствие с наблюдаемой кривой вращения достигается при очень низком значении $a_0 = 0.2 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$. Однако отношение M/L_K^M , требуемое для объяснения кривой вращения, оказывается при этом значительно выше значения, которое соответствует цвету звездного

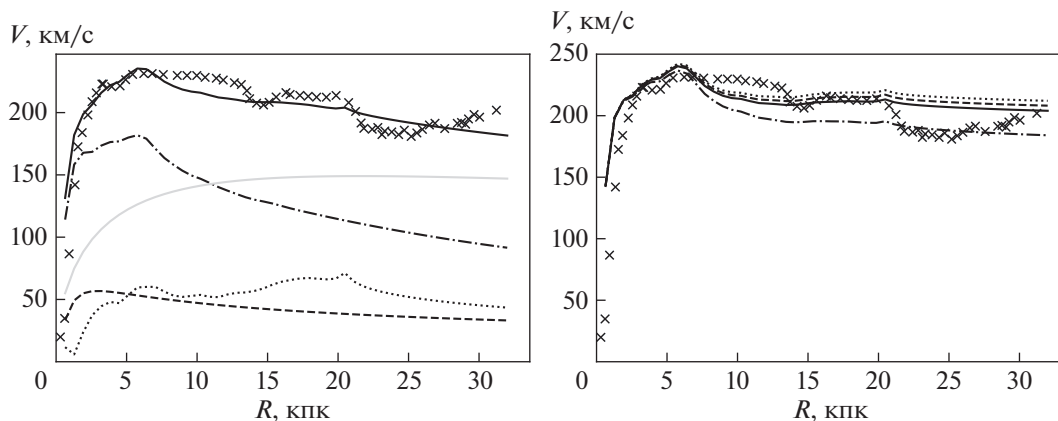


Рис. 9. NGC 3521. Слева — декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа — сопоставление с моделями MOND; крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, сплошной, штриховой и штрих-пунктирной линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 1.1, 1.3$ и $0.7 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$ соответственно.

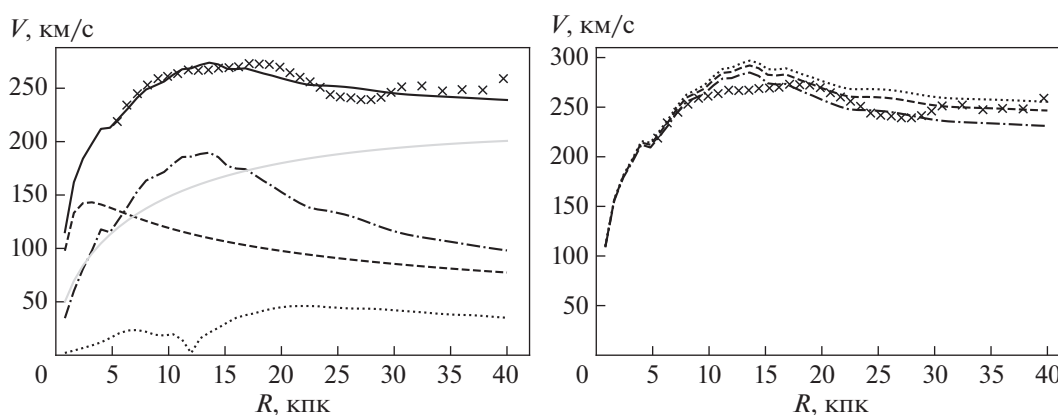


Рис. 10. NGC 3992. Слева — декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа — сопоставление с моделями MOND; крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, штриховой и штрих-пунктирной линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 1.4$ и $0.9 \times 10^{-8} \text{ см/с}^2$ соответственно.

населения, а масса диска — значительно превышает массу максимального диска в ньютоновской модели.

NGC 2841. Наблюдаемая кривая вращения, кроме центральной области галактики, удовлетворительно описывается моделью с ньютоновской гравитацией, хотя отношение $M/L_K^N = 0.96$ в модели максимального диска оказывается выше, чем значения, получаемые из звездных моделей, которые в полосе K или 3.6 мкм для спиральных галактик, как правило, не превышают $0.6\text{--}0.7$ [11, 17, 47]).

Модели кривой вращения NGC 2841 в модели MOND, приведенные на рис. 6, согласуются с на-

блюдениями почти так же хорошо, как и в модели максимального диска. Если выбрать a_0 таким образом, чтобы наилучшим образом описывалась наблюдаемая кривая вращения на больших R , то в области максимума будет заметное рассогласование. Если же уменьшать параметр a_0 для описания области максимума, то на периферии кривая вращения будет немного ниже наблюдаемой. Однако масса диска для принимаемых значений a_0 примерно в два раза превышает массу звездного населения, полученную из фотометрических данных, и на $\sim 50\%$ превышает массу для модели максимального диска в рамках “ньютоновской” гравитации.

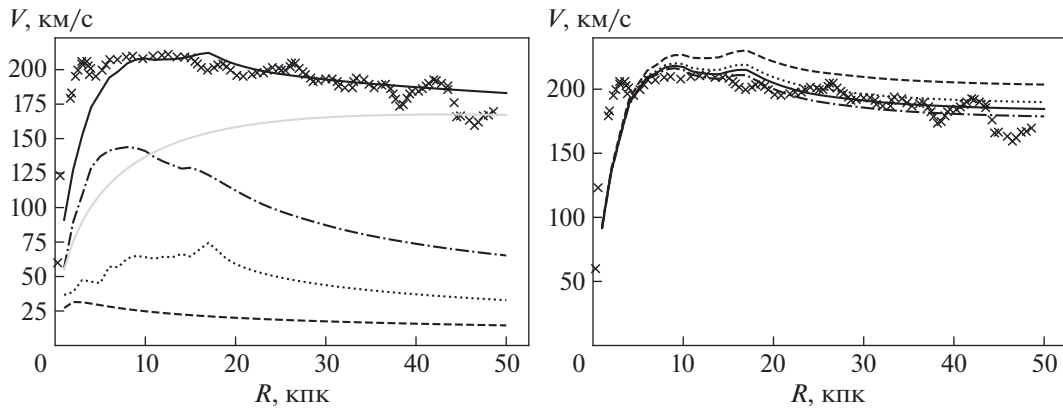


Рис. 11. NGC 5055. Слева – декомпозиция кривой вращения в “ньютоновской” модели максимального диска, обозначения те же, что на рис. 5; справа – сопоставление с моделями MOND; крестиками обозначена наблюдаемая кривая вращения, пунктирной, сплошной линией, штриховой и штрих-пунктирной линиями показаны зависимости для модели MOND при $a_0 = 1.2, 0.8, 0.9$ и 0.7×10^{-8} см/с² соответственно.

NGC 2903. Если при декомпозиции наблюдаемой кривой вращения использовать фиксированное значение отношения $M/L_{3.6}^N$ и рассматривать его как свободный параметр, то ее оптимальное значение окажется близким к 1.4, что более чем вдвое превышает характерные максимальные значения, следующие из моделей звездного населения [11, 47]. Однако это близко к аномально высокой оценке $M/L_{3.6}^N = 1.23$, полученной для внешних областей этой галактики в динамической модели с переменным вдоль радиуса отношением массы к светимости из работы [17], что указывает на особенности фотометрических характеристик ее звездного населения. Поэтому в данной работе мы в обоих моделях (“ньютоновской” и MOND) использовали изменяющееся вдоль радиуса отношение $M/L_{3.6}^N$, полученное де Блок и др. [17].

Рис. 7 показывает, что в “ньютоновской” модели кривая вращения хорошо разделяется на компоненты, кроме участка 10–17 кпк и центральной области, где наблюдаемые скорости оказываются ниже, чем модельные, хотя вклад балджа в модельную кривую вращения мал. Модельная кривая вращения NGC 2903 в рамках MOND при выборе подходящего значения a_0 также согласуется с профилем скорости вращения во внешней области галактики, но хуже описывает область максимума, в то время как “ньютоновская” модельная кривая хорошо описывает и периферию, и область максимума. Обе модели плохо объясняют наблюдаемые скорости газа на радиальном расстоянии 10–17 кпк, где, по-видимому, присутствуют некруговые движения. Значения параметра a_0 , полученные при моделировании, согласуются с принятым в MOND зна-

чением. Однако при этом отношение M/L_K^M в MOND почти в 3 раза превышает значение, вытекающее из фотометрии, и на ~50% значение в модели максимального диска.

NGC 3031. Модель максимального диска для этой галактики рассчитывалась так, чтобы она описывала ближайший к центру галактики максимум, поскольку наблюдаемая кривая вращения в области более далекого максимума на ~7.5 кпк, по-видимому, искажена некруговыми движениями газа в мощных спиральных рукавах [17]. Поэтому построенная модель хорошо объясняет кривую вращения до 4 кпк и после 11 кпк, при этом фотометрическая оценка M/L_K согласуется с оценкой, полученной в модели максимального диска.

Модель MOND наилучшим образом описывает наблюдаемую кривую вращения при значениях параметра $a_0 \sim (0.6 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ км/с², что примерно вдвое ниже ожидаемого для MOND значения [10]. Тем не менее масса диска в этой модели не противоречит фотометрической оценке, как и оценке, полученной для максимального “ньютоновского” диска.

NGC 3521. Как “ньютоновская” модель, так и MOND, плохо описывают наблюдаемую кривую вращения NGC 3521, которая имеет сложную форму, по-видимому, связанную с локальными некруговыми скоростями газа. “Ньютоновская” модель хорошо воспроизводит участок в области 3–5 кпк и “сглаженную” форму кривой на больших расстояниях от центра. Отметим, что фотометрия на 3.6 мкм и зависимость M/L от цвета, использованная в работе МакГо и Шомберт [47], предсказывают для этой галактики почти в два

Таблица 3. Параметры “ньютоновских” моделей и MOND

| Галактика | M/L_K | M/L_K^N | M/L_K^M | $a_0, 10^{-8} \text{ см/с}^2$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| NGC 157 | 0.44 | 0.65 | 0.73 | 0.2 ± 0.1 |
| NGC 2841 | 0.76 | 0.96 | 1.46 | 1.3 ± 0.2 |
| NGC 2903 | 0.21–0.90 | 0.43–2.10 | 0.61–2.63 | 1.6 ± 0.4 |
| NGC 3031 | 0.80 | 0.80 | 0.88 | 0.6 ± 0.2 |
| NGC 3521 | 0.64 | 0.37 | 0.52 | $1.1_{+0.2}^{-0.4}$ |
| NGC 3992 | 0.64 | 1.07 | 1.82 | $1.2_{+0.2}^{-0.3}$ |
| NGC 5055 | 0.50 | 0.29 | 0.49 | 0.8 ± 0.1 |

Примечание. В столбцах приведены: (1) – название галактики; (2) – фотометрическая оценка отношения M/L_K для звездного диска (см. раздел 4.1); (3) – отношение массы к светимости диска для “ньютоновской” модели максимального диска; (4) – отношение массы к светимости диска для модели MOND; (5) – оценка параметра MOND.

Таблица 4. Оценки масс дисков галактик в различных моделях

| Галактика | M_d, M_\odot | M_d^N, M_\odot | M_d^M, M_\odot |
|-----------|---|-----------------------|-----------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) |
| NGC 157 | $3.41 \times 10^{10} (K)$ | 5.02×10^{10} | 5.64×10^{10} |
| NGC 2841 | $9.97 \times 10^{10} (3.6 \text{ мкм})$ | 1.28×10^{11} | 2.24×10^{11} |
| NGC 2903 | $1.37 \times 10^{10} (3.6 \text{ мкм})$ | 3.68×10^{10} | 4.41×10^{10} |
| NGC 3031 | $7.61 \times 10^{10} (3.6 \text{ мкм})$ | 7.61×10^{10} | 8.37×10^{10} |
| NGC 3521 | $1.03 \times 10^{11} (3.6 \text{ мкм})$ | 5.61×10^{10} | 8.21×10^{10} |
| NGC 3992 | $5.10 \times 10^{10} (3.6 \text{ мкм})$ | 8.51×10^{10} | 1.45×10^{11} |
| NGC 5055 | $1.11 \times 10^{11} (3.6 \text{ мкм})$ | 4.81×10^{10} | 9.04×10^{10} |

Примечание. В столбцах приведены: (1) – название галактики; (2) – масса звездного диска по фотометрическим данным; (3) – масса диска для модели максимального диска; (4) – масса звездного диска в модели MOND.

раза более плотный диск, чем это допускает кривая вращения.

В модели MOND форма кривой вращения NGC 3521 описывается хуже, хотя значения параметра a_0 , воспроизводящие общий характер кривой, близки к $\sim 10^{-8} \text{ см/с}^2$, что согласуется с ожидаемой в MOND величиной. Отношение M/L_K^M для MOND не сильно (на $\sim 20\%$) отличается от значения, следующего из фотометрических оценок.

NGC 3992. Кривая вращения галактики хорошо описывается “ньютоновской” моделью. При этом M/L_K^N для модели максимального диска выше значения, полученного из звездных моделей,

более чем на 50%, т.е. диск, по-видимому, суб-максимален.

В модели MOND кривая вращения NGC 3992 описывается хуже, так как она в зависимости от выбранного параметра a_0 удовлетворительно аппроксимирует либо внутреннюю, либо внешнюю часть наблюдаемой кривой вращения. Форма кривой вращения на больших расстояниях от центра согласуется с принятым в MOND значением a_0 , но при этом отношение M/L_K^M для диска в целом превышает фотометрическую оценку более чем в 2.5 раза, а значение M/L_K^N для максимального диска – на 70%.

NGC 5055. “Ньютоновская” модель хорошо описывает длинную спадающую часть кривой вра-

щения. При этом, как и в случае NGC 3521, значение $M/L_K^N = 0.29$ оказывается ниже $M/L_K = 0.50$, получаемого из яркости и интегрального цвета. Значения параметра a_0 в моделях MOND для этой галактики согласуются с принятым в MOND значением, а согласие с наблюдаемой кривой не хуже, чем в “ньютоновской” модели. Противоречия с моделями звездного населения в модели MOND также не возникает: значение M/L_K^M для диска практически совпадает со значением, следующим из фотометрии.

Для сравнения моделей в табл. 4 для семи рассматриваемых галактик приведены фотометрическая оценка массы диска M_d (с указанием в скобках фотометрической полосы, использовавшейся для оценки радиального профиля яркости), максимальная масса диска в “ньютоновской” модели M_d^N , масса диска в модели MOND M_d^M , и соответствующий параметр a_0 , при котором наблюдаемый спад скорости вращения наилучшим образом согласуется с моделью.

В галактиках NGC 3521 и NGC 5055 масса звездного диска, получаемая по фотометрическим данным, оказалась больше чем в динамической модели максимального диска. Причина этого не очевидна. Она может быть связана, например, с недооценкой влияния пыли на цвет галактики, либо с неточностью динамической оценки массы диска по причине сравнительно низкого вклада дискового компонента в скорость вращения в области максимума кривой вращения в этих двух галактиках. Для остальных объектов масса диска, полученная из фотометрии, меньше массы, определенной по кривой вращения (в среднем на 40%), что естественно ожидать для “субмаксимальных” дисков, поскольку модель максимального диска дает лишь верхний предел его массы.

Таким образом, сопоставление “ньютоновской” модели и MOND для семи рассматриваемых галактик показало, что в некоторых случаях MOND описывает форму спадающей кривой вращения не хуже, чем ньютоновские модели, однако в трех случаях из семи требуемое для этого значение параметра a_0 отличается от принимаемого в MOND. Наибольшее отличие имеет место для NGC 157, где для объяснения кривой вращения требуется a_0 в 6 раз более низкое. Форма кривой вращения этой галактики не воспроизводится в рассматриваемом варианте MOND.

В моделях MOND при оптимальных значениях a_0 масса звездного диска для четырех галактик из семи (кроме NGC 5055, NGC 3031 и NGC 3521) оказывается существенно выше, а у двух галактик (NGC 5055 и NGC 3521) наоборот, ниже, чем ожидаемое из фотометрических оценок для

звездного населения. При этом в трех случаях (NGC 3521, NGC 3992, NGC 5055) масса звездного диска по MOND превышает массу диска в модели максимального диска более чем на 50%.

5. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Положение 22 галактик со спадом кривой вращения на диаграммах TF и VTF позволяет считать, что их скорость вращения, соответствующая максимуму кривой, является нормальной для галактик сходной светимости или барионной массы. По крайней мере у галактик с наиболее значительным спадом кривой вращения на периферии этот спад, по-видимому, связан с пониженной скоростью вращения внешних областей дисков, а не с аномально высокой скоростью вращения в области максимума.

2. Нет оснований считать, что особенность кривой вращения рассматриваемых галактик заметным образом отражается на их эволюции. Косвенным образом на это указывает то, что рассматриваемые галактики не имеют явных морфологических особенностей, а по содержанию нейтрального водорода они не отличаются от спиральных галактик со сходным угловым моментом, который считается пропорциональным произведению $V_{\max} R_d$.

3. Сравнение “ньютоновской” модели с моделью MOND для семи галактик с наиболее длинными кривыми вращения приводит к выводу, что в рамках обеих моделей можно удовлетворительно объяснить наблюдаемое падение скорости вращения на периферии. Однако в трех случаях из семи требуемое значение параметра a_0 в MOND существенно отличается от принимаемого в MOND ($\sim 10^{-8}$ см/с²).

4. В четырех из семи рассматриваемых галактик (NGC 157, NGC 2841, NGC 2903 и NGC 3992) масса диска в моделях MOND оказывается завышенной по сравнению со значениями, полученными как из фотометрии диска, так и в “ньютоновской” модели максимального диска. Для согласия с MOND требуется, чтобы отношение M/L звездных дисков в полосе K для этих галактик существенно превышало значения, вытекающие из звездных моделей. Наиболее разительным примером несоответствия с моделью MOND является галактика NGC 157, скорость вращения которой падает на периферии почти вдвое. Ни оценка массы диска, ни форма кривой вращения этой галактики не находят своего объяснения в MOND.

Модель MOND не входит в явное противоречие с наблюдениями при анализе статистических зависимостей (прежде всего, зависимости светимости или барионной массы галактик от скорости

вращения, или соотношение между “ньютоновским” и наблюдаемым ускорениями (см., напр., [9]). Однако зависимость между массой звезд и скоростью вращения воспроизводится и в численных космологических моделях формирования галактик, т.е. в рамках “ньютоновской” гравитации [51]. Здесь важно отметить, что уязвимым местом MOND является обязательное условие универсальности параметра a_0 , играющего в этой теории роль мировой константы. Любопытно, однако, что из рассматривавшихся здесь семи галактик только NGC 157 имеет оценку a_0 , очень сильно отличающуюся от ожидаемой в MOND.

Тем не менее приведенные в данной работе примеры показали, что оценки барионной массы по MOND, в которой темное гало отсутствует, плохо согласуются со значениями интегральной звездной массы, полученными по светимости в ближней ИК области. Это демонстрирует определенные сложности, с которыми сталкивается подход, реализуемый в MOND, в применении к конкретным объектам.

Авторы выражают благодарность базе данных HyperLeda [32].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Y. Sofue, Y. Tutui, M. Honma, A. Tomita, T. Takamiya, J. Koda, and Y. Takeda*, *Astrophys. J.* **523**, 136 (1999).
2. *M. A. W. Verheijen*, *Astrophys. J.* **563**, 694 (2001).
3. *A. A. Ponomareva, M. A. W. Verheijen, and A. Bosma*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **463**, 4052 (2016).
4. *F. Lelli, S. S. McGaugh, and J. M. Schombert*, *Astron. J.* **152**, 157 (2016).
5. *E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, R. S. Swaters, and T. S. van Albada*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **376**, 1513 (2007).
6. *M. Persic, P. Salucci, and F. Stel*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **281**, 27 (1996).
7. *K. G. Begeman*, *Astron. and Astrophys.* **223**, 47 (1989).
8. *M. Milgrom*, *Astrophys. J.* **270**, 365 (1983).
9. *B. Famaey and S. S. McGaugh*, *Liv. Rev. Relativity* **15**, 10 (2012).
10. *S. S. McGaugh*, *Astron. J.* **143**, 40 (2012).
11. *A. A. Ponomareva, M. A. W. Verheijen, E. Papastergis, A. Bosma, and R. F. Peletier*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **474**, 4366 (2018).
12. *R. Durazo, X. Hernandez, B. Cervantes Sodi, and S. F. Sanchez*, *Astrophys. J.* **863**, 107 (2018).
13. *K. G. Begeman, A. H. Broeils, and R. H. Sanders*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **249**, 523 (1991).
14. *N. Hashim, M. De Laurentis, Z. Zainal Abidin, and P. Salucci*, arXiv:1407.0379 [astro-ph.GA] (2014).
15. *D. M. Lucero, C. Carignan, K. M. Hess, B.S. Frank, T. H. Randriamampandry, S. Goedhart, and S. S. Passmoor*, *Amer. Astron. Soc. Meeting Abstracts* **223**, id. 138.06 (2014).
16. *R. A. Swaters, R. H. Sanders, and S. S. McGaugh*, *Astrophys. J.* **718**, 380 (2010).
17. *W. J. G. de Blok, F. Walter, E. Brinks, C. Trachternach, S.-H. Oh, and R. C. Kennicutt*, *Astron. J.* **136**, 2648 (2008).
18. *S. D. Ryder, A. V. Zasov, V. J. McIntyre, W. Walsh, and O. K. Sil'chenko*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **293**, 411 (1998).
19. *A. M. Fridman, O. V. Khoruzhii, V. V. Lyakhovich, O. K. Sil'chenko, A. V. Zasov, V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and J. Boulesteix*, *Astron. and Astrophys.* **371**, 538 (2001).
20. *S. A. Kassin, R. S. de Jong, and R. W. Pogge*, *Astrophys. J. Suppl.* **162**, 80 (2006).
21. *I. A. Yegorova, A. Babic, P. Salucci, K. Spekkens, and A. Pizzella*, *Astron. Astrophys. Trans.* **27**, 335 (2012).
22. *B. Epinat, P. Amram, M. Marcelin, C. Balkowski, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **388**, 500 (2008).
23. *S. Courteau*, arXiv:astro-ph/9903297v1 (1999).
24. *T. P. K. Martinsson, M. A. W. Verheijen, K. B. Westfall, M. A. Bershad, D. R. Andersen, and R. A. Swaters*, *Astron. and Astrophys.* **557**, A131 (2013).
25. *J. Méndez-Abreu, J. A. L. Aguerra, E. M. Corsini, and E. Simonneau*, *Astron. and Astrophys.* **478**, 353 (2008).
26. *M. Spano, M. Marcelin, P. Amram, C. Carignan, B. Epinat, and O. Hernandez*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **383**, 297 (2008).
27. *R. Bottema and M. A. W. Verheijen*, *Astron. and Astrophys.* **388**, 793 (2002).
28. *T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, S. E. Schneider, and J. P. Huchra*, *Astron. J.* **125**, 525 (2003).
29. *S. A. Kassin, R. S. de Jong, and B. J. Weiner*, *Astrophys. J.* **643**, 804 (2006).
30. *O. Tiret and F. Combes*, *Astron. and Astrophys.* **496**, 659 (2009).
31. *H. Salo, E. Laurikainen, J. Laine, S. Comerón, et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **219**, 4 (2015).
32. *D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois, and I. Vauglin*, *Astron. and Astrophys.* **570**, id. A13 (2014).
33. *A. Schruha, A. K. Leroy, F. Walter, F. Bigiel, et al.*, *Astron. J.* **142**, 37 (2011).
34. *K. Yim, and J. M. van der Hulst*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **463**, 2092 (2016).
35. *D. M. Elmegreen and B. G. Elmegreen*, *Astrophys. J.* **314**, 3 (1987).
36. *D. B. Fisher and N. Drory*, *Astrophys. J.* **716**, 942 (2010).
37. *V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko*, *Astron. J.* **117**, 1725 (1999).
38. *V. E. Karachentseva*, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **8**, 3 (1973).
39. *M. S. Yun, P. T. P. Ho, and K. Y. Lo*, *Nature* **372**, 530 (1994).
40. *G. Battaglia, F. Fraternali, T. Oosterloo, and R. Sancisi*, *Astron. and Astrophys.* **447**, 49 (2006).
41. *P. Fouque, E. Gourgoulhon, P. Chamaraux, and G. Paturel*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **93**, 211 (1992).

42. *S. Torres-Flores, B. Epinat, P. Amram, H. Plana, and C. Mendes de Oliveira*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **416**, 1936 (2011).
43. *R. S. de Jong*, Astron. and Astrophys. **313**, 377 (1996).
44. *M. A. Norris, G. Van de Ven, E. Schinnerer, R. A. Crain, et al.*, Astrophys. J. **832**, id. 198 (2016).
45. *A. V. Zasov and N. A. Zaitseva*, Astron. Letters **43**, 439 (2017).
46. *J. Binney and M. Merrifield*, *Galactic astronomy* (Princeton, 1998).
47. *S. S. McGaugh and J. M. Schombert*, Astron. J. **148**, 77 (2014).
48. *T. Into and L. Portinari*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **430**, 2715 (2013).
49. *S.-H. Oh, W. J. G. de Blok, F. Walter, E. Brinks, and R. C. Kennicutt*, Astron. J. **136**, 2761 (2008).
50. *T. S. van Albada, J. N. Bahcall, K. Begeman, and R. Sancisi*, Astrophys. J. **295**, 305 (1985).
51. *A. Cattaneo, J. Blaizot, J. E. G. Devriendt, G. A. Mamon, et al.*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **471**, 1401 (2017).