

УДК 524.74-32/17

КИНЕМАТИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВЁЗДНЫХ ДИСКОВ ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИК

© 2012 А. В. Засов¹, А. В. Хоперсков², И. Ю. Катков¹, В. Л. Афанасьев³, С. С. Кайсин³

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Волгоградский государственный университет, Волгоград, 400062 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 17 февраля 2012 года; принята в печать 2 июля 2012 года

По результатам спектральных наблюдений на БТА для трех галактик типа S0–Sa (NGC 338, NGC 3245, NGC 5440) получены радиальные распределения лучевых скоростей и дисперсии лучевых скоростей звезд и ионизованного газа. Рассчитаны кривые вращения галактик. Построены численные динамические “*N*-body” модели галактик, где число точек $N \geq 10^6$. Модели включают три компонента: “живой” балдж, бесстолкновительный диск, динамически эволюционирующий до маргинально устойчивого состояния, и псевдоизотермическое темное гало. Оценки лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд, полученные из наблюдений, сопоставляются с модельными оценками, спроецированными на луч зрения. Показано, что диски NGC 5440 и внешние области NGC 338 являются динамически перегретыми. С учетом ранее полученных результатов наблюдений делается вывод, что динамический нагрев диска имеет место у значительной части дисковых галактик раннего типа, и он, по-видимому, связан с внешним воздействием. Приведены оценки массы диска и относительной массы темного гало, а также отношения массы диска к светимости для семи наблюдавшихся на БТА галактик.

Ключевые слова: галактики: эллиптические и линзовидные—галактики: кинематика и динамика

1. ВВЕДЕНИЕ

Линзовидные галактики (S0) — это дисковые системы, отличающиеся от спиральных галактик, как правило, очень малым количеством нейтрального газа и молодых звезд в диске. Как следствие в них отсутствуют контрастные спиральные ветви и мощные очаги звездообразования. Эти галактики встречаются не только в скоплениях и группах галактик, но и среди галактик поля. Отношение светимостей диска и балджа для них, как и для спиралей, меняется в широких пределах (хотя в среднем оно выше), причем чаще всего, как и в спиральных галактиках, балджи являются фактически псевдобалджами [1]. Поверхностные яркости дисков S0-галактик не ниже, а скорее выше, чем у спиральных галактик сходной светимости [2, 3]. При этом отсутствует резкий переход от галактик типа S0 к более поздним типам (S0/a, Sa).

Вопрос об особенностях S0-галактик и их эволюционной связи со спиральными галактиками активно обсуждается в литературе (см., например, [3–10] и ссылки в этих работах). Различными авторами рассматривались несколько возможных

вариантов превращения галактики с первоначально интенсивным звездообразованием в диске в линзовидную галактику. Они могут быть связаны как с внутренними причинами (высокая эффективность звездообразования, приведшая к исчерпанию газа, выметание газа из диска на стадии активного ядра или вспышки звездообразования), так и с внешними (прогрев или выметание газа при взаимодействии с межгалактической средой, прекращение аккреции на диск, поглощение мелких галактик с последующей вспышкой звездообразования, приливное взаимодействие с близкими галактиками или массивным скоплением галактик).

Слияние с более мелкими системами и сильные приливные возмущения, даже если они имели место в далеком прошлом, оставляют свой исчезающий след, динамически разогревая звездный диск [6, 11]. В то же время выметание газа или его быстрое исчерпание в ту эпоху, когда диск в основном уже был сформирован, не будет сильно сказываться на его динамике. В отсутствие сильного внешнего воздействия, при сравнительно спокойной эволюции галактики, скорость вращения и дисперсия скоростей старых звезд диска, будет определяться прежде всего значениями массы

и радиальной шкалы диска и темного гало. Поэтому изучение кинематических свойств звездных дисков может дать ключ к пониманию истории S0-галактик.

Наблюдения показывают, что линзовидные галактики сильно различаются не только по форме кривой вращения, но и по радиальному профилю дисперсии скоростей звезд. Дисперсия скоростей, измеряемая вдоль луча зрения, как правило монотонно уменьшается с удалением от центра. Но в некоторых случаях даже на расстоянии двух радиальных шкал от центра диска ($r = 2h$) радиальный компонент дисперсии не опускается ниже половины скорости вращения (соответствующие оценки, основанные на опубликованных данных, приведены в Таблице 1 работы Засова и др. [12]). В некоторых случаях дисперсия скоростей не проявляет никаких особенностей и оказывается такой же, как и для большинства спиральных галактик. Построение кинематических моделей показывает, что кинематика дисков некоторых линзовидных галактик не отличается какими-либо аномалиями. В качестве примера, укажем на измерения кинематики планетарных туманностей диска NGC 1023 в работе Cortesi et al. [13]. В подобных случаях можно заключить, что рождение и эволюция линзовидной галактики происходили спокойным путем, без сильных внешних возмущений.

Очевидно, что ни значение дисперсии скоростей, ни её отношение к скорости вращения еще не говорит о том, испытала ли галактика сильный динамический разогрев диска или же дисперсия скоростей звезд диска близка к минимальному (маргинальному) уровню, при котором обеспечивается его динамическая устойчивость. К состоянию маргинальной устойчивости диск может подходить за счет внутренних процессов: динамического нагрева, связанного с развитием локальных неустойчивостей как в плоскости диска, так в перпендикулярном направлении (изгибная неустойчивость) [14, 15]. При наличии массивного сферического компонента (гало, балдж) дисперсия скоростей звезд маргинально устойчивого диска будет значительно меньше круговой скорости. Однако, как показывают численные модели, она достигает 30–50% от круговой скорости безо всякого внешнего воздействия, если диск является самогравитирующим, то есть масса сфероидальных компонент, в поле которых он находится, мала (см., например, [16, 17]). Заметим, что грубая оценка массы дисков спиральных галактик в предположении их маргинальной устойчивости на двух радиальных шкалах от центра ($r \approx 2h$) статистически согласуется с фотометрическими оценками массы дисков [12], хотя для отдельных галактик расхождения оказываются довольно большими.

В общем случае, диск галактики на любом расстоянии от центра может обладать избыточной (для устойчивости) дисперсией скоростей. Будем считать диск динамически перегретым, если на значительном интервале расстояний от центра наблюдаемая дисперсия скоростей звезд C_{obs} систематически превышает оценку дисперсии для маргинально устойчивого диска на величину, не меньшую характерного разброса точек вдоль радиального профиля $C_{\text{obs}}(r)$ (обычно — 10–20 км/с). При этом даже в случае динамической перегретости диска, построение модели галактики в предположении маргинально устойчивого диска имеет смысл: сравнение такой модели с наблюдениями позволяет получить ограничение на часто используемую модель максимального диска, в которой плотность диска “на пределе” согласуется с наблюдаемой кривой вращения. Эта модель, если она учитывает не только форму кривой вращения, но и радиальный профиль дисперсии скоростей старых звезд диска, составляющих его основную массу, может быть названа уточненной моделью максимального диска. Примеры подобного подхода для оценки массы диска или отношения массы диска к светимости обсуждаются, например, в работах Bottema [18, 19], Засова и др. [12, 17, 20], а в применении к LSB-галактикам — Сабуровой [21]. Если реальные диски галактик имеют меньшую массу, чем масса, следующая из модели маргинально устойчивого диска, или если наблюдаемая дисперсия скоростей звезд диска превышает модельную дисперсию скоростей в проекции на луч зрения, то это свидетельствует о динамической перегретости диска.

Проблема определения степени динамической перегретости дисков галактик (или отсутствия перегретости) связана с несколькими обстоятельствами. Во-первых, необходимо чтобы дисперсия скоростей по лучу зрения была измерена до достаточно большого расстояния от центра галактики. Это реализовано с достаточной степенью надежности лишь для небольшого числа галактик, поскольку оценка дисперсии скоростей по абсорбционными линиям — задача значительно более сложная, чем оценка доплеровского сдвига линий. Во-вторых, получаемые оценки дисперсии скоростей и скорости вращения диска должны быть сопоставлены с его поверхностной плотностью на данном расстоянии от центра. Её измерение представляет самостоятельную проблему из-за неоднозначности разложения кривой вращения на составляющие, относящиеся к отдельным компонентам галактик, или из-за систематических ошибок, связанных с использованием фотометрических моделей звездного населения. В-третьих, устойчивость диска зависит от целого ряда трудно учитываемых факторов. Аналитические выражения для критерия

устойчивости получены лишь в локальном приближении и только при сильно упрощающих предположениях.

Более надежным является построение динамически устойчивых численных моделей N тел, удовлетворяющих наблюдаемым распределениям яркости и скорости вращения, и сравнение “модельных” профилей дисперсии скоростей с наблюдаемыми. Численные модели особенно важны для галактик с высокой дисперсией скоростей звезд диска, для которых отсутствует кривая вращения газового слоя. В этом случае трудно использовать аналитический подход: наблюдаемая кривая вращения звезд должна быть скорректирована за асимметричный дрейф, а эта задача имеет аналитическое решение лишь при условии низкой дисперсии, когда отношение квадратов дисперсии скоростей звезд к круговой скорости много меньше единицы.

Построение моделей N тел для трех S0-галактик (NGC 1167, NGC 4150, NGC 6340) и одной галактики типа SBa (NGC 2273) по наблюдениям на БТА было ранее реализовано в работе Засова и др. [22]. Были построены трехмерные численные динамические модели галактик с минимально возможной дисперсией скоростей. Модели включали звездный диск, близкий к максимальному, балдж с начальным распределением плотности по закону Кинга и псевдоизотермическое гало. Позднее спектральные измерения NGC 6340 были заново обработаны и уточнены Чилингаряном и др. [23] с сохранением сделанных ранее выводов. Сравнение моделей с данными наблюдений показало, что из перечисленных четырех галактик только в одном случае — для галактики типа SBa (NGC 2273) — можно говорить о совместимости наблюдаемых оценок с предположением о том, что звездный диск близок к маргинально устойчивому состоянию, то есть не подвергался в прошлом динамическому нагреву. В этом качестве галактика NGC 2273 сходна со многими спиральными галактиками более поздних типов, дисперсия скоростей звезд которых, по крайней мере на расстоянии около двух радиальных шкал диска от центра, действительно близка к пороговому значению [12].

В настоящей работе приводятся результаты спектральных наблюдений на телескопе БТА САО РАН трех галактик ранних типов: NGC 338, NGC 3245 и NGC 5440, и проводится сравнение оценок скоростей с численными моделями галактик с маргинально устойчивыми дисками. Их изображения (по обзору SDSS) приведены на Рис. 1. Использование двух спектральных разрезов позволило проверить правильность выбора позиционного угла PA_0 динамической большой оси.

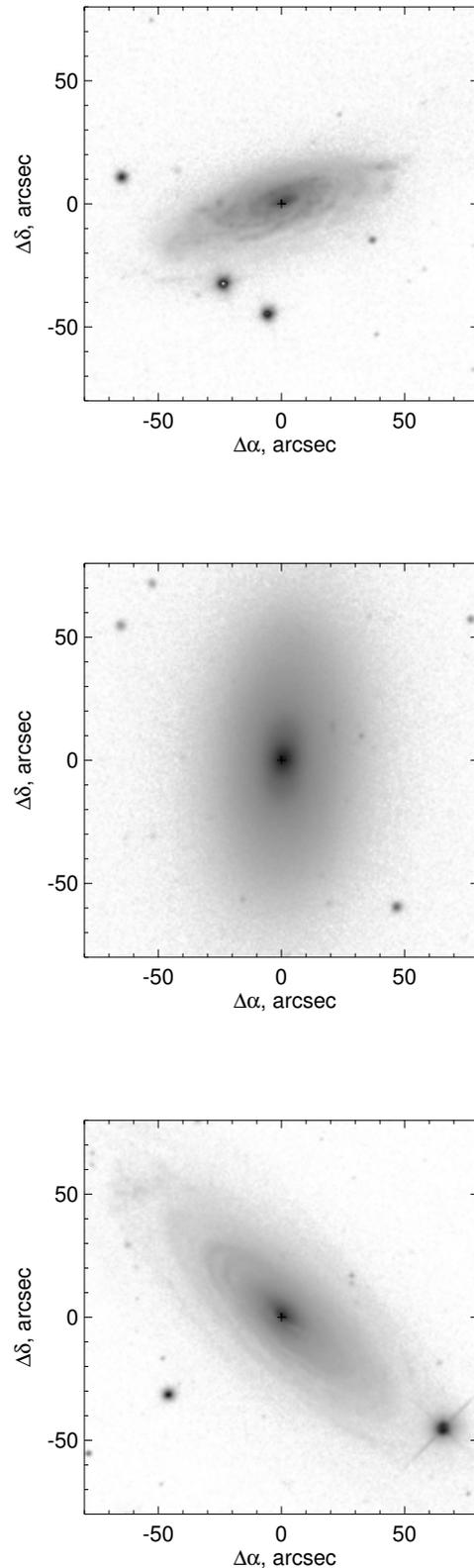


Рис. 1. Изображения галактик NGC 338, NGC 3245, NGC 5440 из обзора SDSS в фильтре g .

В принципе, спектральные разрезы вдоль большой и малой осей галактики позволяют получить из наблюдений отношение дисперсии скоростей вдоль различных осей. Однако проведенные нами оценки получились ненадежными: результаты оказались чрезвычайно чувствительны к выбору закона, аппроксимирующего наблюдаемые профили дисперсий скоростей вдоль большой и малой осей и скорость вращения звездного компонента. Небольшие изменения в аппроксимации исходных данных (в пределах погрешности наблюдений) сильно меняют результирующие оценки отношения дисперсии скоростей C_z/C_r в вертикальном и радиальном направлении, поэтому в настоящей работе они не приводятся.

2. ОПИСАНИЕ ГАЛАКТИК

NGC 338. Это галактика типа Sa или Sab со слабыми спиральными ветвями, член разреженной группы. На изображениях в обзорах SDSS или 2MASS галактика выглядит как дисковая галактика раннего типа с ярким ядром, протяженным балджем и диском, сильно наклоненным к лучу зрения (Рис. 1). На изображениях SDSS в диске видна нечетко выраженная спиральная структура с отдельными областями звездообразования, выделяющимися голубым цветом. В галактике содержится довольно большое (для линзовидных галактик) количество газа HI [24], так что ее можно рассматривать как спиральную галактику раннего типа со слабым звездообразованием. Фотометрия и кинематика галактики ранее рассматривалась в работах [1, 25]. Диск имеет сравнительно низкую центральную (депроецированную) яркость и большую радиальную шкалу в фотометрической полосе R (около 5.8 кпк при расстоянии 65.1 Мпк) и значительно уступает балджу по светимости. Однако, как отмечалось авторами, вывод об аномально ярком и протяженном балдже (эффективный радиус $r_e \approx 4.7$ кпк), возможно, связан с ошибкой фотометрического разложения яркости на компоненты в рамках модели “экспоненциальный диск + балдж Серсика” и с возможным присутствием пыли в центре галактики.

Кривая вращения галактики быстро, на расстоянии нескольких кпк от центра, выходит на плато [25], максимальная скорость вращения оценивается в 300 ± 16 км/с [26]. Однако крупномасштабная асимметрия поля скоростей, возможно, связанная со взаимодействием с соседней галактикой, не позволила авторам [25] использовать полученные оценки скоростей вращения для моделирования галактики. Следуя этой работе, ниже мы приняли позиционный угол большой оси $PA_0 = 108^\circ$ и угол наклона диска $i = 64^\circ$. По спектральным разрезам нами была построена кривая

вращения как для газа, так и для звездного диска, до расстояния примерно $50''$ от центра.

NGC 3245. Это одиночная линзовидная галактика с ярким центральным диском (линзой) с резкой внешней границей на расстоянии $r \approx 15''-20''$ и внешним основным диском. Галактика отличается очень высоким градиентом лучевой скорости в пределах $4''$ от центра [27]. Следов спиральной структуры, зон H II или областей звездообразования не обнаруживается, хотя в спектре центрального диска удалось выделить слабые эмиссии, свидетельствующие о быстром вращении в пределах $10''$. Галактика обладает сейфертовским ядром невысокой активности. По фотометрическим измерениям [28] галактика имеет компактный балдж с эффективным радиусом $r_e = 3''.3$ и диск с радиальной шкалой $h = 17''.6$, или 1.5 кпк при принятом расстоянии 18 Мпк. Кинематика диска галактики исследовалась в работе [29], но измерения охватывают только центральные $17''$, где угловая скорость практически постоянна. По полученным спектральным разрезам была построена кривая вращения звездного диска, медленно спадающая при $r > 30''$. В работе использовались фотометрически определенные углы ориентации диска.

NGC 5440. Это малоизученная линзовидная галактика, возможный член рассеянной группы. Яркая внутренняя часть галактики переходит в диск невысокой поверхностной яркости, в котором заметны слабоконтрастные ветви или обрывки колец. Результаты фотометрии галактики и двумерного фотометрического разделения на балдж и диск приводятся в работе [28]. Эффективный радиус балджа составляет $3''.4$, а радиальная шкала диска — $15''.7$, что соответствует 4.0 кпк при расстоянии 52 Мпк. Позиционный угол фотометрической большой оси $PA_0 = 46^\circ$, что согласуется с нашими измерениями при двух ориентациях щели.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения галактик проводились в прямом фокусе 6-м телескопа БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в 2006–2007 гг. с использованием фокального редуктора SCORPIO [30] в режиме длинной щели (размер щели $6' \times 1''$). Использовалась гризма VPHG 2300G с рабочим спектральным диапазоном 4800–5550 Å, который содержит абсорбционные линии Fe, Mg, Ti и др., а также эмиссии H β , [O III], [N I]. Детектор EEV 42–40 с размером матрицы 2K \times 2K в режиме биннинга 1 \times 2 обеспечил масштаб вдоль щели 0.35"/рх. Ориентация щели, суммарные экспозиции и состояния атмосферы приведены в журнале наблюдений (Таблица 1).

Таблица 1. Журнал наблюдений

Название галактики	Дата наблюдений	Ориентация щели РА, град.	Экспозиция, с	Качество изображений, угл. сек.
NGC 338	2 Окт 2006	289	7×1200	2.7
	18 Сен 2007	197	9×1200	2.4
NGC 3245	14 Апр 2007	355	6×1200	4.0
	7 Апр 2008	267	6×1200	3.3
NGC 5440	12 Мая 2007	230	8×1200	1.3
	16 Мая 2007	320	2.7×1200	1.5

Характерное разрешение полученных спектров 2.6 \AA , что в терминах скорости составляет 65 км/с .

Первичная обработка данных включала в себя стандартные этапы: вычитание усредненного кадра нулевой экспозиции (bias frame), учет неравномерной засветки и вариаций чувствительности матрицы с использованием кадров калибровочной лампы непрерывного спектра (flat), чистка следов космических частиц, построение двумерного дисперсионного уравнения по спектру калибровочной лампы с He-Ne-Ag наполнением, линеаризация спектра, суммирование спектров, вычитание спектра ночного неба с учетом вариаций аппаратного контура вдоль щели (подробнее о вычитании неба см. [31]). Дисперсионное уравнение было параметризовано полиномиальной поверхностью с 5-й степенью полинома вдоль направления дисперсии и с 4-й степенью — поперек дисперсии. Характерная ошибка использования дисперсионного уравнения составляет 0.03 \AA для отдельной спектральной линии. Переход к абсолютным потокам не производился. На каждом этапе первичной обработки рассчитывались кадры с пуассоновскими ошибками потоков.

Для дальнейшей обработки звездных спектров использовался программный пакет ULySS [32, 33], адаптированный для данных SCORPIO. ULySS использовался прежде всего для определения формы аппаратного контура спектрографа и его вариаций по кадру. Для этого были получены кадры рассветного (или сумеречного) неба, которые снимались в ту же ночь, что и объекты. Для определения вариации по полю спектр рассветного неба разбивался на 60 элементов вдоль щели и усреднялся по каждому элементу. Спектр разбивался на семь перекрывающихся отрезков по длинам волн. После этого каждый участок спектра аппроксимировался солнечным спектром высокого разрешения ($\lambda/\Delta\lambda \approx 10\,000$), свернутым с аппаратным

контуром в виде гаусс-эрмитовой функции с параметрами v , σ , $h3$ и $h4$ [34]. Аппаратный контур использовался для процедуры вычитания спектра ночного неба, а также при анализе спектров галактик.

Кроме того, программный пакет ULySS применялся для попиксельной аппроксимации наблюдаемых спектров модельными спектрами звездных населений посредством минимизации невязки χ^2 . Предварительно спектр объекта адаптивно бинировался. Суть этой процедуры состоит в разбиении спектра на элементы вдоль щели, исходя из условия, что отношение “сигнал—шум” в каждом усредненном элементе было не менее наперед заданного значения (обычно 20–50).

При моделировании спектра использовались модели высокого разрешения PEGASE.HR [35] для простого звездного населения с историей звездообразования, описывающей единственной вспышкой (SSP — Simple Stellar Population) и салпитеровской начальной функцией масс. Перед подгонкой сетка моделей PEGASE.HR подвергалась свертке с аппаратным контуром для данного положения на щели (для данного бина). Далее, внутри алгоритма подгонки происходил выбор спектра звездного населения из сетки моделей для текущих параметров возраста вспышки T и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. После этого осуществлялась свертка с функцией распределения скоростей по лучу зрения (LOSVD — Line-Of-Sight Velocity Distribution), которая задавалась в виде гаусс-эрмитовой функции. Далее спектр умножался на полиномиальный континуум, что позволяет формально учесть внутреннее поглощение света в галактике, а также неучтенную кривую спектральной чувствительности матрицы. После подгонки спектра для каждого бина были получены оценки лучевой скорости v_r (км/с), дисперсии скоростей звезд C_{obs} (км/с), параметры, характеризующие негауссовость LOSVD: $h3$, $h4$, а также

SSP-эквивалентные оценки возраста T (Gyr) и металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ (dex). В данной работе используются только оценки скорости и дисперсии скоростей. Более детальное описание процедур подгонки и обсуждение вопросов о вырождении параметров и устойчивости алгоритмов см. в работах [32, 36, 37].

4. ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Основные принципы построения численных равновесных моделей галактик изложены в работе [22] и в монографии Фридмана и Хоперскова “Физика галактических дисков” [14]. В основу динамических моделей галактик положено численное интегрирование уравнений движения N тел, где N — несколько миллионов (в зависимости от модели) частиц, имитирующих диск, балдж и темное гало. На каждом шаге интегрирования находилось решение уравнения Пуассона для заданного распределения частиц с использованием алгоритма TreeCode.

Считалось, что кривая вращения газа близка к кривой кругового вращения, а скорость вращения, определенная по звездам, ниже круговой на величину асимметричного дрейфа. Построение моделей галактик, диски которых находятся на границе гравитационной устойчивости, достигалось методом последовательных приближений при постепенном увеличении начальной дисперсии скоростей первоначально слабонеустойчивого диска до получения динамически устойчивого состояния, сохраняющегося в течение нескольких оборотов периферийных областей диска. Оценки лучевых скоростей звезд и газа и дисперсии скоростей звезд, полученные из наблюдений, сопоставлялись с модельными оценками вдоль большой оси, спроецированными на луч зрения с учетом угла наклона диска.

При сравнении с наблюдениями использовался модельный профиль дисперсии скоростей звезд с учетом балджа. При этом относительный вклад балджа и диска в излучение считался пропорциональным их колонковой плотности вдоль луча зрения. Радиальная шкала распределения массы диска во всех моделях принималась равной фотометрически определенной шкале яркости, а отношение массы к светимости рассматривалось как свободный параметр. Масса диска и других компонент определялись таким образом, чтобы радиальный профиль лучевой скорости звездного диска, рассчитанный для данной модели, был близок к наблюдаемому профилю скорости, определенному по звездному спектру (т.е. не скорректированному за асимметричный дрейф), а кривая кругового вращения не входила бы в противоречие с оценками скоростей по эмиссионным линиям,

Таблица 2. Интегральные параметры дисков: результат моделирования

Название галактики	Тип	Масса диска $M_d, 10^{10} M_\odot$	M_h/M_{d+b}	Состояние диска
NGC 1167	S0	39	0.51	o
NGC 2273	SBa	8.7	0.65	m
NGC 4150	S0	0.53	0.56	o
NGC 6340	S0	4.54	0.66	o
NGC 338	Sa	15.4	0.32	m
NGC 3245	S0	1.1:	0.6:	m
NGC 5440	Sa	19.3	0.56	o

если они присутствуют. В отличие от предыдущей работы [22] в модели N тел балдж считался “живым”, и его параметры находились из условия соответствия модельной дисперсии скоростей системы “диск+балдж” наблюдаемому значению для центральной части галактики.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОЦЕНОК, СРАВНЕНИЕ С МОДЕЛЯМИ

Полученные радиальные профили лучевых скоростей и дисперсии скоростей звезд приведены на Рис. 2–4. Восстановленная кривая вращения для маргинально устойчивого диска каждой галактики (т.е. для модели устойчивого диска с максимальной возможной плотностью), а также модельные и наблюдаемые радиальные профили дисперсии скоростей звезд, показаны на Рис. 5. Результаты оценки параметров компонент галактик даны в Таблице 2. Фотометрические параметры галактик, если их источник не указывается, взяты из базы данных NED¹. Трехмерная осесимметричная модель включает балдж Кинга (с усечением) с фиксированной полной массой M_b , экспоненциальный диск и сферическое псевдоизотермическое гало. Сплошными и штриховыми линиями на Рис. 5 представлены модельные кривые круговой скорости и скорости звездного диска соответственно. Спадающая сплошная линия в нижней части рисунка демонстрирует радиальный профиль дисперсии скоростей звездного диска в проекции на луч зрения для построенной модели. Хотя все три галактики относятся к ранним морфологическим типам, их кривые вращения оказались различными по форме, что говорит о различном характере распределения массы в галактиках. В NGC 338

¹<http://ned.ipac.caltech.edu/>

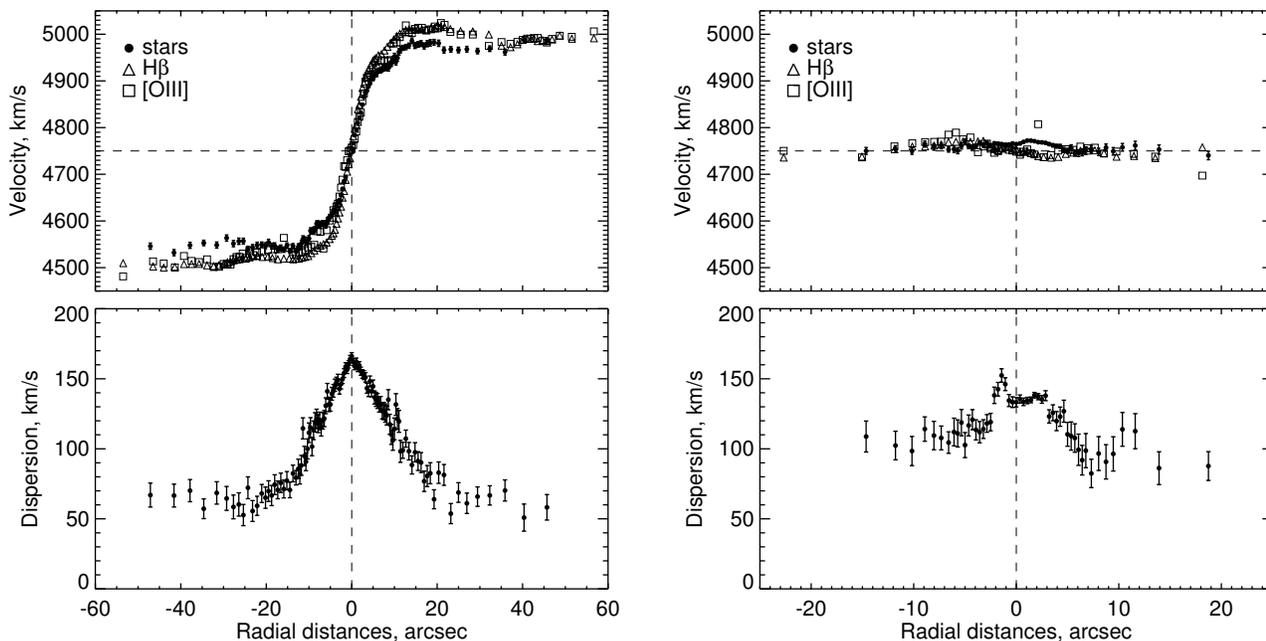


Рис. 2. Галактика NGC 338. Слева — результаты измерения вдоль большой оси, справа — вдоль малой. Вверху — радиальные профили лучевой скорости звезд и ионизованного газа, внизу — дисперсия скоростей звезд. Бары ошибок лучевых скоростей ионизованного газа не показаны, т.к. их размер не больше размера значков.

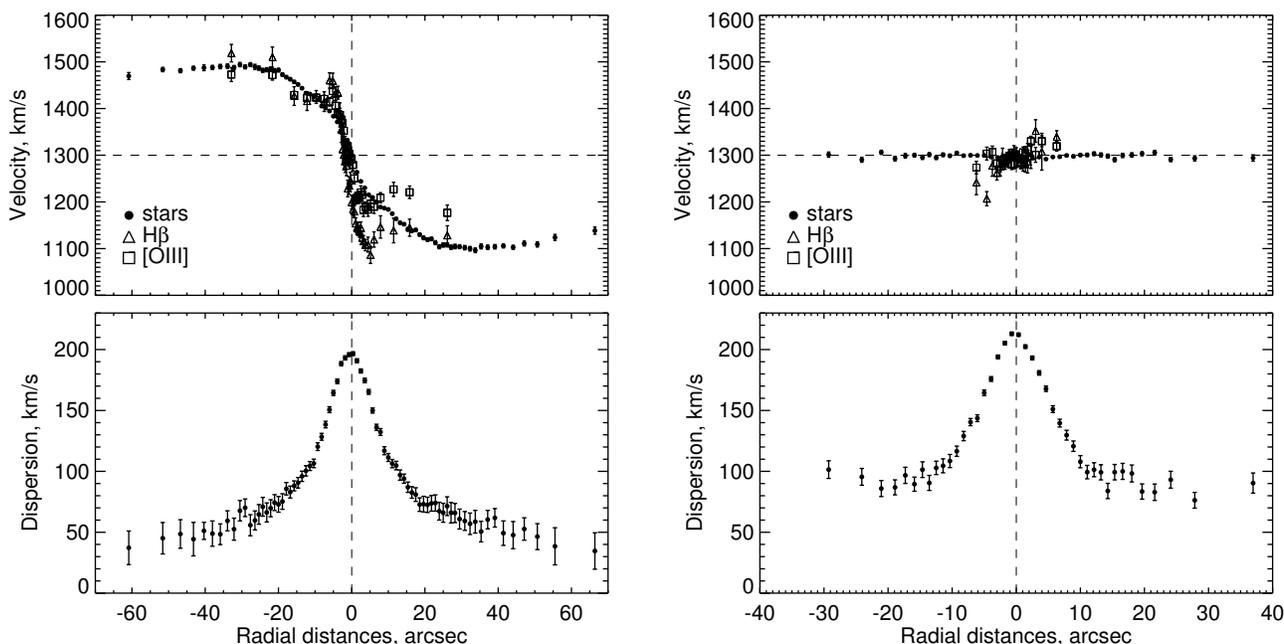


Рис. 3. То же, что на Рис. 2, но для галактики NGC 3245.

имеет место выход кривой вращения на плато на $r \approx 3$ кпк и некруговые скорости на больших r , в NGC 3245 кривая вращения для звезд проходит через максимум, а в NGC 5440 кривая отличается очень высоким градиентом скорости в центральной области, который плавно уменьшается с расстоянием от центра.

“Живой” балдж строился из динамических частиц с массами, одинаковыми для балджа и диска. В итерационном процессе построения равновесного маргинально устойчивого диска параметры, описывающие закон распределения плотности в балдже, оставались теми же, но немного изменялась дисперсия скоростей балджа и немного

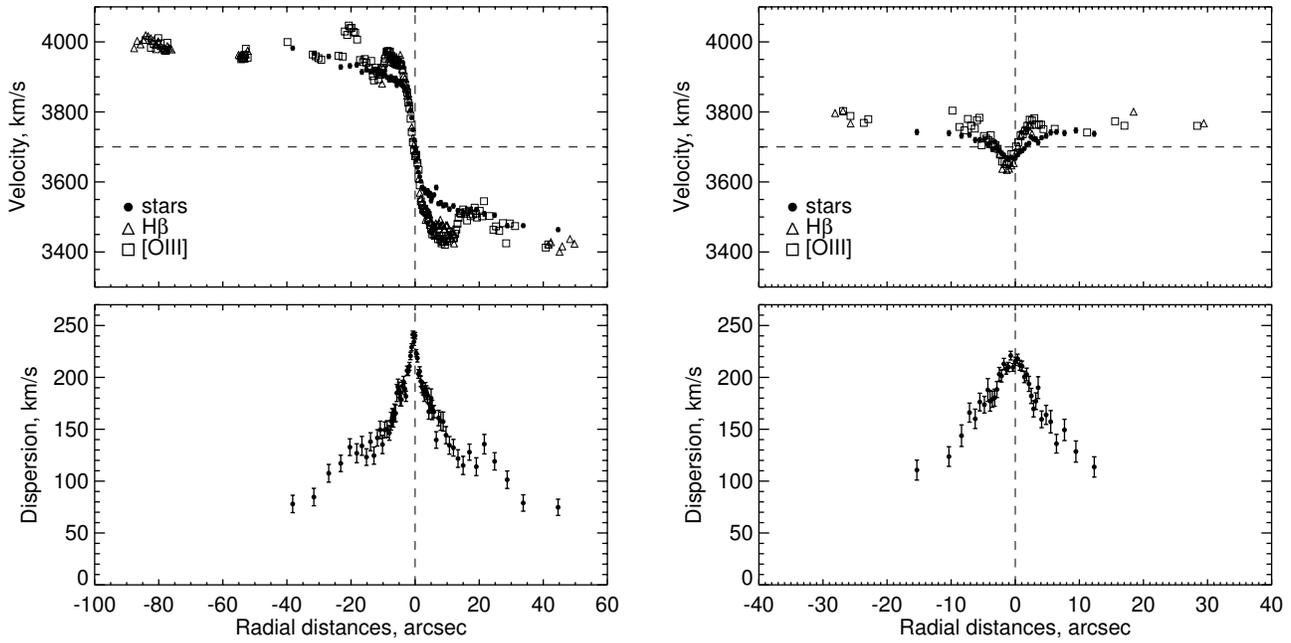


Рис. 4. То же, что на Рис. 2, но для галактики NGC 5440.

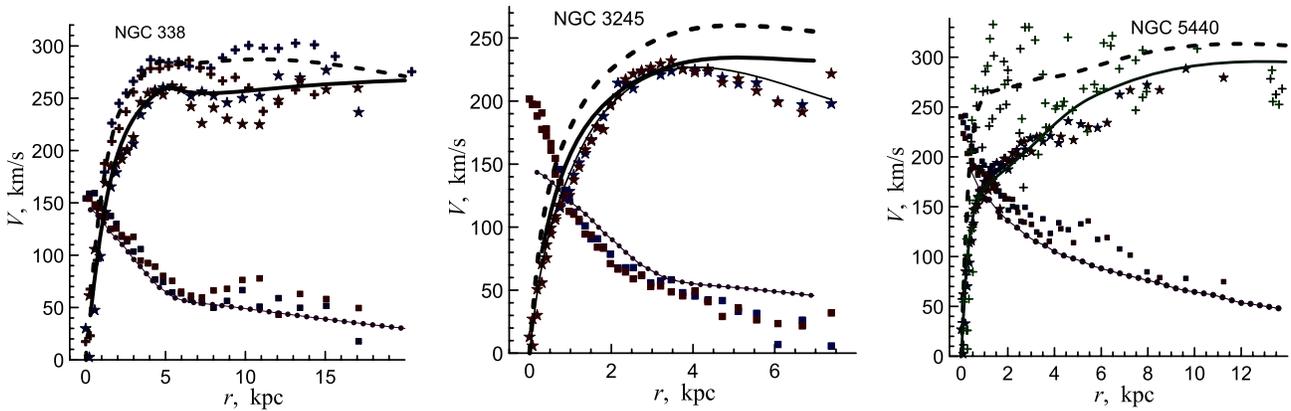


Рис. 5. Результаты динамического моделирования. Толстая штриховая линия — круговая скорость вращения, толстая сплошная линия — скорость вращения звезд в модели, звездочки — скорость вращения звезд по данным наблюдений, крестики — скорости вращения газа по данным наблюдений, квадратики — дисперсии скоростей звезд по наблюдениям, тонкая линия с кружками — дисперсия скоростей вдоль луча зрения в модели маргинально устойчивого диска. Для NGC 3245 приведены две модельные кривые вращения звезд (тонкая и толстая линии), соответствующие разной дисперсии скоростей по z -координате (см. текст).

возрастала его сплюснутость, что связано с гравитационным влиянием диска на балдж. Во всех трех галактиках поверхностные плотности балджа доминируют над плотностью диска вблизи центра. При моделировании галактик происходило незначительное перераспределение вещества в балдже, прежде всего в самой центральной зоне, где плотность повышалась, а в переходной области между диском и балджем профиль плотности становился немного более пологим. На динамику дисков эти изменения не оказывали существенного влияния.

Параметры балджей галактик в построенных моделях (масса балджа, шкала балджа и радиус балджа в модели Кинга) приведены в Таблице 3.

Сделаем комментарии по каждой галактике.

NGC 338. Это быстро вращающаяся галактика, ее круговая скорость достигает 280–300 км/с. Профиль лучевых скоростей был получен как по абсорбционным линиям, так и по эмиссиям $H\beta$, $[N I]$ и $[O III]$ (Рис. 2). Наблюдения галактики проводились при ориентации щели 17° и 108° (последний угол близок к позиционному углу боль-

Таблица 3. Параметры балджа

Название галактики	Масса M_b, M_\odot	Шкала r_b , кпк	Радиус r_b^{\max} , кпк
NGC 338	4.80×10^{10}	1.12	6
NGC 3245	0.45×10^{10}	0.35	1.6
NGC 5440	3.20×10^{10}	0.38	3.6

шой оси). Кривая вращения достигает насыщения на $r \approx 4$ кпк ($12''$), однако на $r > 8$ кпк ($25''$) скорости вращения по разные стороны от центра расходятся. Особенно это заметно на кривых, построенных по разрезу вдоль большой оси, где различие скоростей (с учетом эффектов проекции) достигает 50 км/с. Таким образом, подтверждается асимметрия поля скоростей, найденная ранее в работе [25], и наиболее заметная в линии HI. Наши измерения показывают, что эта аномалия затрагивает не только газ, но и звездную составляющую. При этом уменьшение скорости вращения звезд компенсируется ростом дисперсии скоростей, что свидетельствует о реальности этой особенности. Причина аномалии, возможно, связана с возмущением поля скоростей звезд и газа при поглощении галактикой небольшого спутника. Однако без информации о поле скоростей звездного диска нельзя понять, является ли этот эффект локальным или аномалия охватывает большую область диска.

Скорость вращения газа, определенная по эмиссионным линиям, заметно превышает скорость вращения звездного диска, что и качественно, и количественно объясняется более высокой дисперсией скоростей звезд. Наблюдаемая дисперсия скоростей, особенно высокая внутри области $r \leq 15'' \approx 5$ кпк, где доминирует балдж галактики, быстро уменьшается и выходит на пологий участок на $r \approx 20''$. Вдоль малой оси ($PA = 17^\circ$) профиль дисперсии скоростей отслеживается хуже. Дисперсия остается высокой до $r \approx 10''-15''$, где она определяется в основном вкладом балджа.

Сопоставление полученного из наблюдений профиля дисперсии лучевых скоростей звезд с рассчитанной для модели маргинально устойчивого диска (нижняя кривая на Рис. 5) показывает, что наблюдаемая дисперсия скоростей меняется вдоль радиуса по обе стороны от центра галактики, следуя модельному профилю, и лишь немного, в среднем на 10–20 км/с, превышает модельные оценки. Характерные ошибки оценки дисперсии имеют примерно ту же величину. Поэтому можно заключить, что диск в пределах радиуса 7–8 кпк ($22''-25''$) близок к маргинально устойчивому

состоянию, и, следовательно, не подвергался сильному динамическому нагреву. На более далеких расстояниях большая часть оценок дисперсии скоростей лежит выше модельной зависимости, что позволяет говорить о заметной перегретости диска.

NGC 3245. Галактика оказалась очень сложной для моделирования. Более того, нам не удалось разработать адекватную самосогласованную модель, которая хорошо бы описывала кинематику всего диска: внешние и внутренние области диска отклоняются от модели максимального маргинально устойчивого диска, но по разным причинам, поэтому требуют отдельного обсуждения. Рассмотрим эту галактику подробнее.

Профили скорости вращения и дисперсии скоростей галактики имеют симметричный вид. Однако галактика обладает рядом динамических особенностей. Во-первых, в пределах $10''-15''$ (≈ 1 кпк) от центра скорость вращения газа (в проекции на луч зрения) превышает скорость вращения звездного диска. Можно предположить, что газ образует динамически обособленный диск, наклонный по отношению к звездному, поскольку разрез вдоль малой оси галактики демонстрирует ненулевой градиент скорости газа (Рис. 3). Получить надежную оценку этого градиента по имеющимся данным невозможно, поскольку эмиссии наблюдаются только вблизи ядра.

Другой особенностью этой галактики является максимум на кривой вращения звездного диска: начиная с $r \approx 4$ кпк (примерно $45''$), скорость его вращения уменьшается. Отношение дисперсии скоростей $C_z/C_r \approx 0.5-0.7$, типичное для галактических дисков (в том числе в численных моделях, устойчивых относительно изгибных возмущений), не позволяет воспроизвести наблюдаемый максимум кривой вращения. Для объяснения полученной формы кривой необходимо принять, что в области максимума и последующего спада скорости вращения выполняется условие $C_z \approx C_r$, то есть диск имеет довольно большую вертикальную дисперсию скоростей, при которой толщина звездного диска оказывается очень большой (в среднем 1.2 кпк вблизи максимума кривой, что примерно соответствует шкале высот толстого диска нашей Галактики). При этом имеет место рост вертикальной шкалы звездного диска с радиусом как результат уменьшения поверхностной плотности диска. Соответствующая этой модели кривая вращения звездного диска показана сплошной тонкой линией на Рис. 5. Однако кривая круговой скорости галактики (штриховая линия на Рис. 5) может не иметь максимума и, по-видимому, выходит на плато.

Третья особенность галактики заключается в высокой дисперсии скоростей звезд в центральной области, не воспроизводящейся в рамках простой

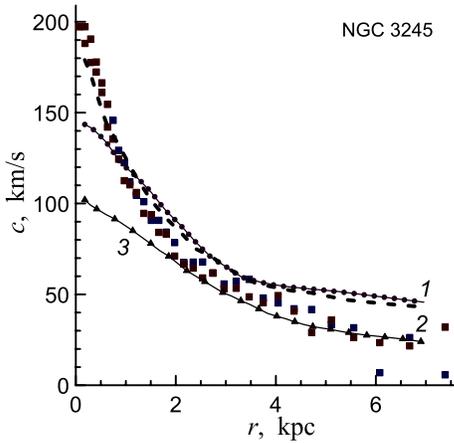


Рис. 6. Радиальные распределения дисперсии скоростей вдоль луча зрения для галактики NGC 3245. Данные наблюдений — квадратики, кривая (1) соответствует модели, изображенной на Рис. 5, штриховая кривая (2) — модель с перегретой центральной частью диска, (3) — модель с массивным гало и легким маргинально устойчивым диском.

модели с минимально возможной дисперсией скоростей. Наблюдаемая дисперсия скоростей звезд диска начинает расти с приближением к центру еще не доходя до области, где доминирует балдж. На Рис. 6 дополнительно к модели максимального маргинально устойчивого диска (кривая (1)) штриховой линией (2) приведены результаты построения модели, в которой центральная часть диска перегрета (радиальная дисперсия скоростей превышает минимальное значение, требующееся для устойчивости диска). Внутреннюю протяженную область диска с высокой дисперсией скоростей звезд естественно связать с центральным утолщением диска (линза, псевдобалдж) этой галактики.

Наконец, из всех рассмотренных нами галактик NGC 3245 — единственная, для которой динамическая модель галактики с маргинально устойчивым максимальным диском на большом протяжении предсказывает дисперсию скоростей звезд выше наблюдаемой: на 10–20 км/с для $r = 1–4$ кпк (около $10''–45''$) и на 25–30 км/с для $r = 6$ кпк (около $70''$) (см. Рис. 5). Поскольку дисперсия скоростей маргинально устойчивого диска является минимально допустимой, мы должны сделать вывод о том, что в данном случае модель максимального диска переоценивает его плотность. За пределами $r = 2$ кпк (около $20''$) наилучшее согласие наблюдаемой дисперсии скоростей с ожидаемой для маргинально устойчивого диска (кривая (3) на Рис. 6) достигается при полной массе диска $M_d = 1.1 \times 10^{10} M_\odot$, что примерно вдвое меньше, чем для максимального диска.

Таким образом, динамические особенности наблюдаемой галактики можно объяснить тем, что диск галактики “перегрет” только в центральной части, а за ее пределами он может быть маргинально устойчив к возмущениям в плоскости диска, но при этом характеризуется высоким отношением C_z/C_r , а следовательно, большой толщиной.

NGC 5440. Кривые лучевых скоростей получены для этой галактики как для звезд, так и для газа по линиям [N I] и [O III] (Рис. 4). Распределение скоростей вдоль большой оси демонстрирует правильный характер вращения диска, особенно для звездного компонента, причем в области роста кривой вращения звездный компонент вращается медленнее и скорость меняется монотонно, в то время как скорость газового компонента проходит через максимум на расстоянии около $10''$ от центра. В области плато ($r > 20''$) скорости звезд и газа сравниваются. Центральный минимум в распределении скоростей газа и звезд вдоль малой оси является артефактом, который объясняется тем, что щель прошла не точно через центр вращения. При наличии крутого градиента скорости для этого достаточно, чтобы сдвиг составил $1''–2''$.

Модельные распределения скоростей сопоставляются с наблюдаемыми на Рис. 5. Кривая вращения определяется значительно увереннее по звездам, чем по газу: разброс оценок скорости газа достигает 50 км/с относительно кривой вращения, лишь немного уменьшаясь к периферии. Удивительно, что наличие некруговых движений газа имеет место, несмотря на низкую интенсивность звездообразования, которое могло бы их поддерживать.

Для построения динамической модели галактики предпочтительнее использовать оценки скоростей звездного компонента, радиальный профиль которых имеет плавный и симметричный вид. Как видно из рисунка, дисперсия лучевых скоростей звезд на 20–40 км/с превышает ожидаемое значение для модели максимального маргинально устойчивого диска, причем на всем протяжении полученной кривой вращения. Поэтому звездный диск галактики можно считать умеренно перегретым.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Из семи дисковых галактик ранних типов, рассмотренных в настоящей работе и работе [22], модель маргинально устойчивого диска может объяснить наблюдаемые скорости и дисперсии скоростей только в двух галактиках: NGC 2273 и NGC 3245, а также во внутренней области NGC 338 (см. Таблицу 2, где в последнем столбце отмечается перегретый диск (“o” — от “overheated”) или диск, для которого наблюдения

согласуются с предположением о его маргинально устойчивом состоянии (“m” — от “marginal”). Как NGC 2273, так и NGC 3245 являются одиночными линзовидными галактиками, и вероятность динамического нагрева при внешнем воздействии на них минимальна, в то время как остальные принадлежат разреженным группам. Что касается NGC 338, то она не является “классической” линзовидной галактикой, поскольку в ней наблюдается спиральная структура диска, и она представляет скорее ранний тип спиралей. В Таблице 2 приведены также массы диска и относительная масса гало в пределах четырех радиальных шкал диска. Интервал значений последней вполне типичен для дисковых галактик.

Результаты проведенных наблюдений и расчет численных моделей галактик S0–Sa подтверждают вывод о том, что существенная доля дисковых галактик ранних типов (но далеко не все из них) обладают динамически перегретыми звездными дисками на расстоянии 1–2 радиальных шкал от центра, то есть их дисперсия скоростей существенно выше, чем требуется для гравитационной устойчивости диска. Заметим, что галактики с перегретыми дисками не выделяются ни по массе диска, ни по относительной массе гало, ни по отношению массы диска к светимости (см. Таблицу 2), что говорит в пользу внешних механизмов увеличения дисперсии скоростей. По-видимому, эти галактики прошли в прошлом стадию слияния с более мелкими системами, что привело к быстрому уменьшению количества газа в диске через исчерпание газа и/или стимулирование вспышки активности ядра, способной вымести газ из диска. Как показывают спектральные наблюдения ряда линзовидных галактик, для их звездных дисков характерно высокое отношение содержания магния к железу, что придает им сходство с толстыми дисками спиральных галактик [38, 39]. Тогда динамический нагрев звездного диска должен был иметь место в первые 1–2 миллиарда лет после начала бурной стадии его формирования, то есть до того, как межзвездный газ обогатился железом в результате активности сверхновых типа I. В отличие от линзовидных галактик галактики более поздних морфологических типов редко обладают избыточной дисперсией скоростей звезд на расстоянии нескольких радиальных шкал от центра [12], следовательно, ранняя эволюция спиральных галактик проходила, как правило, менее бурно.

Часть линзовидных галактик избежала сильного динамического нагрева диска. В этом случае морфологические особенности, присущие этому типу галактик, по-видимому, связаны с иными причинами, например, с высокой активностью ядра, которая может влиять на содержание газа и звездообразование в галактике [40], либо со

взаимодействием с межгалактическим газом, если галактика находится в скоплении или тесной группе. Примечательно, что две наиболее изолированные галактики, содержащиеся в нашей небольшой выборке (NGC 2273 и NGC 3245), относятся как раз к объектам, где имеются основания предполагать наличие маргинально устойчивых дисков. Поэтому можно заключить, что существует как минимум два различных механизма, ответственных за образование линзовидных галактик, причем большая часть этих галактик, по-видимому, прошла раннюю стадию формирования динамически “горячего” диска.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Результаты наблюдений получены на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН, работающем при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028, 16.518.11.7073). Авторы благодарны А. В. Моисееву за помощь в проведении наблюдений и ценные советы, а также рецензенту, сделавшему ряд ценных замечаний. Авторы также выражают признательность Комитету по тематике больших телескопов РАН за возможность реализации программы спектральных наблюдений на БТА. Также использовались публичные данные проекта SDSS, поддержанного Фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, Национальным научным фондом и Министерством энергетики США. Работа поддержана грантами РФФИ 11-02-12247-офи-м, РФФИ 12-02-00685, Президентским грантом МД-3288.2012.2, а также фондом “Династия”. Авторы благодарны НИВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова за возможность использования суперкомпьютеров “Чебышёв” и “Ломоносов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Noordermeer and J. M. van der Hulst, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **376**, 1480 (2007).
2. A. Boselli and G. Gavazzi, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **118**, 517 (2006).
3. A. Boselli, S. Boissier, L. Cortese, and G. Gavazzi, *Astron. Nachr.* **330**, 904 (2009).
4. J. M. Barr, A. G. Bedregal, A. Aragón-Salamanca, et al., *Astronom. and Astrophys.* **470**, 173 (2007).
5. A. Aragón-Salamanca, *IAUS* **245**, 285 (2008).
6. K. Bekki and W. J. Couch, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **415**, 1783 (2011).
7. S. van den Bergh, *Astrophys. J.* **694**, L120 (2009).
8. M. J. Williams, M. Bureau, and M. Cappellari, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **409**, 1330 (2010).

9. O. K. Sil'chenko and I. V. Chilingarian, *Astron. Lett.* **37**, 1 (2011).
10. E. Noordermeer, M. R. Merrifield, L. Coccato, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **384**, 943, (2008).
11. F. Bournaud, C. J. Jog, and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **437**, 69 (2005).
12. A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, and A. S. Saburova, *Astron. Lett.* **37**, 374 (2011).
13. A. Cortesi, M. R. Merrifield, M. Arnaboldi, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **414**, 642 (2011).
14. А. М. Фридман, А. В. Хоперсков, *Физика галактических дисков* (Физматлит, Москва, 2011).
15. E. Griv and M. Gedalin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **422**, 600 (2012).
16. A. V. Khoperskov, A. V. Zasov, and N. V. Tyurina, *Astron. Rep.* **47**, 357 (2003).
17. A. V. Zasov, A. V. Khoperskov, and N. V. Tyurina, *Astron. Lett.* **30**, 593 (2004).
18. R. Bottema, *Astronom. and Astrophys.* **197**, 105 (1988).
19. R. Bottema, *Astronom. and Astrophys.* **275**, 16 (1993).
20. A. V. Zasov and A. S. Saburova, *Astron. Lett.* (in press).
21. A. S. Saburova, *Astron. Rep.* **55**, 409 (2011).
22. A. V. Zasov, A. V. Moiseev, A. V. Khoperskov, and E. A. Sidorova, *Astron. Rep.* **52**, 79 (2008).
23. I. V. Chilingarian, A. P. Novikova, V. Cayatte, et al., *Astronom. and Astrophys.* **504**, 389 (2009).
24. E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **442**, 137 (2005).
25. E. Noordermeer, J. M. van der Hulst, R. Sancisi, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **376**, 1513 (2007).
26. E. Noordermeer and M. A. W. Verheijen, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **381**, 1463 (2007).
27. L. C. Ho, A. V. Filippenko, W. L. Sargent, and C. Y. Peng, *Astrophys. J. Suppl.* **112**, 391 (1997).
28. J. Mendez-Abreu, J. A. L. Aguerra, E. M. Corsini, and E. Simonneau, *Astronom. and Astrophys.* **478**, 353 (2008).
29. F. Simien and Ph. Prugniel, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **131**, 287 (1998).
30. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194, (2005).
31. I. Y. Katkov and I. V. Chilingarian, *ASP Conf. Proc.* **442**, 143 (2011).
32. M. Koleva, Ph. Prugniel, A. Bouchard, and Y. Wu, *Astronom. and Astrophys.* **501**, 1269 (2009).
33. M. Koleva, Ph. Prugniel, and S. De Rijcke, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **385**, 1998 (2008).
34. R. P. van der Marel and M. Franx, *Astrophys. J.* **407**, 525 (1993).
35. D. Le Borgne, B. Rocca-Volmerange, Ph. Prugniel, et al., *Astronom. and Astrophys.* **425**, 881 (2004).
36. M. Cappellari and E. Emsellem, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **116**, 138 (2004).
37. I. Chilingarian, Ph. Prugniel, O. Sil'chenko, and M. Koleva, *IAUS* **241**, 175 (2007).
38. O. Sil'chenko, *IAUS* **284** (in press); *astro-ph:1112.3771*.
39. O. K. Sil'chenko, I. S. Proshina, A. P. Shulga, and S. E. Kuposov, submitted to *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*
40. N. Silk, *Astrophys. J.* **700**, 262 (2009).

Kinematics and Stellar Disk Modeling of Lenticular Galaxies

A.V. Zasov, A.V. Khoperskov, I.Yu. Katkov, V.L. Afanasiev, S.S. Kaisin

We present the results of spectroscopic observations of three S0–Sa galaxies: NGC 338, NGC 3245, and NGC 5440 at the SAO RAS 6-m BTA telescope. The radial distributions of the line-of-sight velocities and radial velocity dispersions of stars and ionized gas were obtained, and rotation curves of galaxies were computed. We construct the numerical dynamic N -body galaxy models with $N \geq 10^6$ points. The models include three components: a “live” bulge, a collisionless disk, dynamically evolving to the marginally stable state, and a pseudo-isothermal dark halo. The estimates of radial velocities and velocity dispersions of stars obtained from observations are compared with model estimates, projected onto the line of sight. We show that the disks of NGC 5440 and the outer regions of NGC 338 are dynamically overheated. Taking into account the previously obtained observations, we conclude that the dynamic heating of the disk is present in a large number of early-type disk galaxies, and it seems to ensue from the external effects. The estimates of the disk mass and relative mass of the dark halo are given, as well as the disk mass-to-luminosity ratio for seven galaxies, observed at the BTA.

Keywords: galaxies: elliptical and lenticular, cD—galaxies: kinematics and dynamics—galaxies: individual: NGC 338, NGC 3245, NGC 5440