

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Смирнов Антон Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ БАРОВ  
В ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЯХ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК**

Специальность 01.03.02 —  
«Астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук  
Наталья Яковлевна Сотникова

Санкт-Петербург — 2022

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Глава 1. X-структуры в различных моделях дисковых галактик</b> . . . .	<b>21</b>
1.1 Введение . . . . .	21
1.2 Моделирование X-структур . . . . .	24
1.2.1 Численные модели . . . . .	24
1.2.2 Общее описание эволюции моделей . . . . .	30
1.2.3 Эволюция толщины звёздного диска . . . . .	34
1.3 Анализ X-структур . . . . .	36
1.3.1 Измерение параметров X-структур . . . . .	36
1.3.2 Эволюция угла раствора в моделях с различным числом частиц . . . . .	40
1.4 Зависимость свойств X-структур от физических параметров модели	41
1.4.1 Зависимость углов раствора от массы тёмного гало . . . . .	44
1.4.2 Зависимость углов раствора от центральной концентрации .	46
1.4.3 Зависимость углов раствора от начальной толщины диска .	47
1.4.4 Зависимость углов раствора от параметра Тумре . . . . .	51
1.4.5 Размеры X-структур . . . . .	52
1.5 Обсуждение результатов главы . . . . .	55
1.5.1 Сравнение с наблюдательными данными . . . . .	55
1.5.2 Сравнение с численно-экспериментальными исследованиями . . . . .	59
1.5.3 Различные сценарии потери баром вертикальной симметрии	61
1.6 Выводы главы . . . . .	63
<b>Глава 2. Связь центральной концентрации плотности и феномена длительной потери баром вертикальной симметрии</b> . . . . .	<b>66</b>
2.1 Введение . . . . .	66
2.2 Численные модели . . . . .	68
2.3 Сравнительный анализ вертикальной эволюции бара в моделях с балджем и без балджа . . . . .	70

2.4	Определение граничных параметров классического балджа, при которых поздний изгиб бара возможен . . . . .	74
2.5	Обсуждение результатов главы . . . . .	77
<b>Глава 3. Природа X-структур в рассмотренных моделях . . . . .</b>		<b>80</b>
3.1	Введение . . . . .	80
3.2	Методы . . . . .	84
3.2.1	Численные модели . . . . .	84
3.2.2	Анализ главных частот . . . . .	86
3.3	Бар и диск с точки зрения орбит . . . . .	93
3.4	Орбитальный состав В/PS балджей . . . . .	96
3.4.1	Распределения частиц по отношению частот $f_z/f_x$ . . . . .	97
3.4.2	Пространственное распределение различных групп орбит . . . . .	99
3.5	Вклад различных периодических и близких к периодическим орбит в вертикальную структуру . . . . .	101
3.5.1	Интеграл Якоби . . . . .	101
3.5.2	Структура В/PS балджа от центра к периферии . . . . .	104
3.6	Отдельные орбиты и X-структура . . . . .	106
3.6.1	Морфология наиболее типичных орбит . . . . .	108
3.6.2	Усредненные по времени орбиты . . . . .	110
3.6.3	Природа X-структуры . . . . .	112
3.7	X-структуры, создаваемые различными группами орбит . . . . .	115
3.7.1	Выделение X-структур . . . . .	115
3.7.2	Свойства X-структур, составленных из различных групп орбит . . . . .	115
3.8	Выводы главы . . . . .	120
<b>Глава 4. Улучшенная фотометрическая модель В/PS балджа с X-структурой . . . . .</b>		<b>124</b>
4.1	Введение . . . . .	124
4.2	Фотометрическая модель В/PS балджа с X-структурой . . . . .	126
4.3	Подгонка модели . . . . .	133
4.4	Численные модели . . . . .	137
4.5	Декомпозиция реальных галактик . . . . .	148

	Стр.
4.5.1 Наблюдательные данные . . . . .	148
4.5.2 Результаты фотометрической декомпозиции реальных галактик . . . . .	149
4.6 Сравнение с предыдущими работами . . . . .	160
4.7 Сравнение с модельными галактиками . . . . .	166
4.8 Выводы главы . . . . .	167
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>170</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>174</b>

## Введение

В центральных областях многих галактик, видимых с ребра, часто можно заметить характерные уярчения, имеющие форму арахиса [1]. Типичным представителем галактик с таким уярчением является галактика NGC 128 (Рис. 1, *сверху*). В некоторых галактиках (например, NGC 7332, Рис. 1, *снизу*) уярчение схожей физической природы имеет форму ящика. Такие объекты принято называть ящикоподобными или арахисообразными балджами (англ. “boxy/peanut-shaped bulges” или “B/PS bulges”).

На изображении галактики NGC 128, представленном на Рис. 1 (*сверху*), аккуратный наблюдатель также может заметить четыре луча, выделяющиеся на фоне всего остального “арахиса”. Эти лучи практически симметричны относительно плоскости диска и исходят из самой центральной области галактики. Если в B/PS балдже наблюдается такая особенность, то принято говорить, что в галактике есть X-структура.



Рис. 1 — Изображение галактик NGC 128 (*сверху*) и NGC 7332 (*снизу*) из Слоановского цифрового обзора неба.

Исследования V/PS балджей в галактиках имеют весьма продолжительную историю. Одна из первых работ в этой области, где подобные балджи и их X-структуры впервые были детально описаны (как раз на примере NGC 128), была выполнена в пятидесятых годах Барбиджем и Барбидж [2]. Сам термин “X-структуры” был введен позже Вайтмором и Беллом [3] при исследовании галактики IC 4767. Изофоты в центральной части этой галактики показывают типичный арахисоподобный профиль. X-структура же была выделена в явном виде после вычитания фотометрической модели диска из исходного изображения галактики.

Более поздние работы [1; 4—10] показали, что доля дисковых галактик с V/PS балджами в локальной Вселенной весьма значительна. В различных выборках их количество варьируется от 20%-25% [5; 6; 8] до 40% [1]. В работе [10] авторы показали, что если учесть эффекты, связанные с наблюдательной селекцией, то V/PS балджи должны существовать примерно в 70% дисковых галактик на эпоху  $z = 0$ , то есть являются весьма часто встречающимися объектами.

В ранних работах выдвигались различные гипотезы относительно физической природы V/PS балджей и X-структур. Среди них коллапс протогалактического облака [11], слияние галактик [12] и аккреция вещества во время приливных взаимодействий [13]. Эти гипотезы не получили дальнейшего развития. Дело в том, что в работе Комбс и Сандерса [14] было напрямую показано, что наблюдаемые V/PS балджи могут быть связаны с барами, часто встречающимися в дисковых галактиках [15—19]. Комбс и Сандерс [14] рассмотрели типичную численную модель галактики с баром и нашли, что бары со временем утолщаются в вертикальном направлении, приобретая форму ящика или арахиса, если смотреть на галактику с ребра. Конкретная форма (“ящик” или “арахис”) при этом определяется углом между большой осью бара и лучом зрения. “Арахис” наблюдается том случае, когда большая ось бара повернута к лучу зрения перпендикулярно, а для углов поворота бара к лучу зрения меньше примерно  $50^\circ$  V/PS балдж в большей степени напоминает ящик.

Дальнейшие численные исследования подтвердили результаты о связи баров и V/PS балджей [14; 20—23]. Были получены и наблюдательные свидетельства этой связи. А именно, исследования кинематики звезд и ионизированного газа показали, что V/PS балджи вращаются цилиндрически [24; 25] и имеют определенную форму распределения скоростей вдоль луча зрения, которая возникает, в

том случае, когда в галактике есть бар [26—30]. Эти факты подкрепили идею о том, что В/PS балджи являются утолщёнными барами.

Вопрос о причинах утолщения баров по-прежнему однозначно не решён. Пока что предложено три возможных физических механизма: шланговая неустойчивость (англ. “fire-hose instability, см. [22]), резонансный захват орбит [31] и так называемый резонансный нагрев [32]. Последние два механизма похожи в том смысле, что в них основным агентом, заставляющим звёзды выходить из плоскости диска, является вертикальный внутренний линдбладовский резонанс 2:1 (англ. vertical inner Lindblad resonance, здесь и далее vILR). Звёзды, захваченные в резонанс, испытывают в среднем ненулевое взаимодействие с осциллирующим потенциалом бара. Они постепенно накапливают небольшие изменения в импульсе и рано или поздно вынуждены покинуть плоскость диска. Фактическое различие между захватом и нагревом состоит в том, что в модели нагрева также учитывается замедление вращения бара со временем [33], что ведёт к изменению местоположения vILR. Шланговая неустойчивость связана с изгибными возмущениями. Последние становятся неустойчивыми, когда отношение дисперсий вертикальной и радиальной компоненты скорости,  $\sigma_z/\sigma_r$ , меньше некоего порогового значения,  $\sigma_z/\sigma_r \approx 0.3 - 0.4$  [34—37]. Интересный результат, касающийся механизмов утолщения бара, был получен Пфеннигером и Фредли [23]. Эти авторы провели численные эксперименты с зафиксированной вертикальной симметрией потенциала и показали, что даже в этом случае бар всё равно утолщается, пусть и на больших временных масштабах. Этот результат говорит о том, что оба механизма, как резонансный захват, так и изгибная неустойчивость, важны для роста бара в вертикальном направлении (см. также недавнюю работу [38]).

Относительно физической природы X-структур, выделяющихся на фоне В/PS балджа, выдвигались различные гипотезы. В ранних работах, где исследовалась 3D структура бара, пространственное разрешение численных моделей было плохим (в компоненте диска было всего  $10^3 - 10^4$  частиц). При этом X-структуры были заметны только на маскированных изображениях, построенных по таким моделям. Поэтому некоторые авторы [21; 23] предполагали, что X-структуры являются оптической иллюзией, возникающей из-за стремления глаза воспринимать вместо самих значений интенсивности её градиент. Однако, с увеличением пространственного разрешения было показано, что X-структуры действительно являются реальными областями повышенной плотности, которые могут наблюдаться не только на маскированных, но и на обычных изображениях, построенных

только по распределению плотности вещества без дополнительной обработки (см. [39]).

В более поздних работах различные авторы пробовали ответить на вопрос о том, за счет чего возникают области повышенной плотности, которыми являются X-структуры. Здесь нужно уточнить, что 3D-бары (V/PS балджи) состоят из различных типов периодических, квазипериодических и липких хаотических орбит [23; 40—46]. В случае V/PS балджей, как правило, рассматриваются так называемые бананообразные орбиты 2:1 [31; 32; 42; 43]. Это орбиты, у которых на один полный оборот вокруг центра системы приходится в точности две осцилляции вдоль вертикальной оси в системе отсчета, где бар покоится. Такие орбиты демонстрируют характерный бананообразный профиль в плоскости, перпендикулярной плоскости диска [23]. Звезда, двигаясь по орбите 2:1, проводит разное время на разных участках своей траектории и существенную часть — в точках, наиболее удалённых от плоскости диска [42; 43]. Множество всех орбит 2:1, имеющих в системе, создаёт профиль плотности с видимыми уярчениями в этих, наиболее удалённых от плоскости диска, точках. Для того чтобы X-структуры наблюдались, подобные уярчения должны быть выстроены вдоль почти прямой линии для орбит с различными апоцентрическими расстояниями. В случае бананообразных орбит 2:1 это оказалось действительно так для некоторых потенциалов [31; 32; 42; 43].

Важным свойством V/PS балджей (и их X-структур) является то, что они есть продукты вековой эволюции галактики, в которой находятся. Поэтому физические свойства этих компонентов тесно связаны со свойствами гравитационного потенциала галактики. В том числе и с компонентой потенциала, создаваемой тёмной материей. Следовательно, подробные наблюдательные исследования V/PS балджей и X-структур могут дать дополнительные важные ограничения на динамику галактик, в которых такие объекты существуют. Наиболее перспективными кандидатами для таких исследований являются галактики, которые наблюдаются в положении “с ребра”, то есть в том случае, когда плоскость диска идет вдоль луча зрения. В таких галактиках можно оценить не только размеры V/PS балджей (что возможно сделать и в галактиках, видимых под промежуточными углами наклона, см. [7]), но и охарактеризовать общую форму V/PS балджей [47] и определить геометрические параметры их наиболее ярких особенностей — X-структур [48; 49].

Хотя ранее связь параметров вертикальной структуры бара и галактики, в которой он образуется, рассматривалась во многих численно-экспериментальных и теоретических работах, напрямую параметры самой X-структуры в этих работах не измерялись. Как следствие, не было и прямого сравнения с наблюдательными данными. В свете же полученных другими авторами новых наблюдательных данных об X-структурах [47—49] представляется важным уточнить, как зависят параметры X-структур от параметров подстилающей галактики. Кроме того, недавние исследования орбитальной структуры баров [50—52] показывают, что в некоторых потенциалах бананообразных орбит 2:1 может быть сравнительно мало по сравнению с другими типами орбит. Поэтому сложившаяся картина, что X-структуры обязаны своим существованием только орбитам 2:1, требует пересмотра на примере различных типов моделей галактик. Наконец, как уже упоминалось, рост бара в вертикальном направлении может определяться различными механизмами (изгибная неустойчивость, резонансный захват и резонансный нагрев), и пока не ясно, какой из них является доминирующим. Поэтому остро стоит вопрос о поиске галактик, в которых бары находятся на стадии крупномасштабной перестройки вертикальной структуры, а именно галактик, в которых бары наблюдаются в вертикально асимметричном состоянии (изгибающиеся бары). Существующая статистика таких галактик весьма бедна [7]. Теоретических же работ, в которых исследовался бы вопрос о том, при каких условиях в галактике возникает долговременный изгиб бара, пока что не проводилось. В то же время, такие исследования необходимы, чтобы уточнить в каких галактиках в дальнейшем следует искать вертикально асимметричные бары.

Настоящая работа посвящена решению упомянутых выше вопросов на основе анализа вертикальной структуры баров в численных моделях дисковых галактик.

**Актуальность темы.** Наблюдаемые X-структуры можно охарактеризовать двумя параметрами: углом раствора (углом между лучом X-структуры и большой осью галактики) и длиной лучей. Новые данные наблюдений показывают, что параметры X-структур реальных галактик лежат в узком диапазоне значений. В работе [47] авторы исследовали V/PS балджи и X-структуры 11 галактик, видимых с ребра, и нашли, что углы раствора лучей лежат в пределах примерно от  $20^\circ$  до  $43^\circ$ . В работе [49] был получен примерно такой же диапазон значений для выборки из 22-х галактик, видимых с ребра: от  $20^\circ \pm 2^\circ$  до  $38^\circ \pm 2^\circ$ . В еще одной работе [48] исследовались две большие выборки галактик с X-структурами и галактики с барлинзами. Если перевести данные из работы [48] в углы раствора X-структур, то для большинства галактик с небольшими углами наклона плоскости диска к лучу зрения ( $i > 70^\circ$ ) разброс углов раствора окажется в диапазоне от  $24^\circ$  до  $45^\circ$ . В работе [49] на примере одной численной модели галактики была показано, что полученный диапазон значений углов раствора, по-видимому, не может объясняться только эффектами проекции. В то же время в теоретических работах ранее вопрос о связи параметров X-структур и параметров галактики, в которой X-структура наблюдается, не ставился. Прежде всего, потому что раньше не было наблюдательного материала, с которым возможно сравнить результаты теоретического анализа. Теперь такой материал есть [47—49]. Поэтому задача о связи параметров X-структур с параметрами галактики, в которой такая X-структура наблюдается, становится весьма актуальной.

При сравнении модельных и наблюдательных данных по X-структурам возникает следующая проблема. Все группы авторов, ранее занимавшиеся исследованиями свойств X-структуры реальных галактик, использовали различные методики определения параметров X-структур. Так, Циамбур и Грэхам [47] характеризовали форму и размеры V/PS балджей и их X-структур, аппроксимируя наблюдаемые изофоты эллипсами, возмущенными некоторой комбинацией Фурье-гармоник. А Лаурикаинен и Сало [48] и Савченко и др. [49] изучали только X-структуры, используя процедуры нерезкого маскирования и фотометрической декомпозиции, соответственно. На примере отдельных галактик видно, что используемые подходы могут приводить к существенным расхождениям в получаемых результатах. Наиболее яркий пример — галактика ESO 443-042. В [47] авторы получили, что X-структура, наблюдаемая в этой галактике, весьма сплюснута (угол раствора примерно  $16^\circ$ ). При этом параметры X-структуры, измеренные в [48] для той же галактики, оказались довольно типичными (угол

раствора примерно  $37^\circ$ ). Кроме того, как будет показано в Главе 1, между углами раствора X-структур модельных и реальных галактик также наблюдается некоторое несоответствие при определении параметров X-структур схожими методами. Для дальнейших исследований X-структур важно понять детальные причины описанных расхождений, как между модельными и наблюдательными данными, так и между наблюдательными данными, полученными разными методами.

Исследуя вековую эволюцию бара в различных моделях, можно установить общую связь параметров X-структур и параметров всей галактики. Однако, найденные таким образом закономерности, строго говоря, будут верны только в рамках рассмотренных моделей. Поэтому важно также понять, какие общие принципы стоят за различиями в морфологии X-структур и их углами раствора в различных моделях. Для этого необходимо исследовать, что из себя представляют X-структуры с динамической точки зрения. С точки зрения динамики отдельных орбит устройство X-структур ранее обсуждалась в литературе только в контексте орбит 2:1 [31; 32; 42; 43]. Результаты недавних численно-экспериментальных работ говорят о том, что, по-видимому, X-структуры могут быть связаны не только с орбитами 2:1. В недавней работе Портейл и др. [50] рассмотрели некоторую модельную галактику с баром, по параметрам близкую к Млечному Пути, и выделили различные семейства орбит в такой модели. Оказалось, что для рассмотренной авторами модели регулярные трехмерные орбиты, связанные с вертикальным резонансом 2:1, немногочисленны и в основном дают вклад в вертикальную структуру только на периферии В/PS балджа. Портейл и др. [50] высказали предположение, что во внутренних частях бара X-структура образуется за счет орбит, связанных с вертикальным резонансом 5:3 (так называемые орбиты-“брецельки”). В моделях, рассмотренных в [51] и [52], наблюдалась качественно похожая ситуация. Этими авторами было найдено сравнительно малое число орбит 2:1 для их моделей. Результаты работ [50—52] говорят о том, что помимо орбит 2:1 вертикальная структура бара в некоторых моделях может поддерживаться другими типами орбит. Если же это так, то возникает вопрос о том, каким образом различные типы орбит, отличные от орбит 2:1, могут образовывать X-структуру. Найти ответ на этот вопрос важно как для интерпретации наблюдательных данных, так и для построения более точных теоретических моделей эволюции бара в вертикальном направлении.

Еще один важный вопрос о связи особенностей вертикальной структуры бара и параметров галактики, в которой такой бар находится, состоит в следующем.

Основное свидетельство того, что бары действительно могут терять симметрию в вертикальном направлении, в первую очередь получено из исследования численных моделей галактик [20; 22; 23; 53—58], исследований динамики изгибных возмущений [59] и исследований динамики орбит в потенциалах, включающих бар-компоненту [20; 42; 60]. Реальная же наблюдательная статистика баров, асимметричных в вертикальном направлении, пока что очень бедна. В настоящее время отождествлены только три галактики, видимые под промежуточными углами наклона (NGC 3227, NGC 4569 и ESO 506-G004), которые демонстрируют косвенные признаки наличия в них асимметричного бара [61; 62]. В то же время в работе [57] было показано, что в некоторых модельных галактиках бар может повторно проходить через стадию потери вертикальной симметрии уже после формирования В/PS балджа. Условия, при которых возникает такой вторичный изгиб бара (англ. *secondary buckling*), ранее специально в литературе не исследовались. Уточнение же этих условий важно по нескольким причинам. Во-первых, с практической точки зрения, такие исследования могут упростить дальнейший поиск галактик с вертикально асимметричными барами, то есть помочь в накоплении наблюдательного материала (пока что весьма скудного) для таких объектов. Во-вторых, такие исследования важны с теоретической точки зрения. Селвудом [63] напрямую было показано, что в различных потенциалах механизмы роста бара также могут быть разными. Поэтому исследование условий, при которых продолжительный изгиб возможен, важно для построения целостной картины о механизмах роста бара в вертикальном направлении.

Исследование особенностей вертикальной структуры бара в различных моделях галактик, проводимое в настоящей работе, существенно дополняет и систематизирует сложившуюся картину того, как происходит вековая эволюция бара в вертикальном направлении. Подобные исследования особенно актуальны на фоне повышения интереса научного сообщества к В/PS балджам на различных красных смещениях [10], В/PS балджам в различных космологических расчетах [64], а также имеют принципиальное значение для интерпретации наблюдательных данных по В/PS балджу Млечного Пути.

**Целью** диссертационной работы является исследование морфологических особенностей вертикальной структуры баров (прежде всего X-структур) в различных моделях галактик и выявление связи между свойствами этих особенностей и свойствами галактик, в которых они образуются.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Моделирование эволюции на большом промежутке времени равновесных трехмерных многокомпонентных моделей галактик с различными начальными условиями в диске и тёмном гало. Измерение углов раствора X-структур в построенных моделях и сравнение полученных модельных данных с данными наблюдений.
2. Моделирование эволюции равновесных трёхмерных многокомпонентных моделей галактик с различными вкладами классического балджа. Сравнительный анализ свойств и оценка величины изгиба бара в вертикальном направлении для различных вкладов классического балджа.
3. Исследование орбитального состава бара в моделях с различной морфологией X-структур. Уточнение физической природы X-структур, а также связи между различными типами орбит и параметрами X-структур.
4. Построение более точной фотометрической модели В/PS балджа с X-структурой, где угол раствора фигурирует явно. Применение этой модели для фотометрической декомпозиции модельных и реальных галактик. Сравнение получаемых модельных данных и данных для реальных галактик.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. *Впервые* проводится сравнение углов раствора и размеров X-структур модельных галактик, имеющих различные физические параметры, с данными наблюдений и показано, что нижняя граница наблюдаемого диапазона углов раствора определяется вкладом тёмного гало в общий гравитационный потенциал галактики.
2. *Впервые* на примере модельных галактик исследованы условия, при которых возникает или подавляется поздний продолжительный изгиб бара и получена оценка граничной массы классического балджа, при которой поздний продолжительный изгиб бара в принципе возможен.
3. *Впервые* для различных типов орбит, а не только орбит 2:1, показано, что X-структуры являются огибающими  $z$ -максимумов таких орбит.
4. Предложена *новая* фотометрическая модель для В/PS балджей, учитывающая, во-первых, наличие X-структуры и, во-вторых, в явном виде включающая в состав параметров угол раствора лучей X-структуры. С

помощью предложенной модели *впервые* получено согласие модельных и наблюдательных данных по углам раствора X-структур.

### **Научная и практическая ценность работы**

Ценность результатов диссертации определяется следующим.

Во-первых, исследования вековой эволюции X-структуры в различных моделях галактик позволило установить связь параметров X-структур и параметров галактик, в которых X-структуры наблюдаются. Важным результатом является результат о малости углов раствора X-структур в галактиках с большой массой тёмного гало. Этот результат может быть использован в качестве дополнительного критерия при оценке массы тёмного гало в наблюдательных исследованиях реальных галактик.

Во-вторых, анализ вертикальной эволюции баров в различных моделях показал, что в зависимости от параметров моделей, вековая эволюция баров в вертикальном направлении протекает существенно различным образом на больших промежутках времени. Выявленные различия в дальнейшем могут быть использованы как при интерпретации наблюдательных данных, так и для построения более точной теории эволюции бара в вертикальном направлении.

В-третьих, нахождение граничных условий, при которых в галактиках может возникнуть долговременный изгиб бара, открывает возможность для построения более строгой выборки галактик, что, в свою очередь, может упростить дальнейший поиск галактик с вертикально асимметричными барами, которых пока практически не найдено.

В-четвертых, результаты относительно динамического устройства V/PS балджей и X-структур в различных моделях галактик имеют фундаментальное значение как для дальнейших теоретических исследований динамики V/PS балджей, так и для интерпретации данных по V/PS балджам реальных галактик, в том числе V/PS балджа Млечного Пути.

В-пятых, предложенная новая фотометрическая модель V/PS балджа с X-структурой может быть использована в дальнейших фотометрических исследованиях V/PS балджей и X-структур в больших обзорах галактик. Это позволит подтвердить найденные модельные зависимости на примере большого объема наблюдательных данных и более детально исследовать механизмы формирования вертикальной структуры баров в реальных галактиках.

### Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе численных моделей галактик впервые исследована связь параметров X-структур и параметров галактик, в которых X-структуры образуются. Получено, что нижняя граница наблюдаемых углов раствора должна определяться галактиками с большим вкладом тёмной материи в общий гравитационный потенциал ( $M_h(r < 4R_d)/M_d \approx 3$ ).
2. Впервые показано, что возникновение продолжительного изгиба бара обуславливается наличием или отсутствием дополнительной концентрации массы (классического балджа) в центральной области галактики. Определена граничная масса классического балджа  $M_b \lesssim 0.1M_d$ , при которой продолжительный изгиб бара возможен.
3. Сделан вывод о том, что каждый тип регулярных трехмерных орбит в баре формирует свою X-структуру, а параметры всей наблюдаемой X-структуры определяются тем, какое семейство орбит доминирует в рассматриваемом потенциале. При этом на примере различных типов орбит показано, что лучи X-структуры есть огибающие  $z$ -максимумов орбит, повышенная плотность в которых возникает за счет того, что звёзды проводят большую часть времени в  $z$ -максимумах орбит.
4. Построена новая фотометрическая модель для V/PS балджа с X-структурой. С ее помощью впервые проведено сравнение различных подходов к измерению X-структур и получено, что для некоторых галактик метод, основанный на аппроксимации изофот возмущенными эллипсами, может давать неверные результаты из-за вклада диска. Также показано, что значения углов раствора модельных и реальных X-структур согласуются между собой, если их измерять с помощью предложенной модели.

**Достоверность.** Надёжность полученных в диссертации результатов обусловлена использованием хорошо оттестированных и проверенных на большом количестве различных задач пакетов для построения и моделирования многокомпонентных моделей галактик. Существенное внимание в работе уделяется проверке эффектов вертикальной релаксации и подбору необходимых условий для предотвращения влияния этих эффектов на полученные результаты. Наконец, все расчеты проводились для моделей с суммарным числом частиц порядка  $10^7$ , что обеспечивает хорошее пространственное разрешение всех исследуемых особенностей вертикальной структуры.

Важными свидетельствами достоверности результатов является их соответствие мировому уровню исследований в этой области, что подтверждается публикациями результатов в престижных международных журналах — *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* и *Astrophysical Journal*.

**Апробация.** Основные результаты работы докладывались на семинаре астрономического отделения СПбГУ, на семинаре отдела небесной механики и динамической астрономии ГАО РАН, на Всероссийской конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, ПРАО АКЦ ФИАН, Пущино, 18-21 апреля, 2017, ежегодной российской конференции “Современная звёздная астрономия - 2018”, ГАИШ МГУ, Москва, 22-26 октября 2018, ежегодной российской конференции “Современная звёздная астрономия - 2019”, САО РАН 7-11 октября 2019.

**Личный вклад.** Автор принимал равноправное участие в постановке задач, обсуждении и интерпретации полученных результатов относительно вертикальной структуры баров, изложенных в настоящей работе. Автором были построены все рассматриваемые в настоящей работе численные модели галактик и выполнены расчеты их эволюции, а также написаны программы для исследования свойств бара и его вертикальной структуры. В Главе 3 автором была высказана и подтверждена гипотеза о динамическом устройстве X-структур в различных моделях и написана программа для расчета характеристик орбит в рассматриваемых моделях. В Главе 4 автором предложена рассматриваемая новая фотометрическая модель. Модель программно реализована и с ее помощью выполнена декомпозиция всех рассматриваемых в данной работе реальных и модельных галактик.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных работах, 4 из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

1. Smirnov, Anton A. and Sotnikova, Natalia Ya., What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 481, no. 3, P. 4058-4076.
2. Smirnov, Anton A. and Sotnikova, Natalia Ya., Is the late buckling stage inevitable in the bar life? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 485, no. 2, P. 1900-1905.
3. Parul, Hanna D., Smirnov, Anton A., and Sotnikova, Natalia Ya., Orbital Ingredients for Cooking X-structures in Edge-on Galaxies // *The Astrophysical Journal*. 2020. Vol. 895, no. 1, P. 12.

4. Smirnov, Anton A. and Savchenko, Sergey S., New X-shaped bulge photometric model as a tool for measuring B/PS bulges and their X-structures in photometric studies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 499, no. 1, P. 462-481.

Другие публикации автора:

1. Smirnov, Anton A., Sotnikova, Natalia Ya., and Koshkin, Alexei A., Simulations of slow bars in anisotropic disk systems // *Astronomy Letters*. 2017. Vol. 43, no. 2, P. 61-74.
2. Smirnov, Anton A., Sotnikova, Natalia Ya., Numerical studies of instability of generalized polytropic models of stellar disks // *Journal of Physics Conference Series*. 2017. Vol. 929, no. 1, P. 012009.
3. Mosenkov, Aleksandr V., Smirnov, Anton A., Sil'chenko, Olga K., Rich, R. Michael, Reshetnikov, Vladimir P., and Kormendy, John., Tilted outer and inner structures in edge-on galaxies? // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. Vol. 497, no. 2, P. 2039-2056.
4. Smirnov, Anton A., Tikhonenko, Iliya S., and Sotnikova, Natalia Ya., Face-on structure of barlenses and boxy bars: an insight from spectral dynamics // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021. Vol. 502, no. 4, P. 4689-4707.
5. Tikhonenko, Iliya S., Smirnov, Anton A., and Sotnikova, Natalia Ya., First direct identification of the barlens vertical structure in galaxy models // *Astronomy and Astrophysics*. 2021. Vol. 648, L4.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 187 страниц, включая 62 рисунка и 8 таблиц. Список литературы содержит 151 наименование.

В **Главе 1** решается вопрос о связи параметров X-структур и параметров галактик, в которых X-структуры наблюдаются. В пункте 1.1 подробно описываются имеющиеся наблюдательные данные по X-структурам, и даётся общая характеристика параметров, определяющих вертикальную эволюцию бара. В пункте 1.2 приводятся детали построения многокомпонентных равновесных трёхмерных моделей галактик (параграф 1.2.1), описывается их общая эволюция (параграф 1.2.2) и исследуются эффекты вертикальной релаксации в моделях с различным числом частиц в диске (параграф 1.2.3). В пункте 1.3 описывается методика измерения параметров X-структур (параграф 1.3.1) и эволюция углов раствора в моделях с различным числом частиц в диске (параграф 1.3.2). В пункте

1.4 рассматривается зависимость углов раствора (параграфы 1.4.1–1.4.4) и размеров (параграф 1.4.5) X-структур от параметров модельных галактик. Результаты главы обсуждаются в пункте 1.5. В параграфе 1.5.1 значения углов раствора модельных галактик сравниваются со значениями углов раствора реально наблюдаемых X-структур. В параграфе 1.5.2 полученные закономерности в изменении морфологии баров и В/PS балджа сравниваются с закономерностями, полученными в более ранних численно-экспериментальных работах. В параграфе 1.5.3 более подробно обсуждаются различные сценарии вертикальной эволюции бара в рассмотренных моделях. В пункт 1.6 вынесены основные результаты Главы.

В **Главе 2** исследуется связь центральной концентрации (классического балджа) и феномена длительной потери баром вертикальной симметрии. В пункте 2.1 обсуждаются имеющиеся наблюдательные данные и результаты предыдущих численно-экспериментальных работ по изгибающимся барам. В пункте 2.2 даётся описание использующихся в данной главе численных моделей. В пункте 2.3 проводится сравнительный анализ моделей с классическими балджами и без классических балджей. В пункте 2.4 для серии моделей с различными вкладами классических балджей определяются граничные параметры балджа, при которых вторичная потеря симметрии баром оказывается подавлена. В пункте 2.5 представлены основные результаты Главы.

**Глава 3** посвящена исследованию динамической природы X-структур в рассмотренных в Главе 1 моделях. В пункте 3.1 представлены результаты предыдущих работ по исследованию орбит, составляющих В/PS балджи и X-структуры в различных потенциалах. В пункте 3.2.1 даётся описание двух численных моделей с разной морфологией X-структур, для которых затем проводится исследование орбит, составляющих В/PS балджи и X-структуры. В пункте 3.2.2 описывается методика нахождения главных частот осцилляций частиц-“звёзд” с помощью Фурье-анализа координатных временных рядов соответствующих частиц. В пункте 3.3 на основании отношения  $f_R/f_x$  частот эпициклических осцилляций и осцилляций вдоль оси  $x$  выделяются семейства орбит, поддерживающие бары в рассматриваемых моделях. В пункте 3.4.1 описываются особенности распределений частиц бара по отношению  $f_z/f_x$  характерных частот вертикальных осцилляций и осцилляций в плоскости диска. В пункте 3.4.2 описываются особенности пространственного распределения групп орбит с различным отношением  $f_z/f_x$ . В пунктах 3.5.1 и 3.5.2 исследуются распределения орбит по интегралам Якоби и анализируются вклады орбит различных типов в вертикаль-

ную структуру бара на различных расстояниях от центра диска. В пункте 3.6.1 описываются типичные орбиты, поддерживающие В/PS балджи в рассматриваемых моделях. В пункте 3.6.2 исследуются профили плотности, создаваемые ансамблями таких орбит на большой шкале времени, и показывается, что наиболее сильные уярчения возникают в точках, соответствующих максимальному возвышению частицы-“звезды” над плоскостью диска. В пункте 3.6.3 анализируются распределения орбит в терминах “интеграл Якоби - максимальное возвышение над плоскостью диска” и показывается, что орбиты с различными отношениями  $f_z/f_x$  выстраиваются вдоль прямых сегментов на данной плоскости. В пункте 3.7.1 описывается методика выделения X-структур методом нерезкого маскирования. В пункте 3.7.2 проводится сравнительный анализ маскированных изображений для орбит с различными отношениями  $f_z/f_x$  и напрямую показывается, что каждое из выделенных по отношению  $f_z/f_x$  семейств орбит образует луч X-структуры, характеристики которого определяются выделенным семейством. В пункте 3.8 даются основные выводы Главы.

В **Главе 4** проводится рафинированный фотометрический анализ выборки из 31 реальных галактик с X-структурами и некоторых модельных галактик из Главы 1. В пункте 4.1 описываются методики выделения X-структур в работах других авторов и расхождению в результатах, полученных для одних и тех же галактиках разными методами. В пункте 4.2 вводится новая фотометрическая модель В/PS балджа с X-структурой, которая затем используется для фотометрической декомпозиции реальных и модельных галактик. В пункте 4.3 описывается методика последовательной подгонки многокомпонентной фотометрической модели с учётом новой фотометрической модели В/PS балджа. В пункте 4.4 проводится декомпозиция серии численных моделей галактики и исследуется влияние эффектов проекции, связанных с поворотом бара и плоскости диска у лучу зрения, а также влияние модели диска и дополнительной центральной компоненты (классического балджа) на результаты декомпозиции. В пункте 4.5 проводится декомпозиция реальных галактик. В пункте 4.5.1 описывается исследуемая выборка из 31 галактик, в пункте 4.5.2 представлены результаты декомпозиции для некоторых характерных примеров реальных галактик и для всей рассматриваемой выборки. В пункте 4.6 проводится сравнение полученных результатов по углам раствора для рассмотренной выборки галактик с результатами предыдущих работ и на примере галактики ESO 443-042 проводится сравнительный анализ методик оценки параметров X-структур, используемых в работах

других авторов и в данной работе. В пункте 4.7 проводится сравнение полученных параметров  $X$ -структур для реальных и модельных галактик. В пункте 4.8 отдельно приводятся результаты Главы.

В **Заключении** перечислены все основные выводы выполненного исследования особенностей вертикальной структуры баров в численных моделях дисковых галактик.

## Глава 1. X-структуры в различных моделях дисковых галактик

Данная глава подготовлена по материалам работы [65].

### 1.1 Введение

В данной главе будет рассмотрен вопрос о том, как зависят параметры наблюдаемых X-структур (угол раствора, длина лучей) от свойств системы, в которой началось образование бара. Тем самым будет определено, какими параметрами галактик, помимо эффектов проекции, может определяться диапазон значений углов раствора. Будут рассмотрены зависимости от следующих параметров: от относительного вклада тёмного гало в общий потенциал, от центральной концентрации массы (классического балджа), от начальной толщины диска и параметра Тумре [66]

$$Q(R) = \frac{\sigma_R(R)\kappa(R)}{3.36G\Sigma(R)}, \quad (1.1)$$

где  $R$  — цилиндрический радиус,  $\sigma_R(R)$  — дисперсия радиальных скоростей,  $\kappa(R)$  — частота эпициклических осцилляций звезд,  $G$  — гравитационная постоянная и  $\Sigma(R)$  — поверхностная плотность диска. Параметр Тумре определяет устойчивость диска относительно осесимметричных возмущений и является мерой его “нагретости”. На практике, этот параметр определяет характерное значение дисперсии радиальных скоростей в диске. Основные причины рассматривать зависимость свойств X-структур от указанных выше параметров следующие.

В различных численных исследованиях эволюции дисковых галактик показано, что структура звездных дисков в значительной степени определяется относительным вкладом сферической компоненты (в основном тёмного гало) в общее гравитационное поле в пределах звёздного диска. Например, в работе [67] было найдено, что в моделях с большой относительной массой гало образуется более сильный бар, чем в моделях с малой массой тёмного гало. Кроме того, в первом случае, B/PS балдж показывает более выраженную X-структуру. Заметим

также, что структура звездных дисков в вертикальном направлении в значительной степени определяется вкладом тёмного гало. В работах [68; 69] показано, что если плоская система устойчива к возмущениям в плоскости диска и изгибным возмущениям, то её минимальная толщина  $z_d$  будет определяться относительной массой тёмного гало. А в работах [70; 71] показано, что существование очень тонких дисков возможно только в том случае, если диск погружён в очень массивное тёмное гало. Наличие чрезвычайно массивной тёмной компоненты также может приводить к полностью симметричной эволюции бара (эволюция бара происходит без фазы потери вертикальной симметрии, см. [58]).

Касательно наличия или отсутствия классического балджа ситуация схожа с тёмным гало в том смысле, что многочисленные численные эксперименты показывают, что наличие балджа оказывает сильное влияние на эволюцию бара. Так, в работе [72] было показано, что наличие массивной сфероидальной компоненты в центральной области диска изменяет морфологию бара в плоскости диска и ведет к образованию так называемой барлинзы. Кроме того, наличие компактного балджа ведет к подавлению изгибных возмущений в диске [73].

Относительно параметра Тумре  $Q$  и толщины диска заметим, что оба этих параметра играют важную роль в вековой эволюции бара в вертикальной направлении. Эти параметры определяют и характерные частоты осцилляций звезд (это важно для резонансного захвата), и соотношение между дисперсиями скоростей  $\sigma_z$  и  $\sigma_R$  (это важно для динамики изгибных возмущений).

Основным инструментом для исследования зависимости свойств бара от начальных параметров системы на большой шкале времени (несколько млрд. лет) является численное моделирование, и именно оно будет использоваться для решения поставленной в данной главе задачи. Здесь следует отметить следующее. Для исследования X-структур необходимо рассматривать трёхмерные модели галактик. В вертикальном направлении эффекты так называемой численной релаксации моделей проявляют себя даже в том случае, когда звездный диск представляется достаточно большим числом частиц  $N \sim 10^5 - 10^6$ . Так, например, в работе [57], где звездный диск представлялся набором из  $N = 8 \cdot 10^5$  частиц, толщина диска увеличивалась вдвое за время моделирования. В работах [71; 74] было показано, что, такой эффект утолщения звездного диска есть прямое следствие численной релаксации используемых моделей. В связи с этим отдельный пункт этой главы будет посвящён исследованию вопроса о влиянии численной релаксации в вертикальном направлении на параметры измеряемых X-структур.

Таблица 1 — Параметры моделей

Варьируемые параметры	$M_h(r < 4R_d)$	$M_b$	$r_b$	$N_d \cdot 10^6$	$N_h \cdot 10^6$	$V_{\max}, \text{км} \cdot \text{с}^{-1}$	$z_d/R_d$	$Q$
Масса гало	1.0	—	—	4	4	194	0.05	1.2
—	1.5	—	—	4*	4.5*	211	0.05	1.2
—	2.25	—	—	4	6.75	235	0.05	1.2
—	3.0	—	—	4	9	258	0.05	1.2
Толщина диска	1.5	—	—	4	4.5	211	0.1	1.2
—	1.5	—	—	4	4.5	211	0.2	1.2
Параметр Тумре для тонкого диска	1.5	—	—	4	4.5	211	0.05	1.6
—	1.5	—	—	4	4.5	211	0.05	2.0
Параметр Тумре для толстого диска	1.5	—	—	4	4.5	211	0.1	1.6
—	1.5	—	—	4	4.5	211	0.1	2.0
Центральная концентрация	1.5	0.2	0.2	4	4.5	221	0.05	1.2
—	1.5	0.4	0.2	4	4.5	266	0.05	1.2
—	1.5	0.2	0.4	4	4.5	220	0.05	1.2

*Описание:* в первом столбце указывается варьируемый параметр. Со второго столбца и далее указываются параметры моделей по одной модели на строку. Параметры:  $M_h(R < 4R_d)$  — масса гало внутри сферы с радиусом  $R = 4R_d$ , где  $R_d$  — экспоненциальный масштаб диска в радиальном направлении,  $M_b$  — полная масса балджа, прочерк вместо значения означает модель без балджа,  $N_d$  и  $N_h$  — число частиц в диске и гало, соответственно,  $V_{\max}$  — максимальное значение круговой скорости в модели (с учетом нормировки, см. основной текст),  $z_d/R_d$  — начальное отношение вертикального масштаба диска к экспоненциальному масштабу в плоскости диска,  $Q$  — значение параметра Тумре на расстоянии  $R = 2R_d$ . Двойными горизонтальными линиями разделяются различные наборы моделей. Символом «\*» обозначается реперная модель, для которой были подготовлены численные реализации с различным числом частиц в диске и гало (см. Таблицу 2).

## 1.2 Моделирование X-структур

### 1.2.1 Численные модели

Для исследования зависимости свойств X-структуры от параметров моделируемых галактик будем рассматривать тринадцать различных трёхмерных моделей  $N$ -тел с различными физическими параметрами (см. Таблицу 1) и шесть моделей с одними и теми же значениями физических параметров, но представленными различным количеством частиц (см. Таблицу 2). Каждая из рассматриваемых моделей включала в себя звёздный диск и сферическое тёмное гало. Три модели, на примере которых исследуются эффекты, связанные с влиянием центральной концентрации, дополнительно включают классический балдж. Каждая из компонент в рассмотренных моделях определяется некоторым профилем плотности, выражения для которых приведены ниже.

В качестве дисковой компоненты рассматривается экспоненциальный диск, состоящий из изотермических слоёв в вертикальном направлении:

$$\Sigma(R, z) = \Sigma_0 \cdot \exp(-R/R_d) \cdot \operatorname{sech}^2(z/z_d), \quad (1.2)$$

где  $R_d$  — радиальный масштаб диска,  $z_d$  — вертикальный масштаб диска,  $\Sigma_0$  — центральная поверхностная плотность.

Тёмное гало задается обрезанным двухстепенным профилем плотности:

$$\rho(r) = \frac{C_h T(r/r_t)}{(r/r_s)^{\gamma_0} ((r/r_s)^\eta + 1)^{(\gamma_\infty - \gamma_0)/\eta}}, \quad (1.3)$$

где  $r_s$  — характерная длина спада плотности в гало,  $r_t$  — радиус обрезания,  $\gamma_0$ ,  $\gamma_\infty$  и  $\eta$  — параметры, характеризующие наклон профиля плотности,  $C_h$  — параметр, определяющий полную массу гало  $M_h$ ,  $T(x)$  — функция обрезания:

$$T(x) = \frac{2}{\operatorname{sech} x + 1/\operatorname{sech} x}. \quad (1.4)$$

В данной работе использовались следующие значения для параметров  $\eta$ ,  $\gamma_0$  и  $\gamma_\infty$ :  $\eta = 4/9$ ,  $\gamma_0 = 7/9$ ,  $\gamma_\infty = 24/9$ . Профиль плотности с такими параметрами оказывается похожим на профиль Наварро-Френка-Вайта [75], но с немного более крутым наклоном профиля во внутренней области.

Распределение плотности в классическом балдже задавалось в соответствии с профилем плотности Хернквиста [76]:

$$\rho_b = \frac{M_b r_b}{2\pi r (r_b + r)^3}, \quad (1.5)$$

где  $r_b$  — характерный масштаб балджа, а  $M_b$  — полная масса балджа.

Для каждой из компонент (диск, гало, балдж) подготавливалась численная реализация компоненты, то есть набор частиц с распределением плотности, соответствующим заданному. Каждая из компонент представлялась различным числом частиц:  $N_d$  в диске,  $N_h$  в гало и  $N_b$  в балдже (см. Таблицу 1 и Таблицу 2). Рассматриваются самосогласованные модели, то есть каждая из компонент имела возможность эволюционировать под действием суммарного гравитационного поля всех компонент.

В качестве системы единиц выбиралась система единиц естественная для численных расчетов, определяемая следующим образом:  $M_d = 1$ ,  $R_d = 1$  и  $G = 1$ . Если использовать значения  $R_d = 3.5$  кпк и  $M_d = 5 \cdot 10^{10} M_\odot$ , характерные для Млечного Пути, то единица времени в выбранной системе единиц  $t_u$  примерно соответствует 13.22 млн. лет. В дальнейшем, величины, измеряемые в единицах длины (1 единица длины = 3.5 кпк), будут указываться без единиц измерения, если не указано иное.

Характерный масштаб гало и радиус обрезания имели одинаковые значения для всех моделей:  $r_s = 6$ ,  $r_t = 15$ .

Начальный профиль дисперсии радиальных скоростей в диске  $\sigma_R$  выбирался в соответствии с экспоненциальным законом:

$$\sigma_R = \sigma_0 \cdot \exp(-R/2R_d), \quad (1.6)$$

где  $\sigma_0$  определяется значением параметра Тумре  $Q_T(R_\sigma) = Q$  на расстоянии  $R_\sigma = 2 R_d$ . Далее степень нагрева звёздного диска будет характеризоваться величиной  $Q$ .

В Таблице 1 даются значения определяющих параметров рассмотренных моделей. Для удобства рассмотренные модели в таблице группируются по варьируемым физическим параметрам. Всего было рассмотрено пять различных наборов моделей, каждый набор обозначается в соответствие с варьируемым физическим параметром.

В качестве количественного параметра, характеризующего вклад тёмного гало в общий потенциал, здесь и далее рассматривается отношение

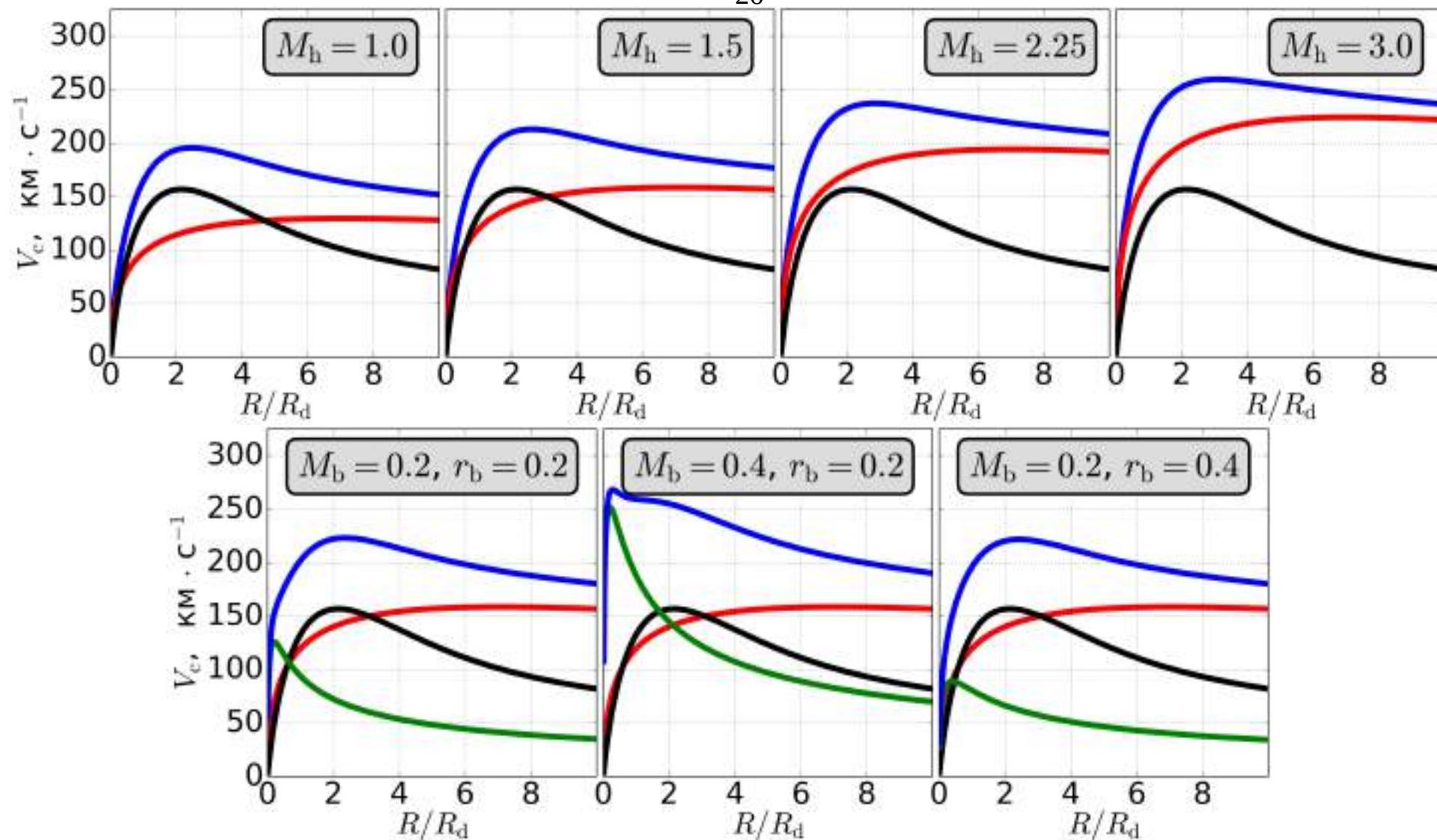


Рис. 1.1 — Кривые вращения модельных галактик с различными вкладами тёмного гало (верхний ряд) и классических балджей в модели с  $M_h = 1.5$  (нижний ряд). Синей линией показана общая кривая вращения, красной линией – вклад тёмного гало, чёрной линией – вклад диска, зелёной линией – вклад балджа.

$\mu = M_h(R < 4R_d)/M_d$ , где  $M_h(R < 4R_d)$  — масса гало в пределах сферы с радиусом  $4R_d$ . Заметим, что в выбранной системе единиц относительная величина  $\mu$  просто равна  $M_h(R < 4R_d)$ , так как масса диска  $M_d \equiv 1$ . Для краткости далее вклад гало будет обозначаться как  $M_h$  без части со скобками. Различные значения  $M_h$  можно получить, варьируя постоянную  $C_h$  в профиле плотности тёмного гало (см. выражение (1.3)). Всего было построено четыре модели с различным вкладом тёмного гало. Рассматривались следующие значения  $M_h$ : 1.0, 1.5, 2.25, 3.0 (см. Таблицу 1). Такой выбор значений мотивирован данными наблюдений. Для галактик с высокой поверхностной яркостью, где, как правило, и наблюдаются X-структуры, отношение массы гало к массе диска лежит примерно в диапазоне от 1 до 3 [77—80]. Значения из этого диапазона и рассматриваются в данной работе. Кривые вращения моделей и индивидуальные вклады различных подсистем показаны на Рис. 1.1.

Кроме моделей с различной массой тёмного гало также рассматривалась серия моделей с различной начальной толщиной звёздного диска  $z_d$ , различными параметрами классического балджа ( $M_b$  и  $r_b$ ) и различными значениями параметра Тумре  $Q$  (см. Таблицу 1). Как уже упоминалось, эти параметры играют важную роль в динамике изгибных возмущений и возмущений в плоскости звёздного диска, а значит должны определять и параметры бара, и параметры X-структуры. Рассматривался следующий диапазон параметров: для толщины диска — от  $z_d = 0.05$  (очень тонкий диск) до  $z_d = 0.2$  (толстый диск); для балджа — масса варьировалась от  $M_b = 0.0$  (модель без балджа) до  $M_b = 0.4$  (тяжелый балдж) и линейный масштаб — от  $r_b = 0.2$  до  $r_b = 0.4$ ; для параметра Тумре  $Q_0$  — от 1.2 (холодный диск) до 2.0 (сильно нагретый диск).

Прежде чем исследовать свойства X-структур в моделях с различными физическими параметрами, необходимо проанализировать, как возможная численная релаксация моделей в вертикальном направлении влияет на измеряемые параметры X-структуры. С этой целью была выбрана реперная модель с промежуточной массой тёмного гало,  $M_h = 1.5$ , тонким диском,  $z_d = 0.05$ , достаточно холодным диском,  $Q = 1.2$  и без балджа. Эта модель похожа по своим параметрам на Млечный Путь, но у неё немного более тяжелое тёмное гало ([81], стр. 113-117; [82]). Для этой модели строились численные реализации с различным числом частиц в диске и гало. Всего рассматривалось семь различных реализаций с числом частиц в диске и гало от  $N_d = 2 \cdot 10^5$ ,  $N_h = 1.2 \cdot 10^6$  до  $N_d = 8 \cdot 10^6$ ,  $N_h = 9 \cdot 10^6$ , соответственно (см. Таблицу 2).

Таблица 2 — Параметры моделей с одной и той же массой тёмного гало  $M_h = 1.5$  и различным количеством частиц в диске и гало

$N_d \cdot 10^6$	$N_h \cdot 10^6$	$m_h/m_d$	$\varepsilon_d/R_d \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_h/R_d \cdot 10^{-2}$
0.2	1.2	1.14	1.0	2.0
1	4.5	1.8	0.5	1.2
1	9	0.9	0.5	1.0
2	9	1.8	0.47	1.02
4	4.5	7.3	0.37	1.29
8	9	7.3	0.29	1.02

*Описание:* в первом столбце указывается варьируемый параметр. Со второго столбца и далее указываются параметры моделей по одной модели на строку. Параметры:  $N_d$  и  $N_h$  — число частиц в диске и гало, соответственно,  $m_h/m_d$  — отношение массы одной частицы гало к массе одной частицы диска,  $\varepsilon_d$  и  $\varepsilon_h$  — длины сглаживания для диска и гало.

В пункте 1.3 будет показано, что, начиная с  $10^6$  частиц в диске и  $4.5 \cdot 10^6$  в гало, измеряемые параметры X-структуры перестают зависеть от количества частиц. При исследовании зависимости свойств X-структур от физических параметров для надёжности выбиралось ещё большее количество частиц для представления диска и гало,  $4 \cdot 10^6$  и  $4.5 \cdot 10^6$ , соответственно. Для тёмных гало с большой массой,  $M_h > 1.5$ , количество частиц  $N_h$  подбиралось таким образом, чтобы масса отдельных частиц гало оставалась одной и той же в различных моделях. В модели с лёгким гало ( $M_h = 1.0$ ) было использовано  $4 \cdot 10^6$  частиц. Для балджа (если он включается в модель) количество частиц подбиралось таким образом, чтобы отдельные частицы диска и балджа имели одинаковую массу.

Начальное равновесное состояния модели подготавливалось с помощью специального программного пакета для построения равновесных многокомпонентных моделей галактик `mkgalaxy` [83], являющегося частью свободно распространяемого программного обеспечения для численного моделирования галактик NEMO [84]. Сам пакет `mkgalaxy` работает по следующей схеме. На первом этапе создаются численные реализации сферических компонент (гало и балджа). Генерация начальных распределений при этом происходит с учетом сферически осреднённой (монопольной) составляющей потенциала диска. На втором этапе происходит постепенная подстройка сферических компонент под полный потенциал диска. Это достигается за счет запуска эволюции системы

“гало+балдж” во внешнем потенциале, постепенно изменяющемся от грубого сферически осреднённого потенциала диска до реального потенциала диска. На третьем (заключительном) этапе подготавливается численная реализация дисковой компоненты. На этом этапе учитывается ранее полученный совокупный потенциал гало и балджа. При этом рассматривается потенциал не численных моделей компонент, а его сглаженная и азимутально усредненная версия, получаемая с помощью разложения потенциала обеих компонент в ряд по сферическим функциям [85—87]. Отметим, что при построении модели предполагается, что обе сферические компоненты (гало и балдж) имеют изотропное распределение по скоростям. Это предположение имеет то преимущество, что функция фазовой плотности (distribution function) является точной [88]. Для диска используется ФР для динамически теплых и тонких звездных дисков, зависящая от трех интегралов движений. Использование такой функции распределения позволяет воспроизвести заранее заданные профили поверхностной плотности и дисперсии скоростей [89].

Длина сглаживания гравитационного потенциала  $\varepsilon$  задавалась различным образом для каждой из подсистем и масштабировалась в соответствии с числом частиц в диске и гало:

$$\varepsilon_{d;h} = \varepsilon_{0,d;h} \cdot \left( \frac{N_{0,d;h}}{N_{d;h}} \right)^{1/3}, \quad (1.7)$$

где  $\varepsilon_{0,d} = 0.01$  при  $N_{d,0} = 2 \cdot 10^5$  в диске и  $\varepsilon_{0,h} = 0.02$  при  $N_{0,h} = 1.2 \cdot 10^6$  в гало. Для частиц балджа длина сглаживания совпадала с длиной сглаживания диска.

Уравнения движения для построенных моделей решались по алгоритму leapfrog [81] с помощью самого быстрого кода для решения задачи  $N$ -тел на одном процессоре — `gyrfalcON` [90]. Гравитационные силы в этом коде вычисляются по так называемому treecode-алгоритму. При этом близкие взаимодействия вычисляются напрямую по закону Ньютона (взаимодействие “частица-частица”). Дальние же взаимодействия не вычисляются напрямую, а аппроксимируются (взаимодействие “ячейка-частица”). Управляющим параметром, определяющим, какие взаимодействия следует аппроксимировать, а какие — нет, является максимально допустимый угловой размер ячейки пространства  $\theta$ , который имеет ячейка, если смотреть на неё из точки, для которой вычисляется гравитационная сила. В данной работе используется  $\theta = 0.6$ , что дает удовлетворительное соотношение между временем интегрирования и точностью интегрирования для

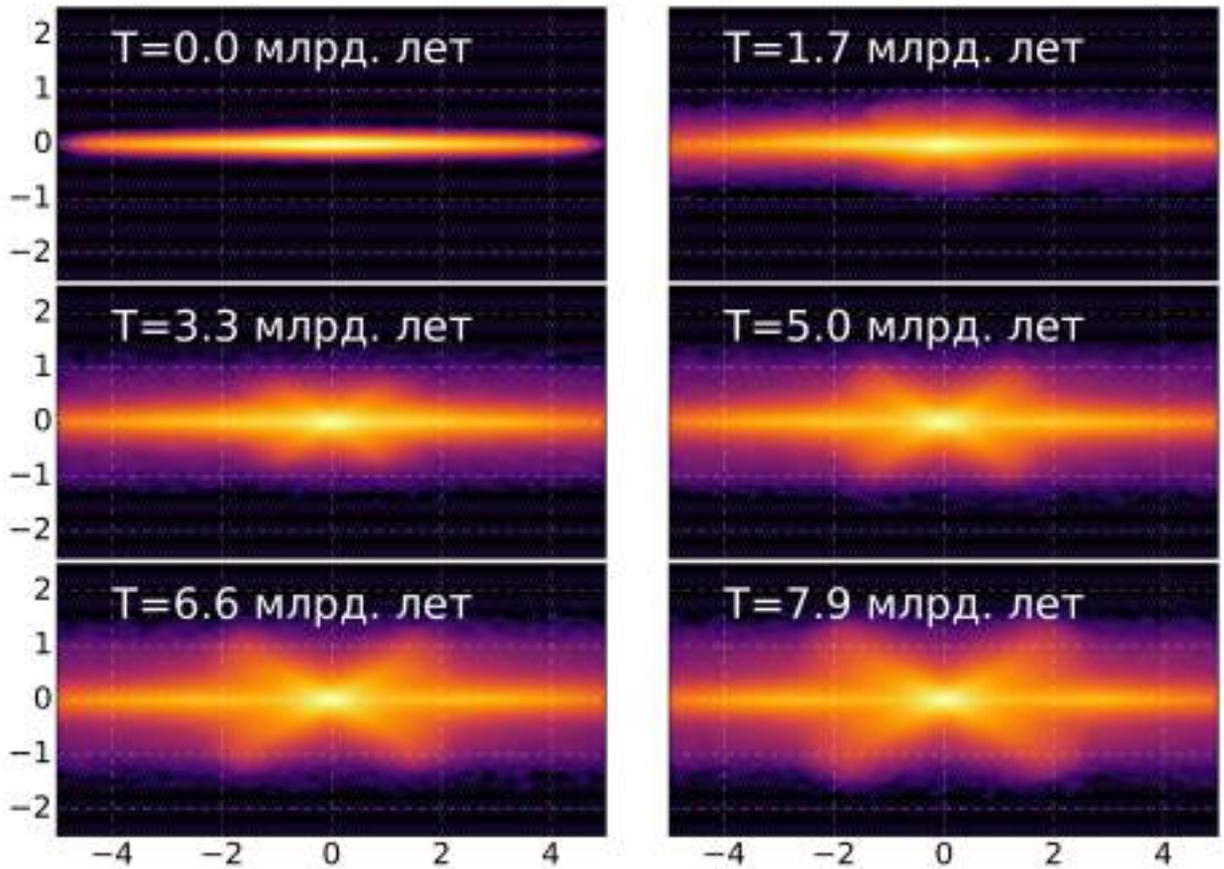


Рис. 1.2 — Эволюция во времени модели с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  и наилучшим рассмотренным пространственным разрешением,  $N_d = 8 \cdot 10^6$ ,  $N_h = 9 \cdot 10^6$ . Показана проекция в плоскости  $(xz)$ , большая ось бара развёрнута под углом  $90^\circ$  к лучу зрения, отсчеты по осям указаны в единицах длины численной модели.

моделей, включающих плоские компоненты [90]. Шаг по времени при интегрировании уравнений выбирался адаптивным образом в соответствии со средними значениями ускорения и гравитационного потенциала. Максимальное его значение  $dt_{\max} = 1.6$  млн. лет ( $2^{-3}$  ед. времени), минимальное —  $dt_{\min} = 0.2$  млн. лет ( $2^{-6}$  ед. времени).

### 1.2.2 Общее описание эволюции моделей

Все рассмотренные модели с различными физическими параметрами из Таблицы 1 неустойчивы относительно образования бара. При этом во всех моделях происходит постепенный рост бара в вертикальном направлении (Рис. 1.2). В эволюции каждой из рассмотренных моделей условно можно выделить три этапа в зависимости от состояния бара:

### 1. Перед формированием бара.

На этом этапе в системе образуется множество короткоживущих спиральных волн плотности. Как правило, может наблюдаться четыре-пять и более спиральных волн с различными характерными размерами. Спустя некоторое время, зависящее от параметров модели, эти спиральные волны плотности постепенно развеиваются, и в центре системы образуется быстро вращающийся бар. Характерное время всей фазы есть время образования бара. Его можно грубо оценить как время установления амплитуды второй азимутальной Фурье-гармоники  $A_2$ :

$$A_2 = \int \rho(R, \varphi, z) \exp \{2i\varphi\} R dR d\varphi dz. \quad (1.8)$$

Для холодных дисков это время составляет примерно 1 млрд. лет, а для горячих дисков — 2 млрд. лет (см. Рис. 1.3).

### 2. Сформированный бар растет и замедляется.

Сформированный на первом этапе бар не является стационарной структурой, а эволюционирует. Дальнейшую эволюцию бара можно проследить, исследуя, как меняется скорость узора бара и его линейные размеры.

Скорость узора бара можно рассчитать как производную по времени от позиционного угла большой оси бара, деленную на азимутальное волновое число бара  $m = 2$ :  $\Omega_b = d\psi / (2 \cdot dt)$ . При этом позиционный угол рассчитывается как фаза второй Фурье-гармоники плотности:  $\psi = \arctan (\Im(A_2) / \Re(A_2))$ .

Длину большой оси бара можно измерить, вычисляя эллиптичность изофот. Большой оси бара будет соответствовать расстояние, на котором эллиптичность изофот резко падает до нуля (см. Рис. 1.4). Для определения этого расстояния достаточно рассчитать распределения плотности вдоль большой и малой осей бара. Одному и тому же значению плотности будут соответствовать разные расстояния вдоль большой оси и вдоль малой оси. Отношение этих двух расстояний будет равно отношению осей изофот.

Из Рис. 1.3 видно, что сформированный бар быстро замедляется, при этом увеличиваясь в размерах. Такое поведение бара согласуется с результатами предыдущих работ [91—94]. На конечных этапах моделирования типичная скорость узора составляет  $15 - 30 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ , а большая полуось бара примерно в два-три раза больше начального экспоненциального масштаба диска.

### 3. Бар утолщается в вертикальном направлении.

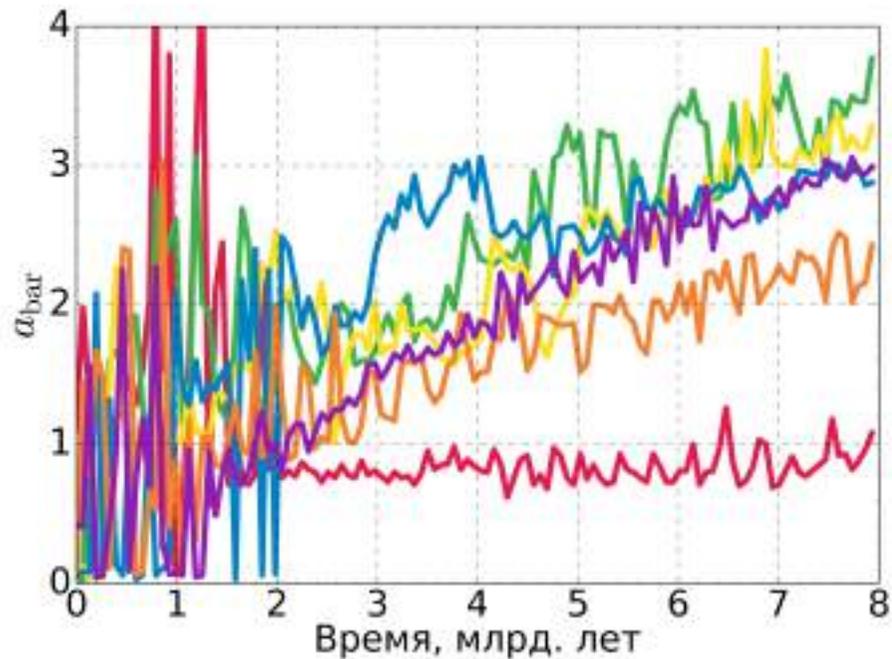
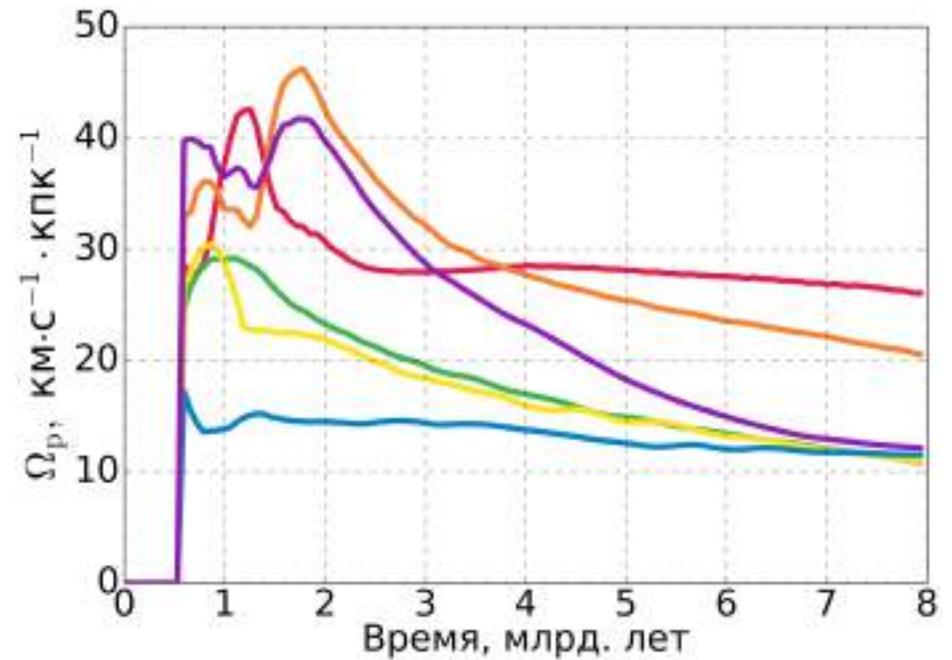
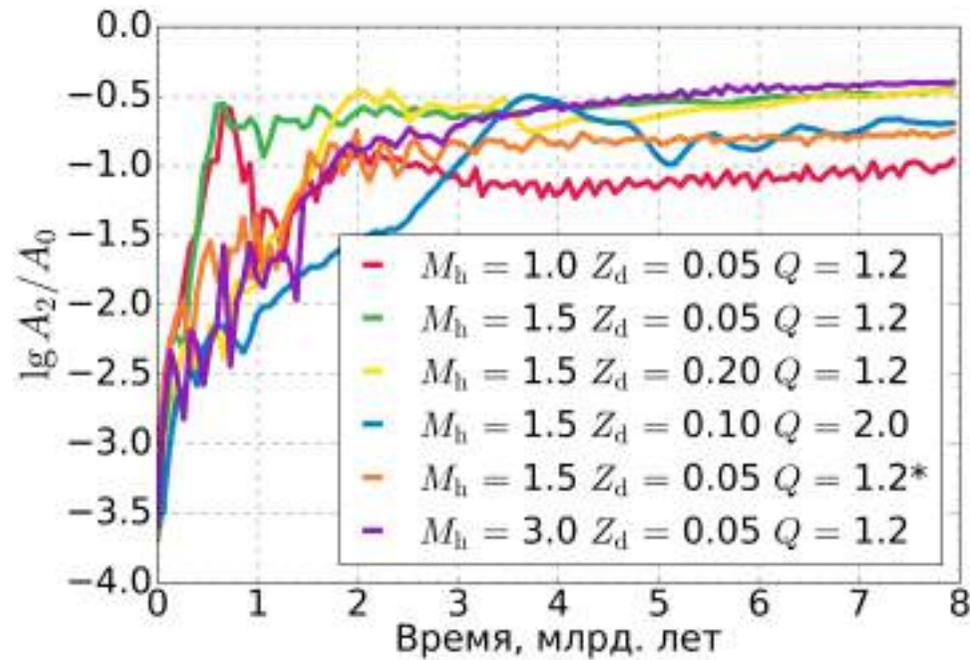


Рис. 1.3 — Логарифм амплитуды (слева сверху), скорость узора (справа сверху) и длина большой полуоси (слева внизу) бара для моделей с граничными значениями параметров из Таблицы 1 и реперной модели без балджа с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$ . Цветовые обозначения на всех панелях одинаковые и следуют обозначениям на рисунке с эволюцией амплитуды бара. Оранжевым цветом обозначается модель, в которой есть классический балдж с  $M_b = 0.4$  и  $r_b = 0.2$ .

По мере того как бар растёт в плоскости диска, он также утолщается в вертикальном направлении. В моделях с относительно лёгкими гало ( $M_h = 1.0$  и  $M_h = 1.5$ ) это происходит практически сразу же после образования бара. В моделях же с тяжёлыми гало ( $M_h = 2.25$  и  $M_h = 3.0$ ) бар сохраняет свою плоскую морфологию в течение примерно 1 млрд. лет и только после этого начинает утолщаться.

Изображения реперной модели с  $M_h = 1.5$ ,  $z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  для различных моментов времени приведены на Рис. 1.2. На этих изображениях модель галактики показана в положении “с ребра”. При этом большая ось бара выстроена поперек луча зрения на все моменты времени. Даже без использования процедуры нерезкого маскирования на таких изображениях хорошо заметы арахисоподобный балдж, связанный с баром, и его подсистема — X-структуры. Для всех рассмотренных моделей характерна ситуация, показанная для реперной модели на Рис. 1.2: во всех моделях постепенно образуются четкие, резко выделяющиеся X-структуры. При этом, как правило, на начальной стадии формирования X-структуры имеют короткие лучи и большой угол раствора. В ходе же эволюции бара лучи увеличиваются в длину, и их угол раствора уменьшается.

Ещё одной интересной особенностью рассмотренных моделей является то, что бары практически во всех моделях проходят через стадию потери вертикальной симметрии уже после образования X-структур. Это заметно по самим X-структурам, которые становятся асимметричными. Визуально, у таких асимметричных X-структур одни лучи значительно длиннее других (Рис. 1.13, 1.15 и 1.16). Более того, в некоторых моделях в ходе нарушения вертикальной симметрии могут образовываться двойные X-структуры (см. Рис. 1.15). В этом случае из плоскости диска начинают выходить четыре асимметричных вторичных луча, не совпадающие с лучами первичной X-структуры. Со временем вторичные лучи становятся симметричными. При этом в отличие от лучей первичной X-структуры визуально вторичные лучи выходят не из центра диска.

Описанные крупномасштабные процессы потери вертикальной симметрии явно изменяют морфологию и параметры X-структур. Подробно эти процессы будут проанализированы в пункте 1.5.3.

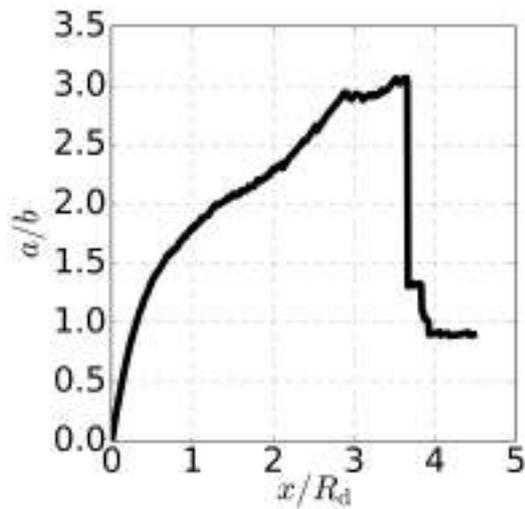


Рис. 1.4 — Типичная зависимость отношения длин осей изофот от расстояния до центра, измеренного вдоль большой оси бара, на момент времени  $t = 570$  единиц времени (7.5 млрд. лет). Расстояние, на котором это отношение резко падает к единице, соответствует половине длины большой оси бара.

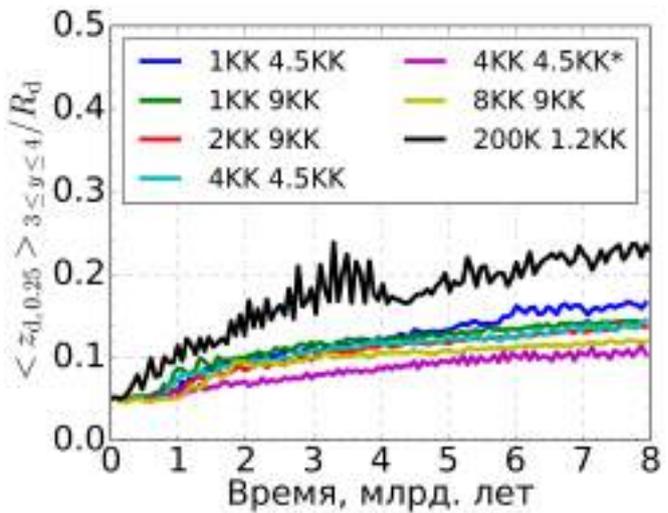
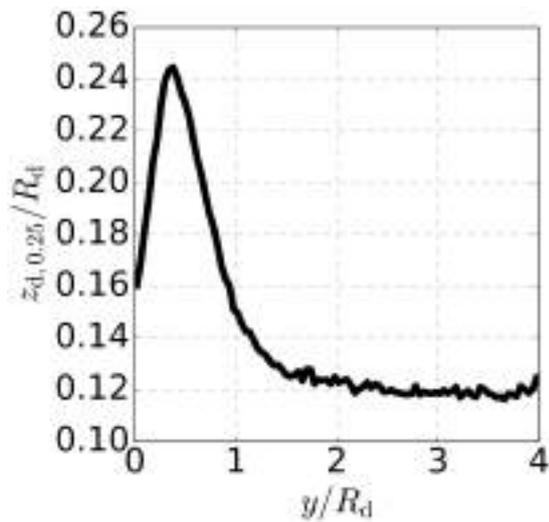


Рис. 1.5 — Толщина диска. Слева: Типичная зависимость вертикального масштаба диска  $z_{d,0.25}$  от расстояния до центра диска  $y$ , измеренного вдоль малой оси бара, для модели с  $M_h = 1.5$  в момент времени  $t = 570$  единиц времени (7.5 млрд. лет). Справа: эволюция вертикального масштаба диска  $z_{d,0.25}$ , усредненного на промежутке  $3 \leq y \leq 4$ , в модели с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  с различным количеством частиц в диске и гало. Символом “\*” обозначается модель с балджем с  $M_b = 0.2$ ,  $r_b = 0.2$

### 1.2.3 Эволюция толщины звёздного диска

При численном моделировании тонких дисков существует проблема, связанная с численной релаксацией моделируемых галактик в вертикальном направлении. Релаксацию в плоскости диска можно подавить, используя сравнительно небольшое число частиц  $N > 10^5$ . Релаксация же в вертикальном направлении проявляется даже при существенно большем числе частиц. Численные исследования вертикальной структуры дисков в работах [71; 74] показали, что релаксацию в вертикальном направлении нельзя подавить, даже используя  $N = 10^6$  частиц.

Проявлениями такой релаксации являются утолщение моделируемого звёздного диска и увеличение отношения дисперсии вертикальных скоростей к дисперсии радиальных скоростей [71; 74].

Из сказанного выше можно заключить, что такой параметр, как число частиц, которым представляются компоненты рассматриваемой системы, также влияет на эволюцию моделей в вертикальном направлении. Поэтому прежде чем переходить к исследованию физических зависимостей, необходимо исследовать, как выбор количества частиц влияет на эволюцию параметров X-структуры. Это важно по двум причинам. Во-первых, можно ожидать, что при достаточно большом количестве используемых частиц численная релаксация моделей в вертикальном направлении все же будет подавлена. При этом после достижения такого порога по числу частиц дальнейшее увеличение числа частиц не должно вести к каким-либо изменениям параметров X-структур. И в этом случае свойства X-структур определяются только физическими параметрами моделей. Параметры таких модельных X-структур можно правомерно сравнивать с данными наблюдений. Во-вторых, для дальнейших численно-экспериментальных исследований важно определить, сколько частиц должно быть в диске и гало для аккуратного моделирования X-структур.

Влияние релаксации в вертикальном направлении можно оценить, исследуя, как меняется толщина звёздного диска со временем [71; 74]. Толщину диска можно оценить следующим образом. Повернём модельную галактику таким образом, чтобы большая ось бара была выстроена вдоль оси  $x$  (малая ось при этом оказывается выстроена вдоль оси  $y$ ). Затем вычислим распределение плотности частиц в проекции  $(yz)$ . Такая проекция выбирается, так как в направлении  $y$  (вдоль малой оси бара) вертикальная составляющая бара имеет наименьшую протяженность и в меньшей степени “загрязняет” искомый профиль плотности звёздного диска. Сам профиль плотности рассчитывается на сетке  $(y_i, z_j)$ :

$$y_i = y_{\min} + \Delta y \cdot i, \quad z_j = z_{\min} + \Delta z \cdot j, \quad (1.9)$$

где  $\Delta y = \Delta z = 0.02$ ,  $y_{\min} = -4$ ,  $z_{\min} = -0.25$ ,  $y_{\max} = 4$ ,  $z_{\max} = 0.25$ ,  $0 \leq i \leq (y_{\max} - y_{\min})/\Delta y$ ,  $0 \leq j \leq (z_{\max} - z_{\min})/\Delta z$ . Параметры сетки подбирались таким образом, чтобы в моделях с плохим пространственным разрешением в крайних ячейках оказывалось достаточное число частиц (как минимум, несколько десятков) для оценки плотности.

Полученные значения плотности усреднялись по четырем квадрантам. Далее, для каждого значения  $y$  зависимость “плотность—высота над плоскостью диска” аппроксимировалась следующим образом:

$$\rho_{yz}(y, z, t) = \rho_{0,yz}(y, t) \cdot \operatorname{sech}^2(z/z_{d,0.25}). \quad (1.10)$$

Значение характерного масштаба спада плотности  $z_{d,0.25}$  при этом определялось методом наименьших квадратов. Полученные значения  $z_{d,0.25}$  усреднялись на отрезке  $3 \leq y \leq 4$ , где толщина диска почти постоянна (см. Рис. 1.5, слева).

Как видно из Рис. 1.5 (справа), эволюция толщины диска в значительной степени определяется количеством частиц в модели. При  $N_d = 2 \cdot 10^5$  толщина диска увеличивается в пять раз, а при  $N = 8 \cdot 10^6$  — только вдвое. Как правило, большему количеству частиц в диске соответствует более медленное изменение толщины диска. Исключением из этого правила является модель с балджем и  $N_d = 4 \cdot 10^6$ . Эта модель демонстрирует наименьшую скорость роста толщины диска при том, что число частиц в диске в этой модели меньше, чем в модели, у которой балдж отсутствует, но число частиц в диске существенно больше ( $N_d = 8 \cdot 10^6$ ). Такое поведение согласуется с результатами работы [73], где было показано, что балдж оказывает стабилизирующее влияние на толщину звёздного диска.

Рис. 1.5 (справа) наглядно показывает, что выбор числа частиц существенно влияет на вертикальную эволюцию дисковой составляющей рассматриваемых моделей. В связи с этим разумно предполагать, что релаксация также может влиять и на свойства X-структур. Следующий пункт посвящен детальному исследованию этой проблемы.

## 1.3 Анализ X-структур

### 1.3.1 Измерение параметров X-структур

Для оценки параметров X-структур, воспользуемся методикой, схожей с той, что использовалась в работе [49] при исследовании X-структур реально наблюдаемых галактик. Основное отличие используемой в данной работе методики

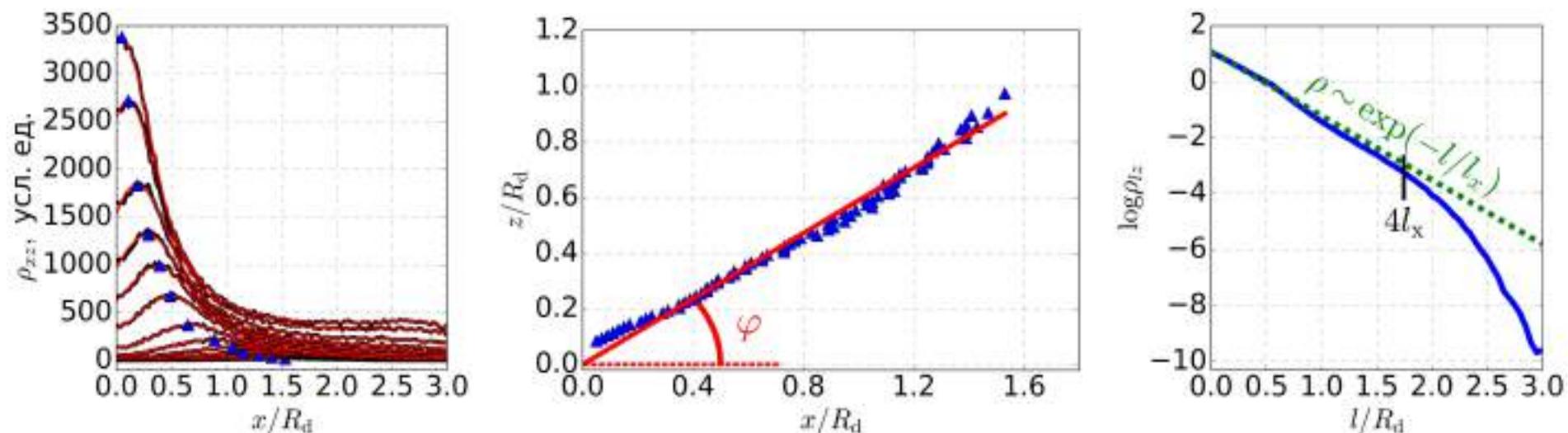


Рис. 1.6 — Пример измерения параметров X-структуры в модели с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  на момент времени  $t = 570$  единиц времени (7.5 млрд. лет). Слева: Распределение плотности  $\rho_{xz}$  (черные линии) для случая, когда ось  $x$  выстроена вдоль большой оси бара. Различным линиям соответствует различные значения  $z$ . Красными линиями обозначаются сглаженные профили плотности (подробности см. в тексте), треугольниками отмечены положения их максимумов. По этим максимумам определяется положение луча X-структуры. В центре: распределение максимумов плотности на плоскости  $(xz)$  (треугольники) и наилучшая линейная аппроксимация (красная линия). Арктангенс углового коэффициента полученной зависимости  $\phi$  соответствует углу раствора X-структуры. Справа: Распределение логарифма плотности вдоль луча X-структуры  $\rho_{lz}$  (синяя линия) и наилучшая аппроксимация экспоненциальной функцией (пунктиром). Чертой отмечено расстояние, соответствующее четырем экспоненциальным масштабам. Величина этого расстояния принимается за длину луча X-структуры (подробности см. в тексте).

от использованной в [49] состоит в том, что в работе [49] проводилась так называемая процедура фотометрической декомпозиции галактик для более четкого выделения X-структур на фоне звёздного диска. Для изображений же модельных галактик применять эту процедуру нет необходимости, так как при достаточно хорошем пространственном разрешении, имеющемся в рассматриваемых в моделях, X-структуры четко выделяются на фоне звёздного диска. Такое упрощение процедуры измерения параметров X-структур для модельных галактик позволяет детально проанализировать эволюцию X-структур на большой шкале времени в различных моделях. В данной работе параметры X-структур измерялись каждые 5 временных единиц ( $\approx 66$  млн. лет.).

Угол раствора X-структур на каждый момент времени рассчитывался следующим образом. На первом этапе рассчитывалось распределение поверхностной плотности дисковой компоненты в проекции  $(xz)$  в случае, когда большая ось бара выстроена вдоль оси  $x$ . Расчеты велись на сетке, определённой ранее в выражении (1.9), но с  $x_{\min} = -3$ ,  $x_{\max} = 3$  (вместо  $y_{\min}$  и  $y_{\max}$ , соответственно) и  $z_{\min} = -1$ ,  $z_{\max} = 1$ . Затем значения поверхностной плотности усреднялись по четырём квадрантам. Далее рассматривался набор слоев, параллельных плоскости диска и характеризуемых высотой  $z_i$ . Затем предполагалось, что абсциссе луча X-структуры  $x_i$  на высоте  $z_i$  над плоскостью диска соответствует абсцисса пика плотности в слое с высотой  $z_i$ . В силу дискретности сетки плотность  $\rho_{xz}$  демонстрирует небольшие скачки значений вблизи пика, что препятствует точному определению его положения. Точность определения пика можно улучшить, если рассчитанную кривую сгладить. Для этого рассчитанные распределения поверхностной плотности сглаживались при помощи фильтра Савицкого-Голея [95]. Именно для таких сглаженных кривых находились положения пиков плотности  $(x_i, z_i)$  (см. Рис. 1.6, слева).

Заметим, что, в принципе, при определении положений пиков плотности можно рассматривать набор плоскопараллельных слоёв, наклоненных к плоскости диска. Однако дополнительно проведенный анализ показал, что в этом случае пики плотности не удастся отождествить в слоях, близких к плоскости диска. Этот эффект тем сильнее, чем более круто наклонённые слои рассматриваются. В предельном случае, когда слои параллельны плоскости, перпендикулярной плоскости диска, во всех слоях наблюдается только один пик на  $z_i = 0$ , связанный с диском. Вторичные маленькие пики вне плоскости диска, связанные с X-структурой, ста-

новятся нечеткими, и их трудно выделить на фоне большого центрального пика на  $z_i = 0$ .

На Рис. 1.6 (в центре) показано типичное распределение пиков плотности на плоскости  $(xz)$  и наилучшая линейная аппроксимация

$$z = \operatorname{tg} \varphi \cdot x. \quad (1.11)$$

распределения их положений в модели с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$  и  $Q = 1.2$  в момент времени  $t = 570$  временных единиц (7.5 млрд. лет). В (1.11)  $\varphi$  есть искомый угол раствора X-структур. Стандартное отклонение  $\Delta\varphi = \arctan \sqrt{\sum_i (z_i - \operatorname{tg} \varphi \cdot x_i)^2 / K}$ , где  $K$  — количество определённых пиков плотности, можно рассматривать в качестве погрешности измерения угла раствора. Как правило, эта ошибка составляет около  $1^\circ - 2^\circ$ , но может быть значительно больше в моделях с низким пространственным разрешением (см. Рис. 1.7, справа). Заметим, что для реальных галактик некоторые части X-структур могут не разрешаться из-за влияния пыли или низкого отношения сигнал-шум. Малая величина характерного разброса  $\Delta\varphi$  говорит о том, что угол раствора X-структур в этих случаях всё равно может быть надёжно определен с использованием только части луча.

При использовании линейной аппроксимации вида (1.11), предполагается, что лучи X-структуры выходят из центра диска. Для реально наблюдаемых галактик такое предположение, возможно, слишком строгое. В работе [96], где X-структуры исследовались на изображениях галактик, полученных методом нерезкого маскирования, было показано, что X-структуры можно разделить на две группы: центрированные, для которых лучи исходят из центра диска, и не центрированные, в которых основания лучей немного смещены относительно центра. Визуальный анализ модельных X-структур в данной работе не выявил X-структур со смещением лучей относительно центра диска. По-видимому, различия в морфологии выделяемых X-структур также могут быть обусловлены не физическими причинами, а особенностями методики, с помощью которой X-структуры выделяются.

В случае реальных галактик длина лучей X-структуры может быть определена как расстояние от центра до некоторой изофоты с заданной звездной величиной, измеренное вдоль луча X-структуры. Конкретное значение звездной величины соответствующей изофоты может определяться интенсивностью фона или другими характеристиками изображения реальной галактики [49]. В случае

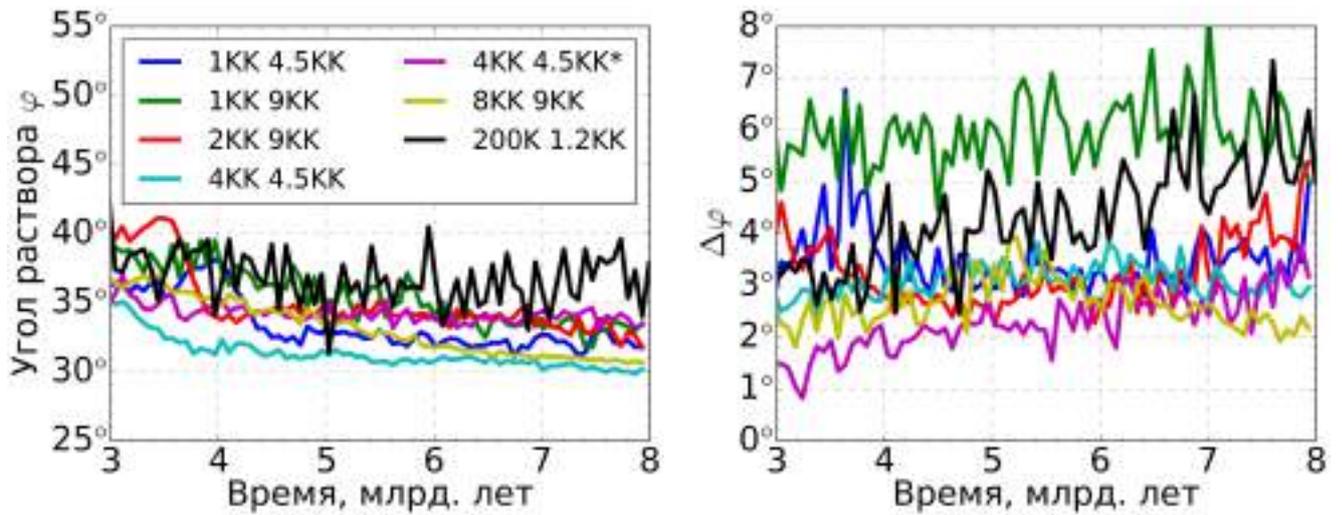


Рис. 1.7 — Эволюция угла раствора X-структур (слева) и ошибки его измерения (справа) в моделях с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  и различным количеством частиц в диске и гало.

модельных галактик таких характерных значений не существует. Поэтому длину лучей следует определять по-другому. На Рис. 1.6 (справа) показано распределение логарифма плотности вдоль луча X-структуры. Видно, что это распределение хорошо следует экспоненциальному закону примерно до 1.5 единиц длины. Это позволяет определить длину луча X-структуры как  $L = 4R_X$ , где  $R_X$  — экспоненциальный масштаб спада плотности вдоль луча X-структуры.

### 1.3.2 Эволюция угла раствора в моделях с различным числом частиц

Оценим, какое влияние на угол раствора X-структур оказывает выбор начального числа частиц в диске и гало. Для этого рассмотрим, какие различия в углах раствора возникают в моделях одинаковых в смысле физических параметров, но представленных различным числом частиц. Эволюция угла раствора в моделях с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 1.2$  и различным числом частиц показана на Рис. 1.7 (справа). Прежде всего, отметим, что поведение всех кривых (кроме модели с  $N_d = 2 \cdot 10^5$ ) в целом одинаково. На ранних стадиях эволюции X-структуры имеют относительно большой угол раствора ( $35^\circ - 40^\circ$ ). Со временем угол раствора постепенно уменьшается. На момент времени  $t = 8$  млрд. лет значение угла раствора составляет  $30^\circ - 32^\circ$ . Модель с наименьшим числом частиц в диске,  $N_d = 2 \cdot 10^5$ , является исключением. В этой модели угол раствора меняется скачкообразно. Это связано с тем, количество частиц в этой модели невелико,

и количество слоёв по  $z$ , на которых удастся выделить четкие пики плотности, меньше, чем в других моделях. Вследствие этого погрешность измерения угла раствора X-структуры в этой модели весьма велика. В некоторые моменты она достигает  $7^\circ$  (Рис. 1.7, *справа*). Для моделей же с  $N_d \geq 2 \cdot 10^6$  измеренные значения угла раствора на конечный момент времени совпадают в пределах погрешности измерения, примерно равной  $2^\circ$ . Из Рис. 1.7 (*слева*) можно заключить, что для исследования вековой эволюции X-структур в моделях с различным физическим параметрам нужно рассматривать диски, представленные как минимум несколькими миллионами частиц. В дальнейшем при исследовании зависимости углов раствора от физических параметров будут использоваться модели с  $N_d = 4 \cdot 10^6$  в диске и  $N_d = 4.5 \cdot 10^6$  в гало. Как видно из Рис. 1.7 (*слева*), в модели с таким числом частиц зависимость угла раствора от времени весьма гладкая, без резких скачков. Это позволяет аккуратно сравнивать эволюцию углов раствора в различных физических моделях.

#### 1.4 Зависимость свойств X-структур от физических параметров модели

Все бары, формирующиеся в моделях с различными физическими параметрами из Таблицы 1, в ходе своей вертикальной эволюции образуют четко заметные X-структуры. При этом и морфология баров в плоскости, и морфология X-структур, видимых с ребра, значительно разнится от модели к модели. Кроме того, вертикальная эволюция баров в различных моделях происходит весьма различным образом. Так, в некоторых моделях наблюдается длительная фаза потери вертикальной симметрии баром. Наиболее явно эта фаза заметна по лучам X-структуры: они становятся сильно асимметричными относительно плоскости диска. После потери вертикальной симметрии баром возможно два дальнейших сценария вертикальной эволюции бара. Во-первых, если вертикальные возмущения не очень сильные, то примерно через 1-2 млрд. лет вся система возвращается в симметричное невозмущенное состояние, после чего происходит сравнительно медленный рост бара и X-структуры. В горячих же или изначально толстых моделях (с  $Z_d = 0.1; 0.2$  или  $Q = 1.6; 2.0$ ) вертикальные возмущения настолько сильны, что из плоскости диска начинают выходить дополнительные яркие лучи (Рис. 1.13 и Рис. 1.15). Визуально такие лучи более яркие, чем лучи первичных X-

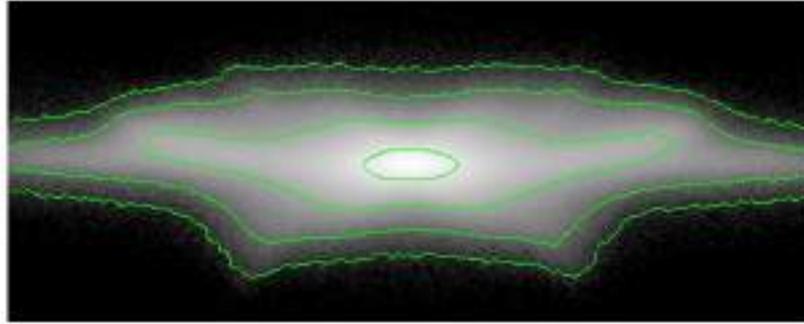


Рис. 1.8 — Возникновения вторичных лучей при потере баром вертикальной симметрии в модели с  $M_h = 1.5$ ,  $Z_d = 0.05$ ,  $Q = 2.0$ . Показан момент времени  $t = 525$  временных единиц (7.6 млрд. лет).

структур. В этих моделях фаза потери баром вертикальной симметрии длится не менее 4 млрд. лет. Здесь дается ограничение снизу, так как модели остаются асимметричными вплоть до последнего рассчитанного момента времени (см. Рис. 1.13 и Рис. 1.15). За характерное время около 1 млрд. лет дополнительные лучи образуют вторичную X-структуру, лучи которой визуальнее более яркие и более толстые, чем лучи первично сформировавшейся X-структуры. Вторичные лучи особенно хорошо заметны на изображениях модельных галактик, представленных в оттенках серого, на которых нанесены изолинии плотности (см. Рис. 1.8).

В данной работе вторичные X-структуры исключаются из анализа, то есть будут исследоваться свойства только первичных X-структур. Дело в том, что на распределениях пиков плотности вторичные X-структуры заметны только в областях, наиболее удаленных от центра диска. Причём “сигнал” на распределении пиков плотности в этих областях может меняться скачкообразно, то есть в некотором слое по  $z$  абсолютный пик плотности может приходиться на вторичную X-структуру, в последующем слое — на первичную, а затем опять — на вторичную. Такое поведение препятствует аккуратному выделению как первичных, так и вторичных X-структур. В наблюдательных же данных вторичные лучи, как правило, не выделяются. Поэтому в данной работе детально будут исследоваться только первичные X-структуры.

На практике было найдено, что вторичные X-структуры “загрязняют” распределение максимумов плотности только для расстояний, выше некоторого определенного значения ( $R > 1.0R_d$ ). Поэтому для исключения их влияния достаточно просто ограничить границы сетки, на которой рассчитывается распределение плотности, что и было сделано.

Заметим ещё одну интересную особенность вертикальной структуры баров в горячих моделях с изначально толстыми дисками. В модели с  $Q = 1.6$  и  $Z_d = 0.1$  визуально наблюдается X-структура с лучами, исходящими как бы не из центра звёздного диска (Рис. 1.16). Однако детальный анализ распределения пиков плотности показывает, что лучи все же выходят из центра диска, а визуальный эффект смещения создается за счет того, что в центральной области прямая распределения пиков плотности имеет меньший угол наклона, чем в более далёких областях.

Для измерения углов раствора во всех рассмотренных моделях использовалась процедура определения углов раствора, описанная в пункте 1.3. Каждый набор моделей был рассмотрен отдельно в соответствии с варьируемым физическим параметром.

Важной характеристикой моделей, которую необходимо рассматривать вместе с эволюцией углов раствора, является степень асимметрии бара в вертикальном направлении. Ниже будет показано, что изменения в этой характеристике напрямую коррелируют с изменением углов раствора. Степени выраженности вертикальной асимметрии можно оценить следующим образом. Рассмотрим величину  $S_{\text{bar}} = (A_2(z > 0) - A_2(z < 0))/A_2$ , где  $A_2(z > 0)$  — амплитуда бара над плоскостью диска ( $z > 0$ ), а  $A_2(z < 0)$  — это амплитуда бара ниже плоскости диска ( $z < 0$ ). Значение этого параметра показывает, насколько сильно амплитуда бара различается над и под плоскостью диска.

Сделаем ещё одно важно замечание касательно измерения углов раствора X-структур в каждой из рассмотренных моделей. Процедура измерения углов раствора, описанная в пункте 1.3, имеет физический смысл только тогда, когда удаётся отождествить пики плотности, расположенные вдоль некоторой прямой линии, как показано на Рис. 1.6 (центральная панель). Пока X-структуры ещё не сформированы, максимумы плотности распределены не вдоль прямой линии, а хаотично. Это связано с тем, что на начальном этапе утолщения бара различные возмущения, и в том числе изгибные возмущения, создают неоднородности плотности. Но в какой-то момент максимумы плотности начинают выстраиваться в линию, и этот момент можно охарактеризовать, как время зарождения X-структуры. Этот момент времени для каждой модели определялся индивидуально на основе визуального анализа распределений пиков плотности в различные моменты времени.

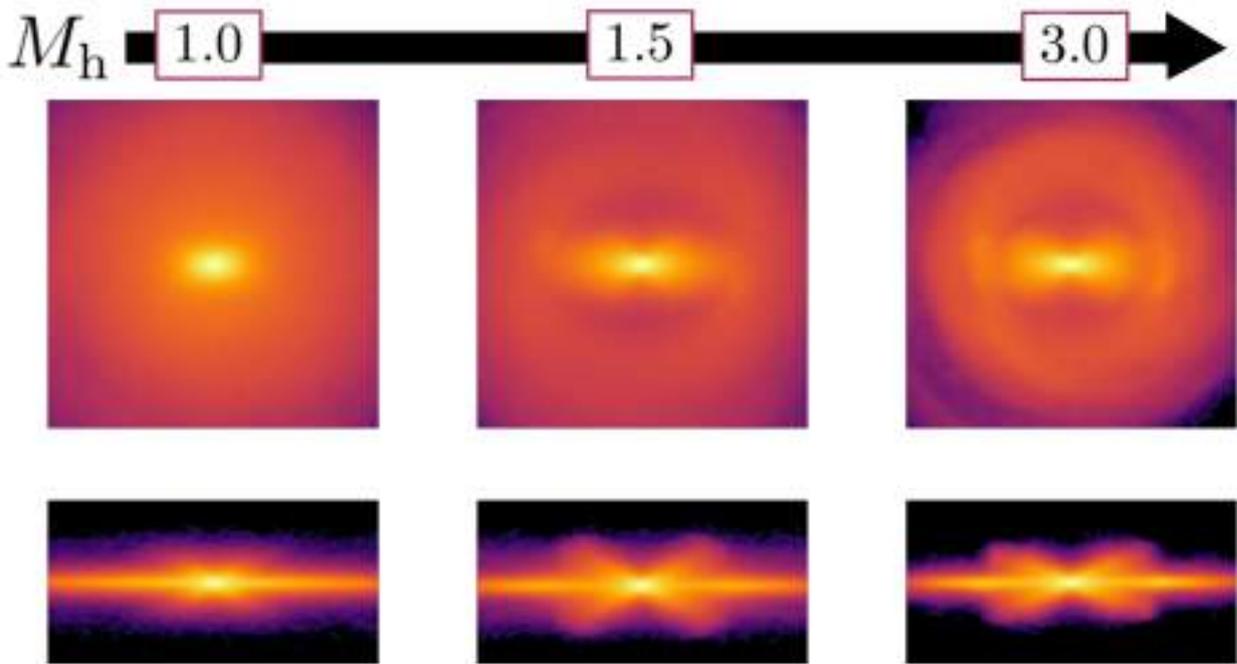


Рис. 1.9 — Вид плазмы (верхний ряд) и вид с ребра (нижний ряд) моделей с различными массами гало на конечный момент времени  $t = 600$  временных единиц (7.9 млрд. лет). Вид плазмы показан в квадрате  $[-5,5] \times [-5,5]$ , с ребра — в прямоугольнике  $[-5,5] \times [-2.5,2.5]$ . От  $M_h = 1.0$  к  $M_h = 1.5$  X-структура становится существенно более выраженной и более сплюснутой. При этом бар в плоскости приобретает форму арахиса.

#### 1.4.1 Зависимость углов раствора от массы тёмного гало

Изображения моделей с различными массами гало (вид плазмы и с ребра) на конечный момент времени  $t = 600$  (7.9 млрд. лет) показаны на Рис. 1.9. Эволюция углов раствора и параметра вертикальной асимметрии на весь промежуток моделирования показана на Рис. 1.10. В моделях с массами гало в диапазоне  $M_h = 1.5 \div 3.0$  X-структура в ходе своей эволюции увеличивается в размерах и уплощается. Модель с самым лёгким гало,  $M_h = 1.0$ , эволюционирует другим образом. В начальные моменты времени угол раствора в этой модели составляет около  $36^\circ$ . После 2 млрд. лет он внезапно увеличивается примерно до  $42^\circ$  и остается вблизи этого значения до  $t = 7.9$  млрд. лет. Такое необычное поведение, по всей видимости, связано с необычной эволюцией самого бара в этой модели. Дело в том, что спустя примерно 1.5 млрд. лет после начала моделирования в этой модели происходит разрушение сформировавшегося бара и образование нового, то есть происходит реформирование бара. Сформировавшийся же новый бар намного меньше. X-структура в этой модели имеет наибольшее значение угла раствора

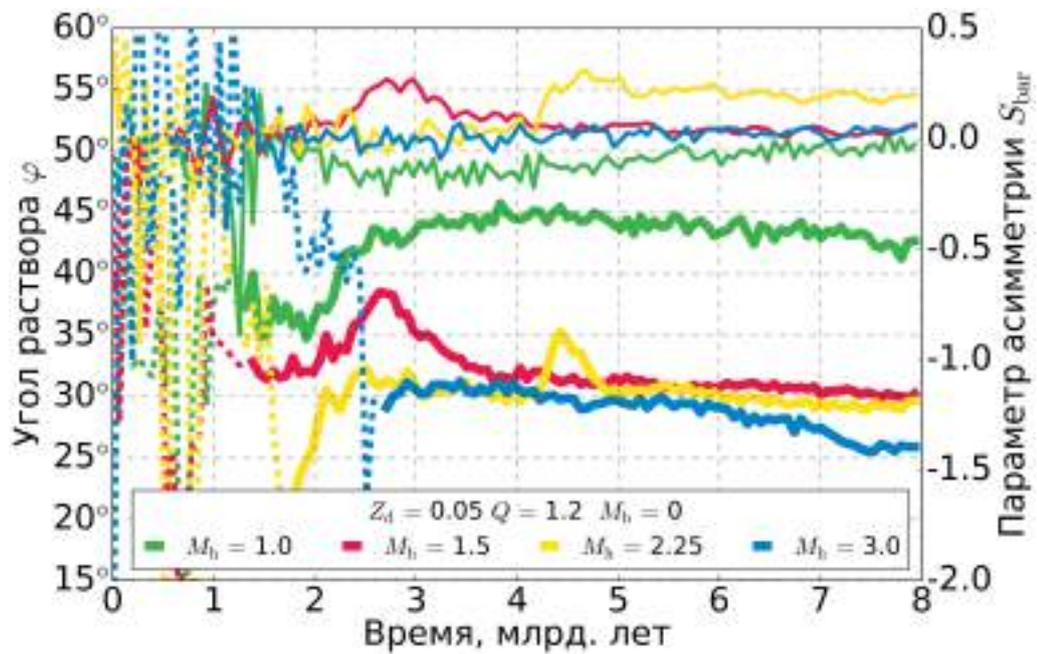


Рис. 1.10 — Зависимость углов раствора (значения откладываются по левой оси, толстые линии) и параметра вертикальной асимметрии (значения откладываются по правой оси, тонкие линии) от времени. Для углов раствора пунктирными линиями обозначен период времени до формирования X-структуры. Аналогичным образом для параметра асимметрии пунктирные линии обозначают промежуток времени, на котором Фурье-гармоника, соответствующая бару, имеет малую амплитуду ( $A_2/A_0 < 0.05$ ). При таких малых амплитудах бар визуально не отождествляется.

$\varphi = 40^\circ$  среди моделей с различными массами гало. Наименьший же угол раствора,  $\varphi = 26^\circ$ , возникает в модели с самым тяжелым из рассмотренных гало с  $M_h = 3$  на конечные моменты времени. Заметим, что даже простое визуальное сравнение вида X-структур в различных моделях показывает, что модель с самым тяжелым гало действительно имеет более уплотнённую X-структуру (см. Рис. 1.9, нижний ряд) в сравнении с другими моделями. Две модели с промежуточными массами гало,  $M_h = 1.5$  и  $M_h = 2.25$ , имеют X-структуры с близкими значениями углов раствора, от  $30^\circ$  до  $32^\circ$ .

Как видно из эволюции параметра асимметрии на Рис. 1.10, все модели, кроме модели с самым тяжелым гало, проходят через фазу потери вертикальной симметрии баром. Для модели с  $M_h = 2.25$  эта фаза продолжается до конца моделирования. Для моделей с  $M_h = 1.0$  и  $M_h = 1.5$  она длится около 2 млрд. лет, после чего бар возвращается в невозмущенное симметричное состояние. Прямое сравнение значений углов раствора и параметра асимметрии показывает, что, как только начинается фаза асимметрии, значения угла раствора резко возрастают примерно на  $5^\circ$ . Этим и объясняются резкие скачки на зависимости угла раствора от времени, наблюдаемые для рассмотренных моделей.

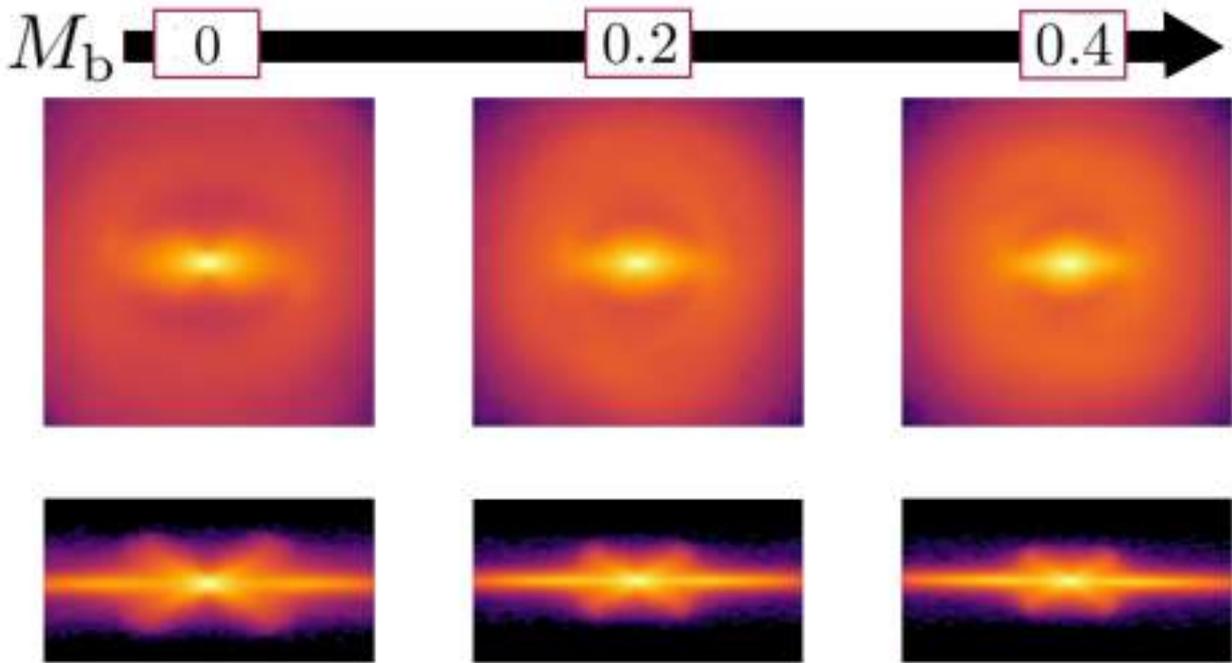


Рис. 1.11 — То же, что и на Рис. 1.9, но для моделей с различными вкладами классических балджей. С увеличением массы балджа X-структура становится меньше, и в центре плоского бара образуется барлинза.

Несмотря на то что фаза потери вертикальной симметрии проходит по-разному в различных моделях, общая морфология X-структур схожа для всех моделей с различной массой тёмного гало (за исключением модели с  $M_h = 1.0$ ). Ниже будет показано, что для моделей с различными значениями толщины диска и параметра Тумре ситуация противоположна: в них потеря баром вертикальной симметрии приводит к сильному изменению морфологии X-структур даже на конечные моменты времени.

#### 1.4.2 Зависимость углов раствора от центральной концентрации

Как видно из Рис. 1.11 (нижний ряд), модели со значительным вкладом балджа имеют меньшие по размеру и более плоские X-структуры по сравнению с моделью без балджа. В моделях с большой центральной концентрацией X-структуры имеют углы раствора больше примерно на  $4^\circ - 5^\circ$  по сравнению с моделью без балджа (см. Рис. 1.12). Заметим, что в моделях с балджем нет фазы потери вертикальной симметрии баром характерной почти для всех других моделей (Рис. 1.12). Эволюции X-структур во всех моделях с балджем происходит

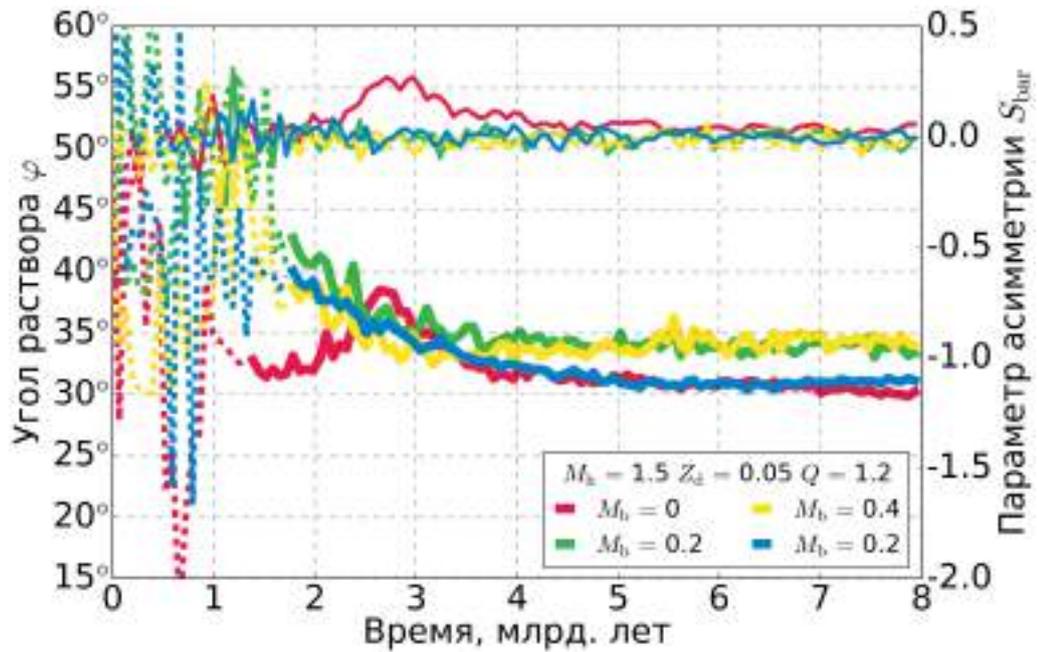


Рис. 1.12 — То же, что и на Рис. 1.10, но для моделей с различными вкладами классических балджей.

следующим образом. Сформировавшиеся X-структуры постепенно уменьшают свой угол раствора с  $40^\circ$  до  $34^\circ$ . После 4 млрд. происходит насыщение, и углы раствора почти не меняются до конца моделирования. Заметим, что модель с лёгким и разреженным балджем ( $M = 0.2, r_b = 0.4$ ) на конечные моменты времени имеет почти такое же значение угла раствора, как и модель без балджа. При этом наличие балджа изменяет и морфологию бара в плоскости: бар начинает демонстрировать барлинзу в центральной области (Рис. 1.11, верхний ряд). Это согласуется с результатами недавней работы [72] относительно влияния классического балджа на морфологию бара.

### 1.4.3 Зависимость углов раствора от начальной толщины диска

Визуально X-структуры в моделях с большой начальной толщиной диска ( $Z_d = 0.1$  и  $Z_d = 0.2$ ) отличаются от X-структур в моделях с тонким диском и моделях с балджем или массивным тёмными гало. Наиболее заметной особенностью вертикальной составляющей таких моделей является наличие вторичных X-структур, которые возникают в ходе длительной фазы потери баром вертикальной симметрии (Рис. 1.13, нижний ряд). На Рис. 1.14 показаны полученные значения углов раствора первичной (внутренней) X-структуры и параметра асим-

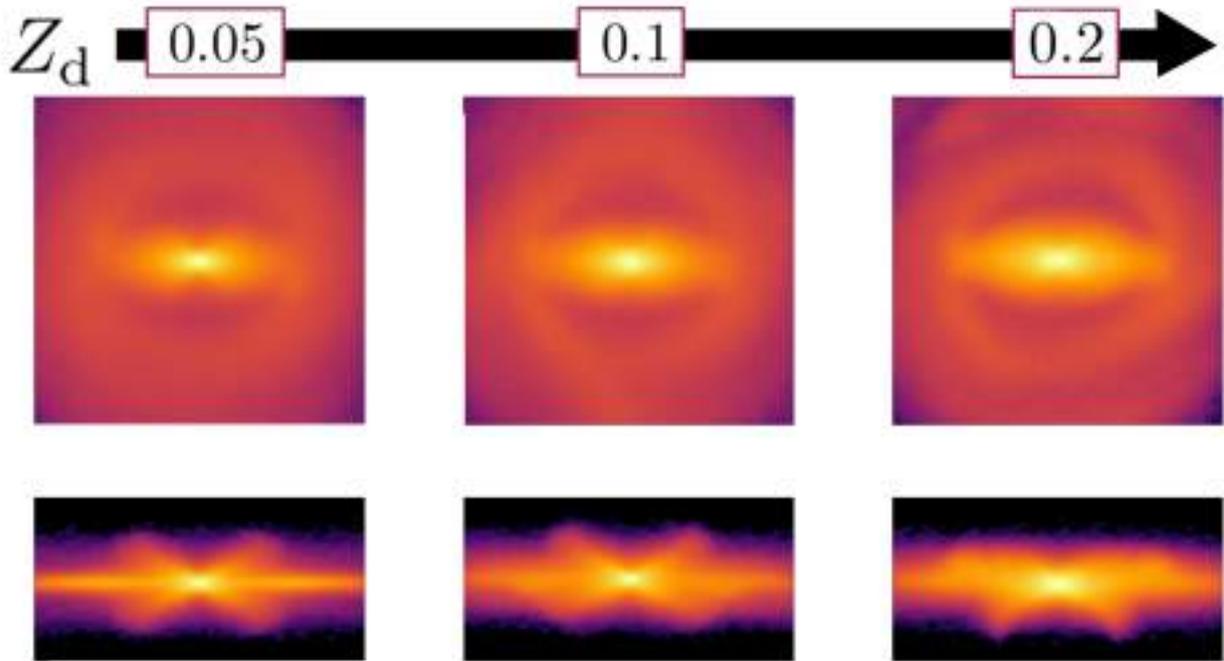


Рис. 1.13 — То же, что и на Рис. 1.9, но для моделей с различными значениями начальной толщины звёздного диска. С увеличением начальной толщины звёздного диска X-структуры становятся менее сплюснутыми, и лучи X-структур визуально идут более круто относительно плоскости диска. В модели с самым толстым диском ( $Z_d = 0.2$ ) X-структуры демонстрируют явную асимметрию относительно плоскости диска. При этом в плоскости диска проявляется барлинза.

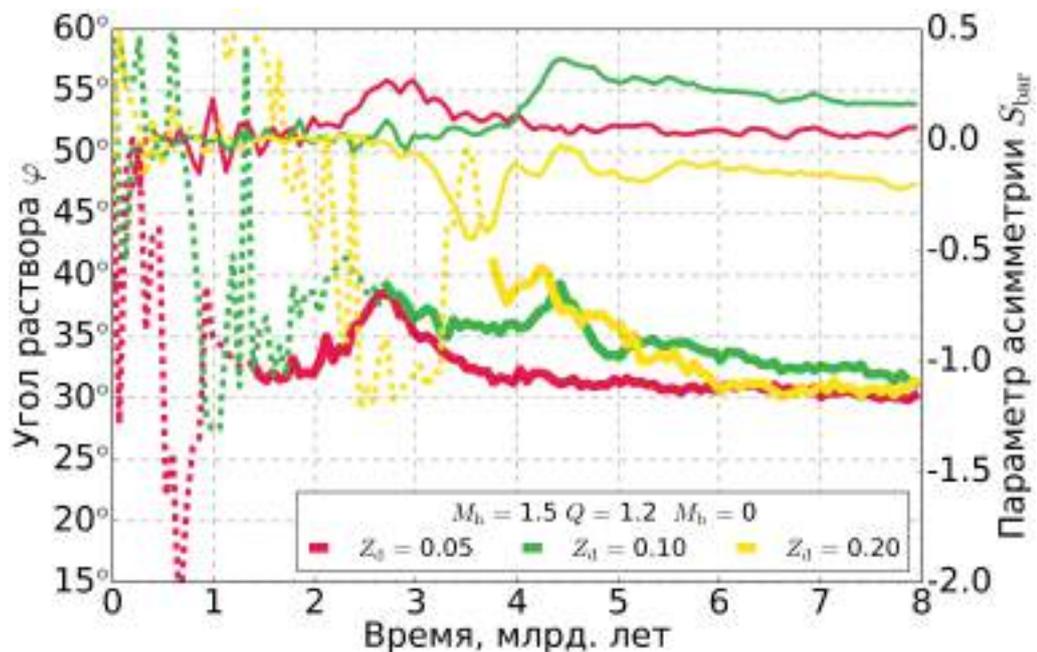


Рис. 1.14 — То же, что и на Рис. 1.10, но для моделей с разными значениями начальной толщины звёздного диска. Видно, что с увеличением толщины звёздного диска, значения углов раствора растут.

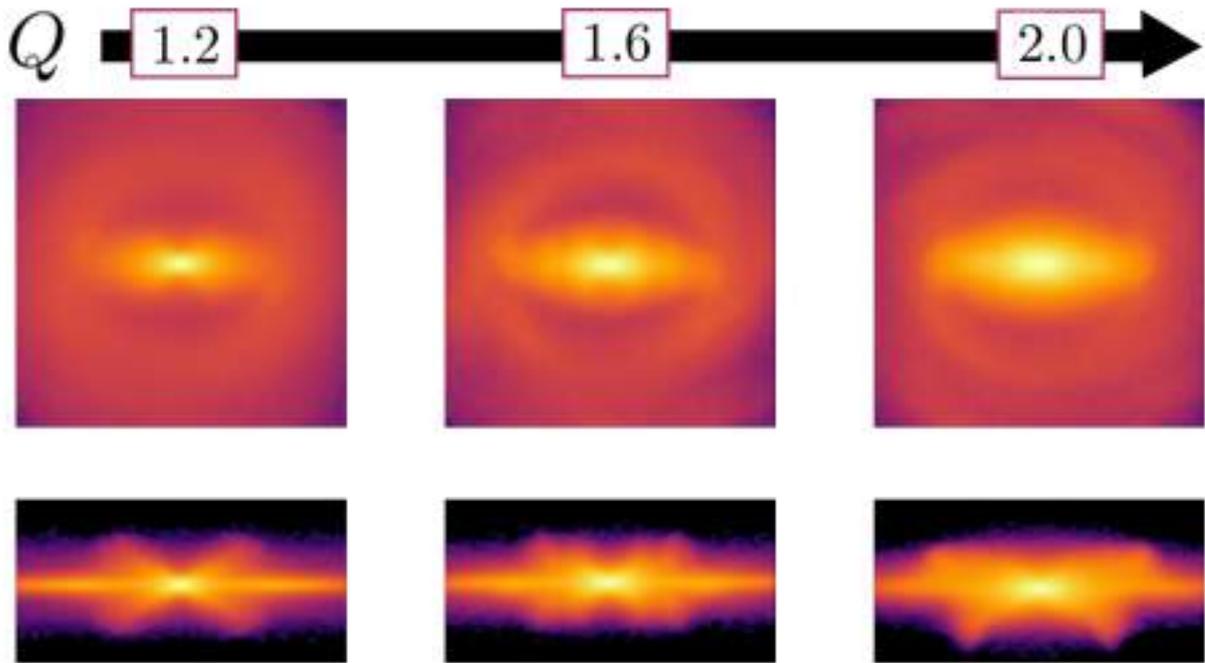


Рис. 1.15 — То же, что и на Рис. 1.13, но для моделей с различными значениями параметра Тумре. При  $Q = 1.6$  X-структура приобретает интересную морфологию: начинают наблюдаться хвосты вторичных лучей, то есть X-структура становится двойной. При  $Q = 2.0$  бар не успевает восстановить симметрию относительно вертикального направления, и наблюдаются сильно асимметричные X-структуры. Увеличение параметра Тумре также приводит изменению морфологии в плоскости диска: образуется барлинза.

метрии бара. Увеличение толщины диска в два раза от  $Z_d = 0.05$  до  $Z_d = 0.1$  приводит к небольшому увеличению угла раствора, примерно на  $3^\circ$ . Для модели же с  $Z_d = 0.2$  увеличение угла раствора значительно больше: на момент времени  $t = 7.9$  млрд. лет угол раствора составляет примерно  $40^\circ$ . Заметим, что в моделях с толстым диском фаза потери баром вертикальной симметрии длится достаточно долго — несколько млрд. лет. В модели же с  $Z_d = 0.2$  бар на конечный момент времени не успевает вернуться в симметричное состояние, и эта фаза длится как минимум 4 млрд. лет (Рис. 1.14). Что касается морфологии в плоскости, то с увеличением толщины диска центральная часть бара превращается в барлинзу (Рис. 1.13, верхний ряд).

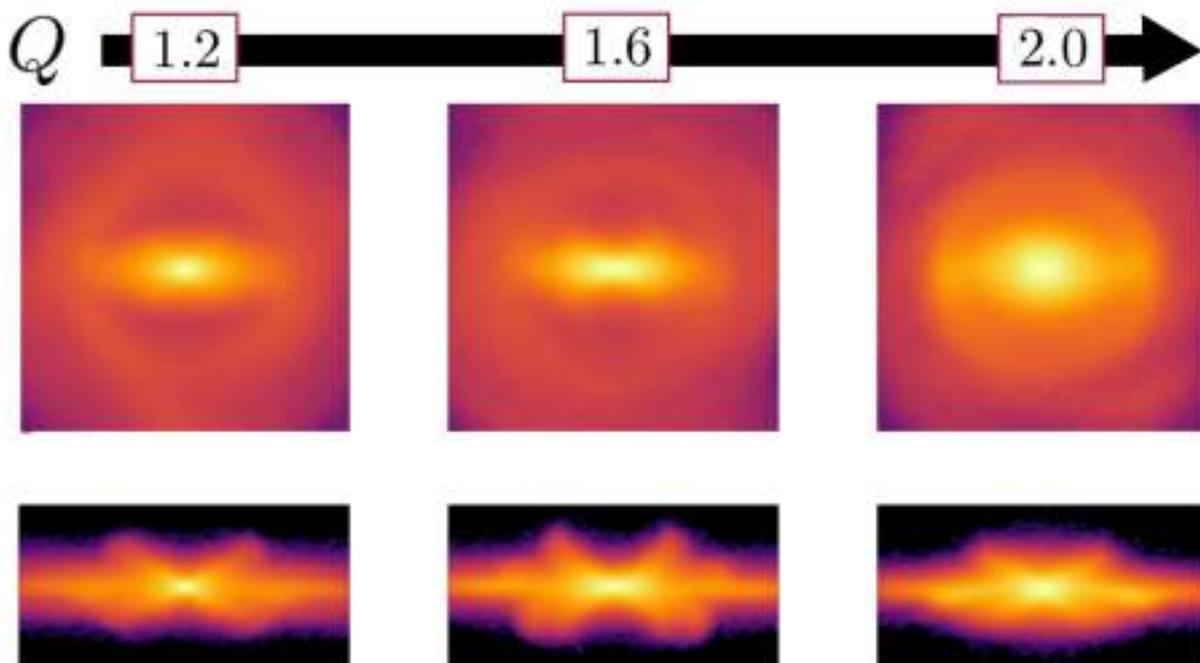


Рис. 1.16 — То же, что и на Рис. 1.15, но для моделей с изначально толстым звездным диском  $Z_d = 0.1$ . Как и в случае с тонкими дисками от  $Q = 1.2$  к  $Q = 1.6$  X-структура становится двойной, но в случае толстого диска внешние X-структуры показывают сильную степень вертикальной асимметрии. В модели с  $Q = 2.0$  образуется самая большая барлинза из всех, которые наблюдаются в рассмотренных в данной работе моделях. Заметим также, что кольцо, окружающее бар в этой модели, становится очень выраженным по сравнению с другими моделями.

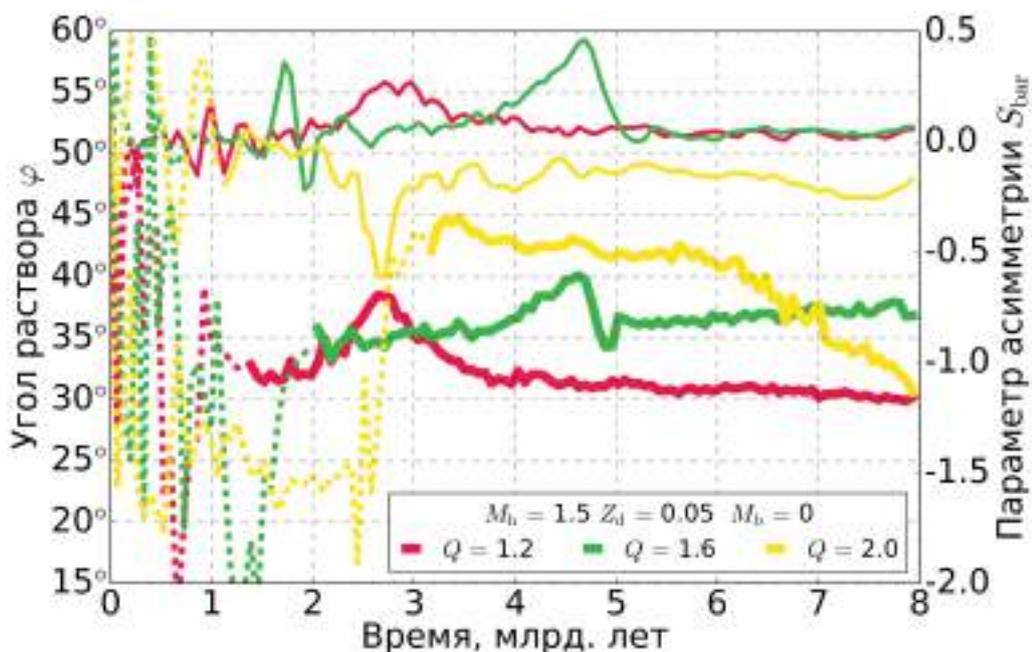


Рис. 1.17 — То же, что и на Рис. 1.10, но для моделей с различными значениями параметра Тумре. Видно, что углы раствора увеличиваются с увеличением параметра Тумре.

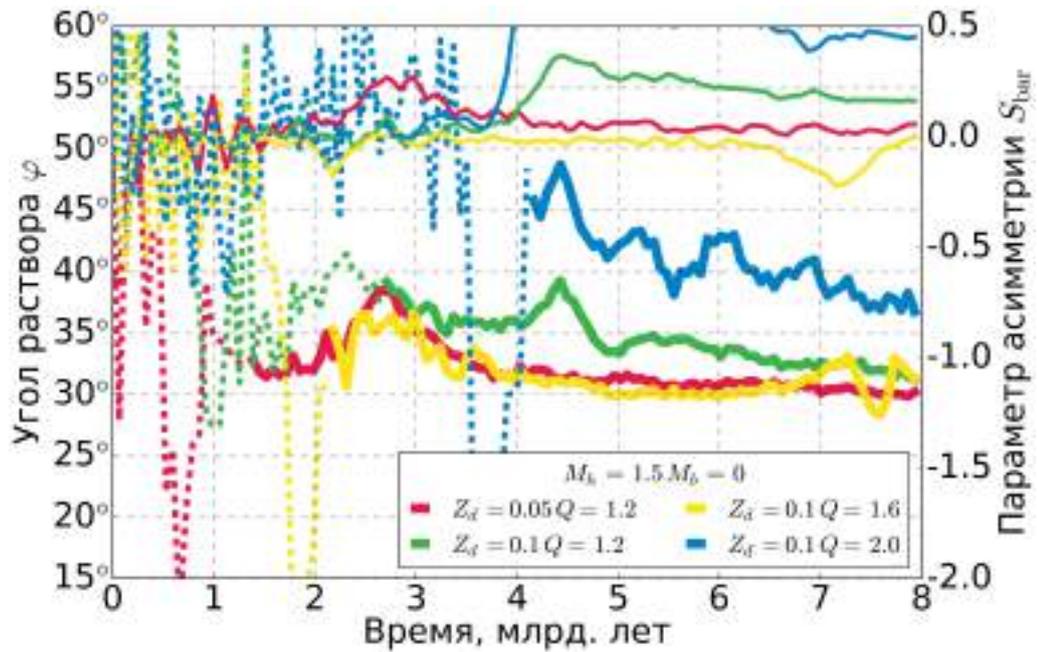


Рис. 1.18 — То же, что и на Рис. 1.10, но для моделей с различными значениями параметра Тумре и изначально толстым диском,  $Z_d = 0.1$ . Заметим, что в модели с  $Q = 2.0$  степень асимметрии весьма велика по сравнению с другими моделями, и при этом бар не успевает вернуться в симметричное состояние на всём промежутке моделирования.

#### 1.4.4 Зависимость углов раствора от параметра Тумре

В данной работе было рассмотрено два набора моделей с различными значениями параметра Тумре: первый — с изначально тонкими дисками ( $Z_d = 0.05$ ) и второй — с изначально толстыми дисками ( $Z_d = 0.10$ ). В обоих типах моделей увеличение параметра Тумре ведёт к изменению морфологии бара как в плоскости диска, так и вертикальном направлении. При этом увеличение параметра Тумре приводит к изменениям, качественно схожим с теми, которые наблюдаются при увеличении начальной толщины звёздного диска. При переходе от  $Q = 1.2$  к  $Q = 1.6$  в моделях наблюдается длительная фаза потери вертикальной симметрии баром, возникают вторичные X-структуры (Рис. 1.15 и Рис. 1.16, нижние строки). Увеличение  $Q$  также изменяет и морфологию бара, если галактика видна в положении плашмя: центральная часть бара превращается в барлинзу (Рис. 1.15 и Рис. 1.16, верхние строки).

*Тонкие диски:* Углы раствора увеличиваются с увеличением параметра Тумре, с  $36^\circ$  в модели с  $Q = 1.6$  до  $40^\circ$  в модели с  $Q = 2.0$  (Рис. 1.17). Заметим, что модель с  $Q = 1.6$  весьма интересна, так как, хотя бар в этой модели и теряет вертикальную симметрию (Рис. 1.17), и образуются вторичные X-структуры, вся

система возвращается в симметричное состояние (Рис. 1.15, нижний ряд, в центре). В других рассмотренных моделях такого не происходит. Для  $Q = 2.0$  бар не успевает восстановить свою вертикальную симметрию (Рис. 1.17).

*Толстые диски:* X-структуры во всех таких моделях демонстрируют явную асимметрию относительно плоскости диска на конечный момент времени. В отличие от моделей с тонким диском, увеличение параметра Тумре с  $Q = 1.2$  до  $Q = 1.6$  почти не изменяет угол раствора первичной X-структуры (см. Рис. 1.18). Кроме того, вторичные X-структуры остаются асимметричными до самого конца моделирования и в модели с  $Q = 1.6$ , и в модели с  $Q = 2.0$ . Модель с  $Q = 2.0$  демонстрирует углы раствора  $\varphi \approx 36^\circ$ , что меньше, чем в модели с  $Q = 2.0$ , но с тонким диском.

#### 1.4.5 Размеры X-структур

Помимо углов раствора важной характеристикой X-структур в наблюдательных данных являются размеры их лучей. Так как лучи реально наблюдаемых X-структур, как правило, симметричны, то далее будем рассматривать параметры лучей, усреднённые по четырём квадрантам. Размеры будем характеризовать длиной проекций луча  $L_X = L \cdot \cos \varphi$  и  $L_Z = L \cdot \sin \varphi$ , где  $L_X$  – длина проекции луча в плоскости диска,  $L_Z$  — протяженность луча в вертикальном направлении, а  $L$  – длина луча. На Рис. 1.19, (слева) приведены размеры X-структур в моделируемых галактиках на конечный момент времени  $t = 600$  (7.9 млрд. лет) в килопарсеках с учётом нормировки  $R_d = 3.5$  кпк, а на Рис. 1.19, (справа) приведены те же самые размеры, но в единицах экспоненциального масштаба. Оба представления (с нормировкой на экспоненциальный масштаб и без) широко распространены в литературе, и для удобства сравнения здесь приводятся оба варианта. Также следует сделать одно замечание относительно измерения экспоненциального масштаба диска. Как правило, проэволюционировавшие модельные диски на конечный моменты времени имеют профиль плотности, плохо описываемый единым экспоненциальным законом. Для большинства моделей профиль плотности имеет два участка с различными экспоненциальными спадами с небольшой перемычкой между ними в том месте, где заканчивается бар и начинается диск. Из сказанного следует, что существует два экспоненциаль-

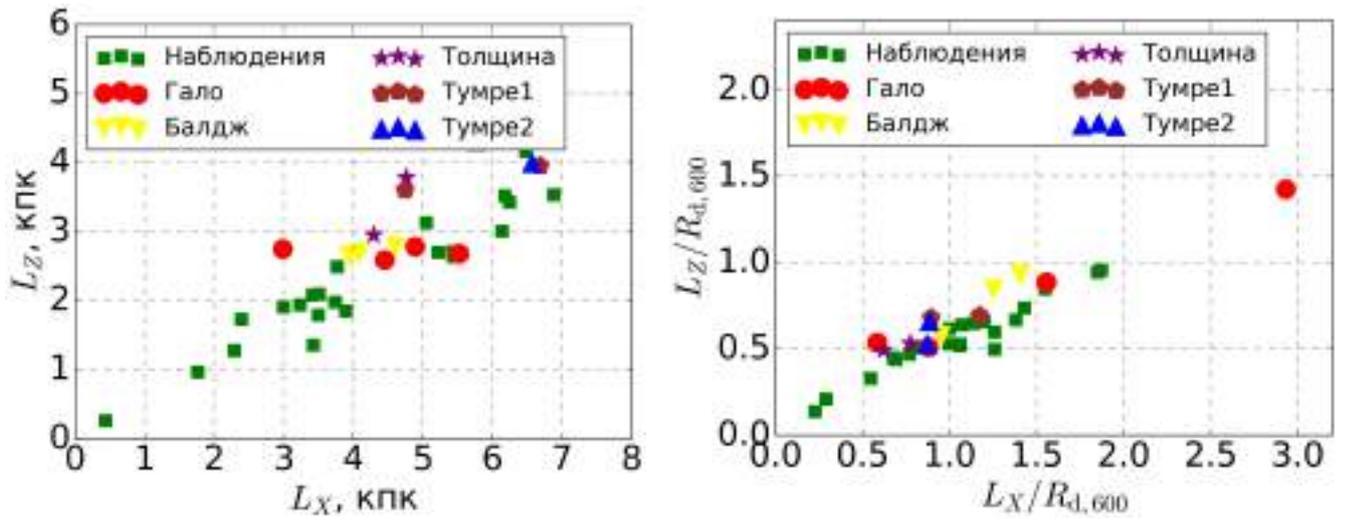


Рис. 1.19 — Размеры луча X-структур в плоскости диска  $L_X$  и вертикальном направлении  $L_Z$  в кпк (слева) и в единицах экспоненциального масштаба (справа) для модельных галактик, рассмотренных в данной работе, и реальных галактик из работы [49]. Различными символами обозначаются различные наборы моделей (см. Таблицу 1). Обозначение “Тумре2” соответствует набору моделей с толстым диском  $Z_d = 0.1$  и значениями параметра Тумре  $Q = 1.6$  и  $Q = 2.0$ .

ных масштаба, на которые можно нормировать значения размеров X-структур. В данной работе размеры X-структур нормировались на масштаб внешнего экспоненциального диска  $R_{d,600}$ . Чтобы избежать путаницы с изначальным масштабом диска  $R_d$ , здесь вводится дополнительный нижний индекс, обозначающий момент времени, на который рассчитывается экспоненциальный масштаб. Такой выбор обусловлен следующими соображениями. В реально наблюдаемых галактиках, если диск имеет сложную структуру в центральной части, эту область, как правило, маскируют, а параметры диска измеряют по внешней области. Так что выбор экспоненциального масштаба внешнего диска для модельных галактик более уместен для дальнейшего сравнения реальных и моделируемых X-структур.

На том же рисунке обозначены размеры реальных X-структур, полученные в работе [49]. Заметим, что здесь не используются данные из работы [47], где также измерялись параметры X-структур. Дело в том, что в работе [47] авторы использовали другой набор параметров для характеристики X-структур. В частности, в качестве меры размера X-структур принималась не длина луча, а расстояние от центра до максимума амплитуды шестой Фурье гармоники, описывающей отклонение изофот от эллиптических. Полученные таким образом размеры должны быть, по-видимому, меньше, чем измеренные прямым методом по длине луча (см. раздел 1.3), но в количественном плане неясно, насколько они должны отличаться. Как видно из рисунка, размеры реальных X-структур отли-

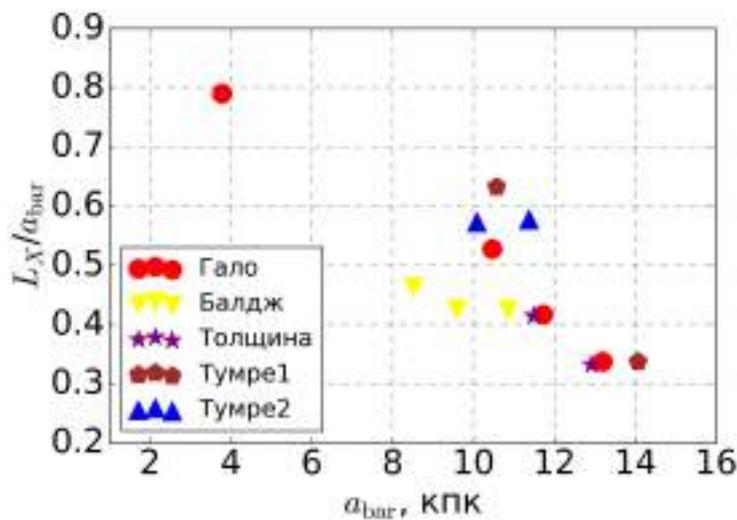


Рис. 1.20 — Отношение длины проекции луча X-структуры на плоскость диска  $L_X$  к длине большой полуоси бара  $a_{\text{bar}}$  в зависимости от длины большой полуоси  $a_{\text{bar}}$ .

чаются бóльшим разбросом, чем размеры X-структур модельных галактик. Это может быть следствием различных факторов. Во-первых, размеры, определяемые для реальных X-структур, зависят от некоторых дополнительных параметров, таких, как светосила телескопа и интенсивность фона. Процедура же измерения размеров, применённая в данной работе для модельных галактик, основана исключительно на оценке экспоненциального масштаба спада плотности вдоль луча X-структуры и не учитывает возможные особенности наблюдательных данных (фон, разрешение). Поэтому бóльший разброс значений размеров реальных X-структур по сравнению с модельными может быть обусловлен различием в величине фона и различием в разрешении X-структур на снимках различных галактик. Заметим при этом, что верхняя граница диапазона размеров для наблюдаемых и модельных X-структур примерно совпадает. Что касается размеров, нормированных на масштаб диска, то полученные в результате численного моделирования размеры согласуются с полученными в наблюдениях. Для большинства X-структур размер в плоскости диска  $L_X$  составляет примерно  $1.0 \div 1.5$  экспоненциального масштаба диска, и размер в вертикальном направлении  $L_Z$  составляет примерно  $0.5 \div 0.9$  экспоненциального масштаба диска.

Из Рис. 1.19 видно, что размеры модельных X-структур демонстрируют некоторую зависимость от параметров галактик. Для галактик с большой массой гало ( $M_h = 2.25$  и  $M_h = 3.0$ ) X-структуры более вытянуты. Если же в системе есть балдж или масса гало меньше, то получаются более короткие X-структуры. Увеличение толщины диска или увеличение параметра Тумре приводит к более вытянутым X-структурам (заметим, что сюда не включаются вторичные X-структуры, которые наблюдаются в некоторых моделях).

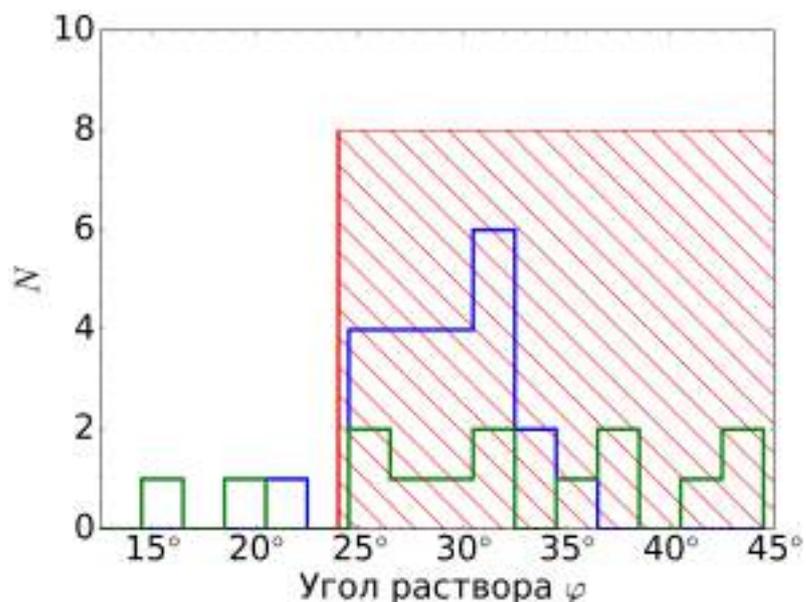


Рис. 1.21 — Гистограмма наблюдаемых значений углов раствора, составленная по данным из работ Цимбура и Грехама [47] (зеленые бары) и Савченко и др. [49] (синим цветом). Заштрихованной областью отмечен диапазон углов раствора для модельных X-структур.

В наблюдениях размеры X-структуры обычно сравниваются с длиной большой полуоси бара. Для реальных галактик отношение этих двух величин лежит в диапазоне от 0.3 до 0.8 с характерным значением 0.5 [9]. На Рис. 1.20 показано отношение размеров модельных X-структур в плоскости диска  $X$  к длине большой полуоси бара в зависимости от длины большой полуоси бара для рассмотренных в данной работе моделей. Размеры модельных X-структур составляют 0.3—0.8 длины большой полуоси, и для большинства моделей это отношение лежит в диапазоне от 0.3 до 0.6. Такие значения в целом согласуются с наблюдательной статистикой.

## 1.5 Обсуждение результатов главы

### 1.5.1 Сравнение с наблюдательными данными

Ранее углы раствора X-структур реальных галактик исследовались в трёх работах [47; 49; 97]. Заметим, что во всех трёх работах использовались различные методики анализа X-структур. В работе [97] использовалась процедура нерезко-

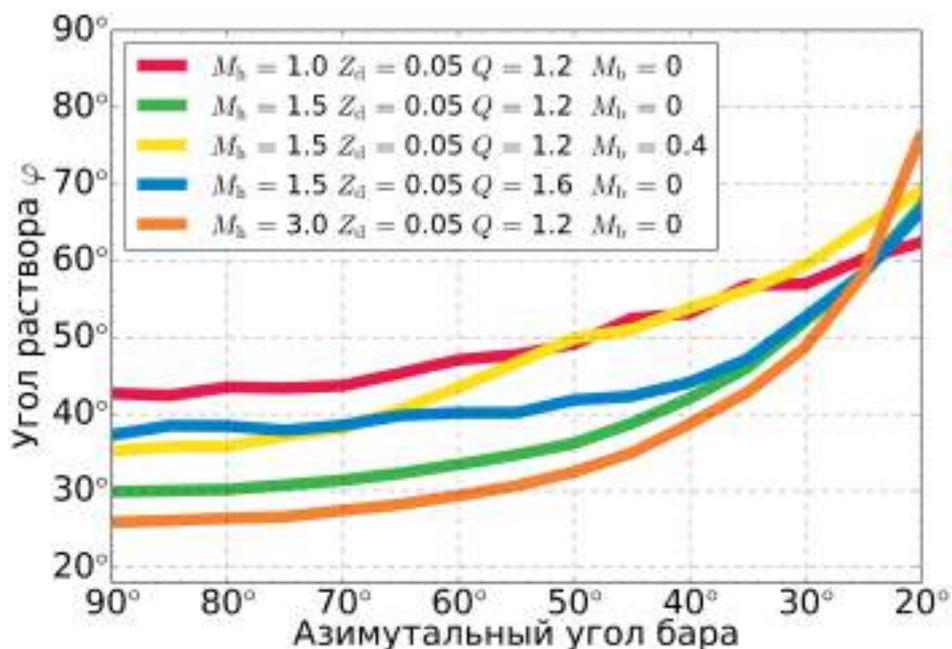


Рис. 1.22 — Зависимость углов раствора от угла между лучом зрения и большой осью бара. Все модели демонстрируют схожее поведение: при уменьшении угла между осью бара и лучом зрения от  $90^\circ$  к  $40^\circ$  угол раствора X-структур увеличивается примерно на  $10^\circ$ .

го маскирования изображений галактик, и параметры X-структур измерялись “на глаз” на отфильтрованных изображениях. В работе [47] использовались Фурье гармоники для описания отклонения изофот от эллипсов и предполагалось, что шестая Фурье-гармоника описывает параметры X-структуры в галактиках, видимых с ребра. В работе [49] использовалась процедура фотометрической декомпозиции: для изображения галактики находились фотометрические компоненты (диск, балдж и фотометрическая модель X-структуры), сумма которых наилучшим образом описывает наблюдаемое распределение интенсивности. После этого модели диска и балджа вычитались из исходного изображения галактики. Далее предполагалось, что изображение, полученное таким образом, представляет собой X-структуру, “очищенную” от вкладов других компонент. Такое изображение затем анализировалось подобно тому, как это было сделано для модельных X-структур в данной работе: находилось распределение пиков плотности и определялся угол раствора.

Заметим, что выборки из [97], [47] и [49] частично пересекаются: у [97] и [47] семь общих галактик, и у [97] и [49] — две. Во всех случаях углы раствора, измеряемые на изображениях, полученных процедурой нерезкого маскирования, примерно на  $10^\circ$  больше, чем измеряемые другими методами. Особенно интересен случай галактики ESO 443-042, для которой анализ шестой Фурье гармоники

даёт угол  $15^\circ$  [47], в то время как в [97] авторы получили угол  $37^\circ$ . Визуальный осмотр изначальных изображений и изображений, отфильтрованных процедурой нерезкого маскирования, позволяет предположить, что углы раствора X-структур на изображениях с нерезкой маской могут быть преувеличены. Поэтому в дальнейшем данные [97] исключались из анализа.

На Рис. 1.21 показана гистограмма распределения значений углов раствора для 33-х галактик из работ [47] и [49]. Отметим, что гистограмма строилась по 36 измерениям для 33-х галактик. Это связано с тем, что в работе [47] приводятся три значения угла раствора для NGC 128 и два — для NGC 2549 для внутренней и внешней X-структуры, соответственно. Заштрихованной областью на Рис. 1.21 обозначен диапазон значений углов раствора модельных X-структур, полученный в данной работе. Видно, что два диапазона значений для модельных и для реально наблюдаемых X-структур почти целиком перекрываются. Это в целом говорит о хорошем согласии наблюдательных данных и моделей. Заметим также, что пик распределения углов раствора реальных X-структур в данных [49] приходится на промежуток  $25^\circ$  и  $33^\circ$ . Это может связано с эффектами селекции. Дело в том, что такие углы наблюдаются в моделях с  $M_h = 1.5 - 3.0$ , тонким диском и  $Q = 1.2$ . В этих моделях X-структуры весьма протяженные и имеют более простую и симметричную структуру по сравнению с моделями, где диски изначально горячие или достаточно толстые.

Остановимся подробнее на отличиях модельных и реально наблюдаемых X-структур. Заметим, что три галактики из наблюдательной выборки имеют углы раствора, не соответствующие модельным значениям. Это галактики со сравнительно маленькими углами раствора ( $15^\circ$ - $20^\circ$ ). Если экстрополировать полученные в данной Главе результаты относительно модельных X-структур, то такие маленькие углы раствора должны возникать из-за очень большого вклада тёмного гало в общую массу галактики,  $M_h/M_d \gtrsim 4 - 5$ . Однако в первую очередь существование таких маленьких углов раствора в наблюдательных данных может быть следствием различий в процедурах измерения X-структур. Для разъяснения данного вопроса необходимо провести детальное сравнение различных методов измерения параметров X-структуры для одного и того же набора наблюдаемых галактик. Этот вопрос будет обсуждаться в Главе 4.

Заметим также, что с малыми углами раствора связана ещё одна интересная проблема. Как уже упоминалось, некоторые моделируемые галактики демонстрируют двойные X-структуры. При этом вторичная X-структура (вторичная по

времени рождения) оказывается более плоской и более протяжённой, чем первичная (та, что находится ближе к центру диска). В настоящей работе, по-видимому, впервые продемонстрирована возможность образования таких структур в модельных галактиках. Не исключено, что наблюдаемые X-структуры с малыми углами являются на самом деле вторичными X-структурами, а первичные просто не разрешаются на текущем уровне разрешения. Однако в работе [47] для NGC 128 и NGC 2549 было показано, что на профиле шестой Фурье гармоники наблюдается несколько пиков. Этот факт интерпретировался авторами как возможность существования нескольких вложенных друг в друга арахисоподобных балджей. Возможно, такие вложенные арахисоподобные балджи могут быть связаны с двойными X-структурами, которые обнаружены в данной работе. В [47] авторы также получили, что внешние X-структуры более протяжённые и более сплюснуты, чем те, что наблюдаются ближе к центру. Это качественно согласуется с тем, что получается в представленных здесь модельных расчётах. Внутренние X-структуры в NGC 128 и NGC 2549 имеют углы раствора  $43^\circ$  и  $42^\circ$ , соответственно, а для внешних X-структур в работе [47] были получены значения в  $36^\circ$  (NGC 128) и  $34^\circ$  (NGC 2549).

Сравнение данных наблюдений и моделирования позволяет выявить ещё одну особенность наблюдаемых X-структур. Реально наблюдаемые X-структуры не демонстрируют большие углы раствора:  $50^\circ$ – $55^\circ$ . В работе [49] было показано, что эффекты проекции, связанные с ориентацией бара относительно луча зрения, могут приводить к увеличению углов раствора на  $\sim 10^\circ$ . Следовательно, если углы раствора X-структуры в баре, повернутом перпендикулярно лучу зрения,  $40^\circ$ , то для бара, развернутого к лучу зрения под меньшим углом, углы раствора X-структур должны быть ещё больше,  $50^\circ$ – $55^\circ$ . Отсутствие X-структур с такими большими углами раствора в выборке реальных галактик можно объяснить двумя причинами. Во-первых, Рис. 1.19 показывает, что X-структуры с большими углами раствора, как правило, имеют меньшие размеры. В принципе, лучи такой X-структуры могут перестать выделяться на фоне яркой дисковой подложки при повороте бара к лучу зрения. Для проверки этого утверждения рассмотрим, как зависят углы раствора от угла между осью бара и лучом зрения. На Рис. 1.22 показаны полученные зависимости для некоторых моделей. Для модельных галактик эта зависимость весьма гладкая, и X-структура выделяется вплоть до угла  $20^\circ$  между большой осью бара и лучом зрения. Упомянутое ранее размытие лучей X-структуры не наблюдается. С другой стороны, наблюдательная выборка из

33 галактик, возможно, не репрезентативна, и подобные несоответствия между рассматриваемыми моделями и наблюдениями могут естественным образом исчезнуть с увеличением размера выборки.

### 1.5.2 Сравнение с численно-экспериментальными исследованиями

Угол раствора как характеристика X-структур систематически стала исследоваться сравнительно недавно. Повышение интереса к ней в первую очередь связано с накоплением наблюдательных данных по галактикам, видимым с ребра, и улучшением методик их обработки. В численных экспериментах углы раствора X-структур ранее не изучались. Однако сама по себе эволюция бара как в плоскости, так и в вертикальном направлении была предметом множества различных исследований (см. обзоры [39; 98]). В этом пункте будут выделены некоторые важные детали относительно эволюции бара, полученные в данной работе и ранее не отмечавшиеся другими авторами.

Первая важная деталь касается зависимости морфологии бара, видимого плашмя, от параметров галактики, в которой такой бар образуется. В работе [48] было показано, что наличие или отсутствие барлинзы в баре определяется наклоном кривой вращения в центральной области. При этом барлинза должна наблюдаться в том случае, когда кривая вращения достаточно крутая в центральной области. Для рассмотренных в данной работе моделей подтверждается этот результат: в моделях с концентрированным классическим балджем образующийся бар показывает в центральной области барлинзу (Рис. 1.11, верхний ряд). Однако из Рис. 1.13-1.15 видно, что барлинза образуется также в достаточно горячих или толстых звёздных дисках даже без наличия в системе концентрированного балджа. Таким образом, из рассмотренных моделей можно заключить, что барлинза может образовываться вследствие различных факторов, а не только вследствие наличия в системе классического балджа.

Вторая важная деталь касается условий, при которых возможна потеря баром вертикальной симметрии. Как уже упоминалось, в некоторых моделях бар с уже установившейся вертикальной структурой, начинает терять вертикальную симметрию. Впервые такое поведение было описано в работе [57], где исследовалась только одна численная модель галактики. Заметим, правда, что такая же

потеря вертикальной симметрии наблюдалась и в более ранней работе [54] (см. их рисунок 4). В работе [58] авторы рассмотрели три различных модели, и в двух из них, где образовался бар, наблюдалась фаза потери баром вертикальной симметрии. Во всех упомянутых работах продолжительность этой фазы составляла около 1-2 млрд. лет. Проведённое в данной работе моделирование показывает, что в некоторых моделях это фаза может длиться существенно больше. В достаточно горячих или толстых моделях (при параметре Тумре  $Q = 2.0$  или толщине диска  $Z_d/R_d = 0.1; 0.2$ ) бар сохраняет вертикальную асимметрию в течении 4 млрд. лет. Важно заметить, что и сама фаза начинается сравнительно поздно в таких моделях, через 3-4 млрд. лет от начала моделирования. В результате оказывается, что галактики при определённых условиях в диске могут иметь асимметричный в вертикальном направлении бар на поздних стадиях своей эволюции. Если такая ситуация реализуется в природе, то она должна найти отражение в наблюдательных данных. Действительно, в некоторых недавних наблюдательных работах [9; 61; 62] указывается на возможность существования асимметричного в вертикальном направлении бара в трёх реальных галактиках. Небольшое количество таких галактик, по-видимому, говорит о том, что комбинация начальных параметров, при которой возникает длительная фаза потери баром вертикальной симметрии, все же сравнительно редка для реальных галактик. Более подробно этот вопрос будет обсуждаться в Главе 2.

Третья важная деталь касается одной из моделей с  $Q = 1.6$ . В этой модели фаза потери вертикальной симметрии завершается образованием четырёх дополнительных лучей. То есть X-структура становится двойной, с четырьмя внутренними лучами с большим углом раствора и четырьмя внешними с меньшим углом раствора. Отметим, что в работе [99] приводится пример схожих двойных X-структур для одной из моделей (см. рисунок 8 цитируемой работы), тоже достаточно горячей. По-видимому, подобные структуры не являются артефактом моделирования. Некоторые реальные галактики (NGC 128, NGC 2549) имеют сложную вертикальную структуру, характеризуемую авторами работы [47] как “вложенные арахисы”. Такие “вложенные арахисы” могут соответствовать как раз внутренней и внешней части двойной X-структуры. В Главе 4 ниже будет более подробно обсуждаться вопрос о двойной X-структуре в NGC 128 на основе фотометрической декомпозиции.

Четвёртая деталь связана с влиянием центрального компонента (классического балджа) на потерю баром вертикальной симметрии. В трёх рассматрива-

емых в настоящей работе моделях с различными параметрами балджа потери баром вертикальной симметрии не наблюдалось. В той же модели, но без балджа, бар терял свою вертикальную симметрию. Отметим, что влияние классического балджа на общую вертикальную эволюцию численных моделей уже ранее обсуждался в литературе. Так, в работе [73] было показано, что наличие в системе компактного массивного сфероидального балджа ведёт к подавлению изгибных возмущений в диске. Из результатов моделирования в данной работе вытекает, что балдж оказывает стабилизирующее влияние и на вертикальную эволюцию бара. Подробнее этот вопрос обсуждается в Главе 2. Заметим, что схожий стабилизирующий эффект, по-видимому, оказывает наличие массивного тёмного гало (см. Рис. 1.10).

### 1.5.3 Различные сценарии потери баром вертикальной симметрии

Описанные выше результаты показывают, что то, как происходит потеря баром вертикальной симметрии, зависит от свойств исходной системы. Все рассмотренные в данной главе модели можно условно разделить на четыре группы по характеру протекания вертикальной эволюции бара.

Первая группа характеризуется спокойной вертикальной эволюцией бара без каких-либо резких изменений. Заметим, однако, что на начальной стадии эволюции всё-таки может наблюдаться кратковременный изгиб бара ещё до формирования вертикальной составляющей бара. Вопрос о начальном изгибе бара, когда вертикальная компонента только начинает формироваться, интересен, однако специально не исследовался в данной работе. В дальнейшем он обсуждаться не будет. Как правило, модели со спокойной вертикальной эволюцией бара — это модели, где есть массивная сферическая компонента. Такой компонентой может быть классический балдж или тяжелое гало тёмной материи.

Вторая группа моделей характеризуется наличием фазы потери баром вертикальной симметрии с характерной длительностью примерно 1–2 млрд. лет. По окончании этой фазы бар восстанавливает своё симметричное состояние, и далее начинается спокойный эволюционный период. С началом фазы потери вертикальной симметрии средний угол раствора четырех лучей X-структуры увеличивается

примерно на  $5^\circ$ . После окончания фазы угол раствора X-структур снова начинает уменьшаться.

Перечисленные первые две группы моделей — это, как правило, модели с достаточно тонкими и холодными дисками,  $Q = 1.2$  и  $Z_d/R_d = 0.05$ . Третья же группа — это модели с достаточно толстыми ( $Z_d/R_d = 0.1; 0.2$ ) или горячими ( $Q = 2.0$ ) дисками. В таких моделях фаза потери баром вертикальной симметрии весьма длительная (от 4 млрд. лет и более). При этом X-структуры имеют сравнительно большой угол раствора ( $35^\circ - 40^\circ$ ), постепенно уменьшающийся со временем.

В четвёртую группу попадает только одна из рассмотренных моделей. Это модель с  $Q = 1.6$  и тонким диском ( $Z_d/R_d = 0.05$ ). В этой модели фаза потери вертикальной симметрии заканчивается формированием дополнительных лучей X-структуры. Сама X-структура становится двойной. По-видимому, эта модель есть промежуточный тип между моделями второй и третьей групп. Как уже отмечалось, по-видимому, такие X-структуры проявляются в наблюдениях [47].

Заметим, что ещё одна модель не входит в упомянутые группы и демонстрирует другой тип эволюции. Это модель с  $M_h = 1$  с самой маленькой из рассматриваемых масс гало. В ней происходит образование начального длинного бара, затем он разрушается, и образуется более короткий новый бар. Причём оба бара, и длинный бар, и короткий бар, успевают образовать X-структуру. Если во всех других моделях угол раствора X-структур со временем уменьшается (за исключением фазы потери вертикальной симметрии баром), то X-структура в этой модели имеет угол раствора  $36^\circ$  в начале своей эволюции и затем увеличивает его примерно до  $42^\circ$  после разрушения первичного бара. На всём последующем промежутке моделирования угол раствора так и остаётся вблизи этого значения. Также размер X-структуры практически не меняется в ходе её эволюции в отличие от других моделей.

Касательно физического механизма, вызывающего потерю баром вертикальной симметрии заметим следующее. В работах [57; 100] процесс потери вертикальной симметрии связывается с регулярными трехмерными орбитами, ответвляющимися от семейства плоских периодических орбит  $x_1$ , которые составляют костяк бара (см. например, [42]). В работе [57] показывается, что, когда бар находится в асимметричном состоянии, некоторые из таких орбит устойчивы с одной стороны от плоскости диска, и неустойчивы — с другой (см. рисунок 8b в работе [57]). В работе [100] показывается, что в период потери вертикальной

симметрии такие орбиты действительно имеют асимметричный вид, а после окончания фазы приобретают морфологию хорошо известных семейств регулярных орбит, ответвляющихся от семейства  $x1$  (например, 4:3, см. рисунок 9 в [100]). По-видимому, крупномасштабная асимметрия в некоторых рассмотренных моделях, прежде всего, в моделях с горячим диском, связана с асимметричными орбитами. Однако детальное выяснение этого вопроса требует отдельного обширного исследования и далее здесь не обсуждается.

## 1.6 Выводы главы

В данной главе исследовался вопрос о том, как исходные параметры моделей галактик такие, как количество частиц, масса гало или балджа, начальная толщина и значение параметра Тумре влияют на свойства X-структур при наблюдении галактики в положении “с ребра”. В более ранних работах и теоретически, и численно-экспериментально было показано, что рассмотренный набор параметров определяет динамику изгибных возмущений, а значит и вертикальную эволюцию звёздного диска в целом. Именно поэтому такой набор параметров и был выбран для исследования зависимости свойств X-структур от параметров галактики. Всего было рассмотрено восемнадцать различных моделей, шесть из которых имели одинаковые физические параметры, но имели различное количеством частиц в звёздном диске и гало, а тринадцать имели одинаковое количество частиц, но различные начальные значения физических параметров.

Для проверки влияния вертикальной релаксации звёздного диска на свойства X-структур был рассмотрен широкий диапазон, почти в два порядка величины, по числу частиц для представления звёздного диска от  $N_d = 2 \cdot 10^5$  до  $N_d = 8 \cdot 10^6$ . Оказалось, что, хотя все рассмотренные диски подвержены вертикальной релаксации, которая проявляется в увеличении толщины звёздного диска со временем, для  $N_{d,h} > 10^6$  углы раствора X-структур почти совпадают в пределах ошибки измерения угла и не зависят от количества частиц. В то же время увеличение количества частиц позволяет более точно определять пики плотности, и, тем самым, позволяет уменьшить погрешность измерения угла раствора. Согласно полученной оценке, для достижения удовлетворительного уровня точности в  $1^\circ - 2^\circ$ , сравнимого с точностью, получаемой в наблюдениях, следует

использовать большое количество частиц,  $N_d = 4 \cdot 10^6$ . Далее такое количество частиц использовалось для всех остальных моделей с различными физическими параметрами.

Рассмотрение широкого спектра моделей по физическим параметрам в данной главе позволило расширить список условий, при которых сформировавшийся бар теряет свою вертикальную симметрию в течение длительного промежутка времени. Важно отметить, что среди рассмотренных моделей, в том числе присутствовали модели, в которых бар так и остаётся вертикально асимметричным на протяжении всего времени моделирования. При этом на основе анализа моделей с различными массами гало и балджа были выявлены факторы, которые ведут к постепенной симметричной эволюции бара в вертикальном направлении. Такими факторами оказались наличие большой массы тёмного гало,  $M_h/M_d \geq 3$ , или наличие классического балджа. В случае балджа, для всех рассмотренных параметров балджа (три модели) эволюция бара в вертикальном направлении происходила симметрично.

Ещё один неожиданный, но важный результат касается существования двойных X-структур. Ранее такие структуры были выявлены только в работе [99] и не сравнивались с данными наблюдений. В данной работе впервые отмечается, что такие структуры не являются артефактом численного моделирования, и, по-видимому, были обнаружены в галактиках NGC 128 (см., однако, пункт 4.5.2 Главы 4) и NGC 2549.

Несмотря на существенные различия в вертикальной эволюции моделей, общая картина зависимости угла раствора X-структур от параметров галактики на качественном уровне оказалась весьма простой. X-структура может обладать большими углами раствора ( $30^\circ - 40^\circ$ ) вследствие различных факторов. Такими факторами могут быть большая начальная толщина диска, большое значение параметра Тумре, значительная масса балджа, маленькая масса тёмного гало и, наконец, эффекты проекции (поворот большой оси бара вокруг луча зрения). Напротив, список причин, из-за которых X-структуры имеют малые углы раствора,  $25^\circ - 26^\circ$ , существенно беднее. Из результатов моделирования в данной главе вытекает две возможные причины. Во-первых, малые углы получаются в том случае, если галактика имеет значительную массу тёмного гало в пределах оптического радиуса диска ( $M_h/M_d \geq 3$ ). Вторая причина заключается в том, что наблюдаемые X-структуры на самом деле могут быть вторичными, то есть измеряемые в наблюдениях лучи есть внешние лучи в двойной X-структуре. С точки зрения

наблюдений этот случай качественно отличается от случая большой массы гало, так как для двойных X-структур можно проверить наличие первичных (внутренних) лучей.

К сожалению, на нынешнем уровне точности измерений угла раствора и из-за различий в подходах к наблюдению X-структур доказать полученные зависимости с помощью наблюдательных данных не представляется возможным. Тем не менее, понимание общей сути этих зависимостей важно для будущих исследований, и в дальнейшем они могут быть проверены на новых наблюдательных данных.

## Глава 2. Связь центральной концентрации плотности и феномена длительной потери баром вертикальной симметрии

Данная глава подготовлена по материалам работы [101].

### 2.1 Введение

В общем Введении к настоящей работе уже подробно обсуждалось, как происходит образование V/PS балджей. Здесь же отметим, что утолщение бара в вертикальном направлении происходит быстро относительно общего времени жизни галактик. Как правило, весь процесс занимает несколько сотен миллионов лет. В работе [61] авторы использовали этот факт, чтобы объяснить редкость в реальных галактиках баров, асимметричных в вертикальном направлении. Однако, авторы [61] не учитывали возможность позднего продолжительного изгиба бара. Впервые существование такого феномена отмечено в работе [57]. В рассмотренных в Главе 1 моделях поздняя потеря симметрии баром происходила после образования V/PS балджа, примерно через 6-7 млрд. лет с начала моделирования. При этом бар оставался вертикально асимметричным в течение длительного интервала времени (около 3 млрд. лет). Наиболее сильно вертикальная асимметрия проявлялась в центральной части бара. Заметим также, что схожую картину эволюцию модельных баров можно увидеть в более ранних работах [54; 102]. Одна модель (модель с идентификатором RCG051A) из работы [58] с очень легким балджем также демонстрировала по крайней мере два эпизода потери баром вертикальной симметрии. Первичная вертикальная деформация бара также происходила весьма быстро, в то время как фаза вторичной потери баром вертикальной симметрии была более продолжительной.

Как уже упоминалось, наблюдательная статистика асимметричных в вертикальном направлении баров весьма бедна [61]. Это ставит вопрос, действительно ли бары реальных галактик проходят через позднюю и продолжительную фазу потери вертикальной симметрии, которая наблюдается для модельных баров.

В работе [57] авторы отмечают, что, хотя, в принципе, бары в асимметричном состоянии можно обнаружить в реальных галактиках, существует по крайней

мере два фактора, препятствующих развитию вертикальной асимметрии бара. Одним из таких факторов является наличие в галактике газа. Численное моделирование в работах [53; 56; 103] показало, что если заданная физика газа позволяет газу падать в центр диска (что ведёт к увеличению центральной концентрации плотности) изгибная неустойчивость может быть полностью подавлена. В этом случае бар будет сохранять свою вертикальную симметрию в ходе своей эволюции. Наличие газа в галактиках поздних типов объясняет, почему такие галактики, как правило, не демонстрируют баров с характерными ящикообразными изофотами, если галактика видна плашмя [9; 62]. Бары с изофотами как раз такой формы являются возможными кандидатами в вертикально асимметричные бары [61]. Что касается галактик ранних типов, в которых, как правило, мало газа, то причины того, почему в них не наблюдаются асимметричные в вертикальном направлении бары, пока не ясны.

В работе [57] упоминались некоторые “неблагоприятные начальные условия”, при которых у бара не развивается вертикальной асимметрии (см. заключение в [57]). К сожалению, авторы [57] не рассматривали этот вопрос подробно. В Главе 1 было показано, что, напротив, “благоприятные условия”, при которых у бара может развиваться вертикальная асимметрия, которая при этом ещё и сохраняется на длительном промежутке времени, весьма распространены, по крайней мере, в моделях без газа. Так, бар, образующийся в холодном изотермическом звёздном диске с отношением длин вертикального и радиального масштабов  $Z_d/R_d = 0.1$ , погружённым в тёмное гало с профилем Наварро-Фрэнк-Вайта [75], сохранял вертикальную асимметрию в течение 4 млрд. лет. Более того, почти все модели с различными начальными условиями, рассмотренные в Главе 1, демонстрировали схожее поведение. Было найдено всего два типа моделей, в которых вторичный изгиб бара оказывался полностью подавлен. Первая тип — это модели, в которые изначально включался классический балдж, а второй — это модели с тяжелым тёмным гало,  $M_h(R < 4R_d)/M_d \gtrsim 3$ <sup>1</sup>. Другими словами, сферические подсистемы, состоящие из звёзд или тёмной материи и увеличивающие центральную концентрацию, имеют тенденцию ослаблять изгибную неустойчивость, точно так же, как это делает газовая составляющая. В работе [73] схожий вывод был получен на основе анализа модифицированного

<sup>1</sup>В работе [58] также приводится пример модели с очень тяжелым гало, в которой вертикальная эволюция происходит симметрично, при этом образуется бар и слабо выраженная арахисоподобный балдж; модель RHG057.

дисперсионного уравнения для изгибных возмущений [104] и подтверждён рядом численных экспериментов.

Анализ нескольких моделей, рассмотренных как в [73], так и в Главе 1 в настоящей работе, не позволяет оценить, насколько сильно сферические подсистемы влияют на развитие вторичной асимметрии у бара. Является ли эффект настолько сильным, что любые изгибные возмущения в баре оказываются затухающими, или же потеря вертикальной симметрии все же будет происходить, но на самых поздних стадиях эволюции? На этот вопрос важно ответить, чтобы понять, среди каких галактик стоит искать бары асимметричные в вертикальном направлении.

В настоящей Главе будет исследовано влияние классического балджа на позднюю потерю баром вертикальной симметрии. Прежде всего, будет исследовано, при каких условиях эволюция бара будет происходить симметричным образом в вертикальном направлении. Аналогично тому, как это было сделано в Главе 1 будет рассмотрен ряд численных моделей с высоким пространственным разрешением. Будет рассмотрено два типа моделей. Первый тип — это модели без классического балджа, уже рассмотренные в Главе 1. У таких моделей бары, как правило, проходят через фазу поздней потери вертикальной симметрии. Для каждой из этих моделей будет построена аналогичная модель с теми же самыми начальными параметрами, но с добавлением небольшой балдж-компоненты в центре. Будет проведён сравнительный анализ эволюции этих двух типов моделей и будут получены выводы о критической массе центральной компоненты, необходимой для симметричной эволюции бара.

## 2.2 Численные модели

На примере нескольких численных моделей в Главе 1 в явном виде было показано, что в моделях с различными значениями начальных параметров вертикальная эволюция баров проходит по-разному. И в том числе по-разному происходит и поздняя потеря баром вертикальной симметрии. Для более подробного изучения влияния классического балджа на вертикальную эволюцию бара проведём сравнительный анализ двух наборов моделей. Первый набор - это несколько моделей, уже рассматривавшихся в Главе 1, у которых бар демон-

Таблица 3 — Параметры моделей

$M_h(r < 4R_d)$	$z_d/R_d$	$Q$	$M_b$	$r_b$	$N_b, kk$
1.0	0.05	1.2	0	—	—
1.0	0.05	1.2	0.2	0.2	0.8
1.5	0.05	1.2	0	—	—
1.5	0.05	1.2	0.2	0.2	0.8
1.5	0.05	1.6	0	—	—
1.5	0.05	1.6	0.2	0.2	0.8
1.5	0.1	1.2	0	—	—
1.5	0.1	1.2	0.2	0.2	0.8
1.5	0.2	1.2	0	—	—
1.5	0.2	1.2	0.05	0.4	0.2
1.5	0.2	1.2	0.05	0.2	0.2
1.5	0.2	1.2	0.1	0.2	0.4
1.5	0.2	1.2	0.2	0.2	0.8
1.5	0.2	1.2	0.3	0.2	1.2

*Описание:* в каждой строке указываются параметры моделей, по одной модели в одной строке. Параметры:  $M_h(R < 4R_d)$  — масса гало в единицах массы диска  $M_d$  внутри сферы радиуса  $R = 4R_d$ , где  $R_d$  — радиальный масштаб диска,  $z_d/R_d$  — начальное отношение вертикального и радиального масштабов диска.  $M_b$  и  $r_b$  — масса и характерный линейный масштаб балджа, соответственно,  $N_b$  — количество частиц в балдже.

стрирует долговременный эпизод потери вертикальной симметрии. Для каждой модели из этого набора рассмотрим аналогичную модель с теми же самыми физическими параметрами, но с добавленным классическим балджем (второй набор). Также, для определения граничной масса балджа, при которой потеря баром вертикальной симметрии все же возможна, для одной модели с толстым диском  $Z_d = 0.2$  рассмотрим широкий диапазон начальных параметров балджа. Всего будет рассмотрено, таким образом, четырнадцать различных моделей. Для единообразия новые модели строились так же, как это было сделано в пункте 1.2 Главы 1.

Коротко напомним, что каждая модель включает в себя звёздный диск экспоненциальный в радиальном направлении с радиальным масштабом  $R_d$  и изотермический в вертикальном с вертикальным масштабом  $Z_d$  и общей массой  $M_d$  (см. выражение (1.2) в Главе 1), погруженный в тёмное гало типа НФВ

(выражение (1.3) в Главе 1). Профиль плотности начального классического балджа определяется профилем Хернквиста (выражение 1.5 в Главе 1). Диск и гало представляются наборами частиц из  $4kk$  и  $4.5kk$  соответственно. Число частиц в балдже определяется таким образом, чтобы масса одной частицы диска была равна массе одной частицы балджа. В Таблице 3 приведены наиболее важные параметры моделей. Пять из них имеют классические балджи со значениями массы и характерного радиального масштаба  $M_b = 0.2$  и  $r_b = 0.2$ , соответственно. Такие значения представляются типичными для балджей реально наблюдаемых галактик (см., например, [105]). Отметим, что рассматриваются звёздные диски как различной начальной толщины (от  $Z_d/R_d = 0.05$  до  $0.2$ ), так и различной степени динамической нагрева (значения параметра Тумре  $Q = 1.2$  и  $Q = 1.6$ ).

Как и в Главе 1, начальное равновесное состояние моделей приготавливалось с помощью скрипта для построения равновесной многокомпонентной модели галактики `mkgalaxy` [83] из программного пакета NEMO [84]. Уравнения движения решались интегратором `gyrfalcon` [90] на промежутке времени примерно 8 млрд. лет. При расчётах использовалась естественная система единиц:  $M_d = M_u = 1$ ,  $R_d = R_u = 1$  и  $G = 1$ .

### 2.3 Сравнительный анализ вертикальной эволюции бара в моделях с балджем и без балджа

Все модели из Таблицы 3 эволюционируют схожим образом. В осесимметричном диске образуются небольшие волны плотности, которые затем постепенно растут, и через какое-то время образуется бар. Примечательно, что в моделях с балджами, как правило, бары формируются дольше. Это согласуется с предыдущими исследованиями влияния балджа на морфологию бара в плоскости [106; 107].

Эволюция амплитуды и скорости узора бара для всех моделей показаны на Рис. 2.1. В моделях с балджем бар формируется примерно на 1.5 млрд. лет позже, чем в моделях без балджа. В модели с толстым диском ( $Z_d = 0.2$ ) задержка формирования ещё больше ( $\gtrsim 2$  млрд. лет). При этом к 8 млрд. лет бары в моделях без балджа и с балджем показывают схожие значения скорости узора независимо от начальной толщины диска или параметра Тумре  $Q$ .

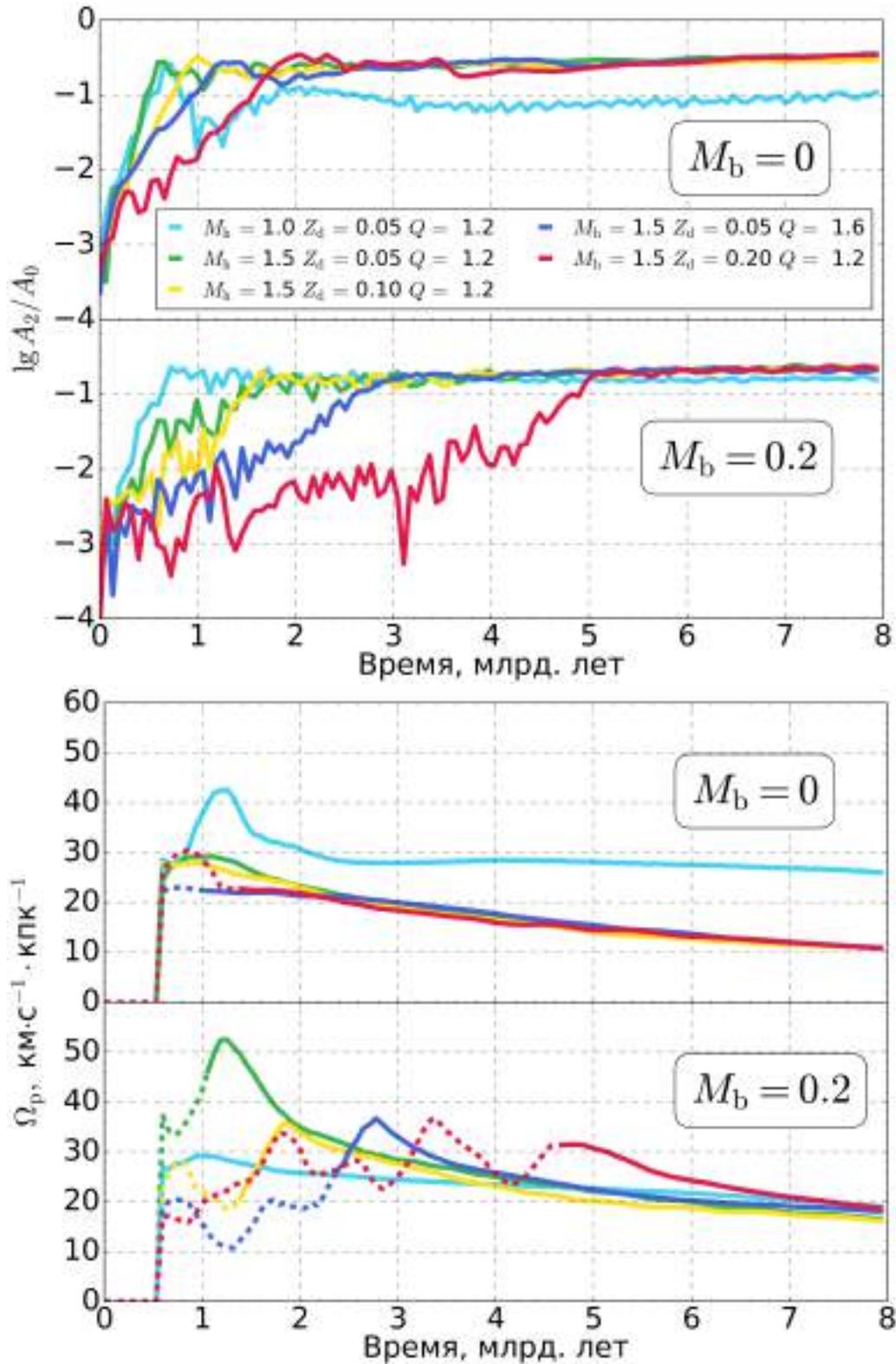


Рис. 2.1 — Десятичный логарифм нормированной амплитуды (сверху) и скорость узора (снизу) бара в моделях без балджей и с балджами (верхняя и нижняя панели, соответственно) и с различными начальными параметрами звёздного диска (различными цветами, см. легенду самого верхнего графика). Пунктирными линиями на правой панели отмечен период времени, когда бар еще не сформировался, то есть  $A_2/A_0 < 0.05$ .

В литературе предложено несколько различных параметров, по значению которых можно судить об амплитуде вертикальных возмущений и определять промежутки времени, на котором такие возмущения наиболее активны [37; 56—58; 103; 108]. Так, динамику изгибных возмущений можно отслеживать по резкому спаданию амплитуды бара  $A_2$  или изменению отношения дисперсий скоростей  $\sigma_z/\sigma_R$  со временем. Также изгибные возмущения можно отследить по изменению средней толщины диска  $\langle z \rangle$  [108]. Чаще всего оценивают изменение Фурье-компоненты  $A_{1z}$  с азимутальным числом  $m = 1$  ( $xz$ ) проекции распределения плотности  $\rho_{xz}$ . При этом предполагается, что большая ось бара должна быть выстроена вдоль оси  $x$  [108]. Пробный расчёт этой величины для рассмотренных моделей показал, что она оказывается сильно зашумленной, если учитывать все частицы диска. Для уменьшения же шума необходимо выделять определенную область, в которой должны быть заключены все частицы бара, и в этой области проводить расчёт величины  $A_{1z}$ . Поскольку бары в различных моделях имеют разные характерные размеры, а также, как правило, изменяют их со временем, выделение подобной области на каждый момент времени для всех моделей оказывается весьма не удобным. Поэтому для характеристики изгиба бара будем использовать другой параметр, а именно параметр асимметрии  $S_{\text{bar}}$ , уже ранее использовавшийся в Главе 1. Он вычисляется следующим образом:  $S_{\text{bar}} = (A_2(z > 0) - A_2(z < 0))/A_2$ , где  $A_2(z > 0)$  — амплитуда бара над плоскостью диска ( $z > 0$ ), а  $A_2(z < 0)$  — амплитуда бара под плоскостью диска ( $z < 0$ ). При использовании данного параметра уровень шума оказывается довольно низким (если амплитуда самого бара не близка к нулю), даже если учитываются все частицы диска. Заметим также, что данный параметр не подходит для анализа изгибных возмущений, не влияющих на бар. Например, для анализа мелкомасштабных изгибных возмущений, возникающих на начальных этапах эволюции модели. В данной главе исследуются продолжительные стадии потери баром вертикальной симметрии, поэтому использование параметра асимметрии  $S_{\text{bar}}$  правомерно.

Согласно определению параметр асимметрии может принимать значения от  $-1$  до  $1$ . При этом положительные значения соответствуют случаю, когда амплитуда бара над плоскостью диска больше  $A_2(z > 0)$ , чем амплитуда бара под плоскостью диска  $A_2(z < 0)$ , отрицательные же значения возникают в обратном случае. Без потери общности и для упрощения дальнейшего обсуждения будем рассматривать только абсолютные значения параметра асимметрии  $|S_{\text{bar}}|$ .

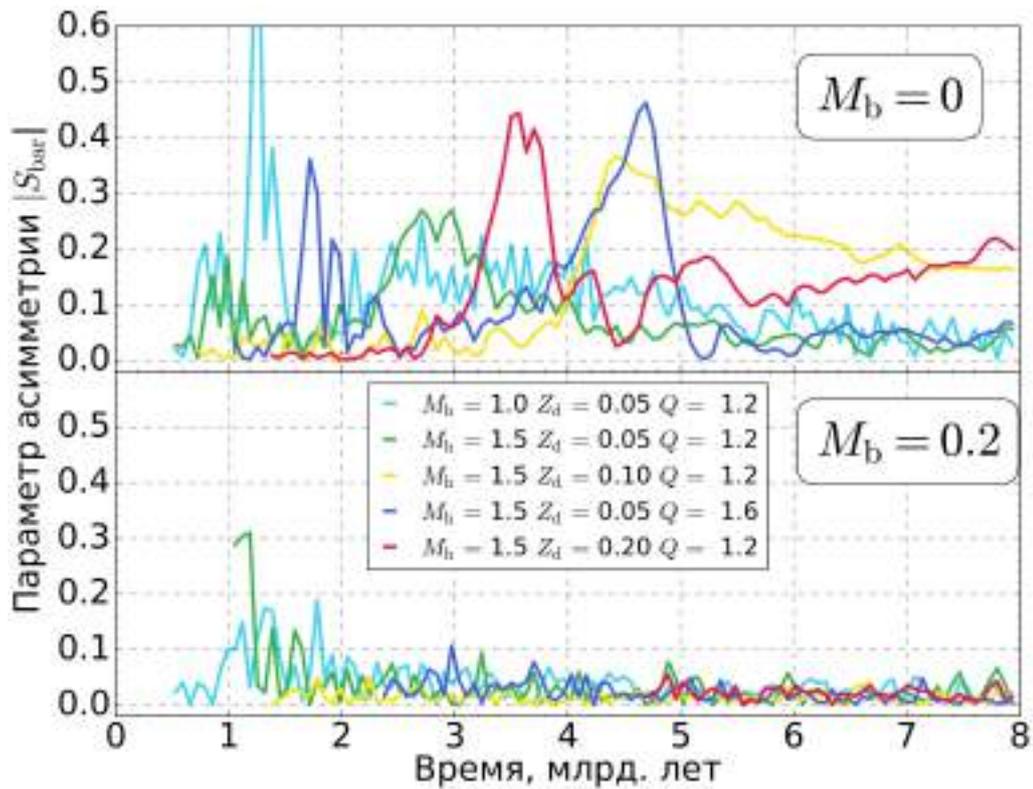


Рис. 2.2 — Абсолютное значение параметра асимметрии  $|S_{\text{bar}}|$  (подробности см. в тексте) для моделей без балджей и с балджами (верхняя и нижняя панели, соответственно) и с различными начальными параметрами звёздного диска (различными цветами, см. легенду на нижнем графике). *Примечание:* все кривые откладываются на промежутке времени после формирования бара, то есть когда  $A_2/A_0 \gtrsim 0.05$  в соответствующей модели (подробности см. в тексте).

Рис. 2.2 показывает, как меняется абсолютное значение параметра асимметрии со временем для моделей без балджа и для тех же моделей, но с балджем с  $M_b = 0.2$  и  $r_b = 0.2$ . Отметим, что все зависимости построены не от начала времени моделирования, а от момента формирования бара. Дело в том, что до этого момента времени параметр асимметрии показывает колебания, возникающие из-за того, что амплитуда бара  $A_2$  близка к нулю (см. Рис. 2.1). В этом случае в знаменателе выражения для  $S_{\text{bar}}$  возникают маленькие числа. Такие колебания параметра асимметрии не отражают крупномасштабного изгиба бара, и далее они не рассматривались. За момент формирования бара будем принимать момент времени, когда  $A_2/A_0$  становится больше, чем  $5 \cdot 10^{-2}$ . Примерно при таких значениях амплитуды бар начинает отождествляться визуально в рассмотренных моделях. Как правило, время формирования бара составляет 1-2 млрд. лет, но в некоторых случаях бар образуется только через 3-4 млрд. лет (случай  $Q = 2.0$ ). Дальнейшая эволюция во многом зависит от исходных параметров модели. Важный результат, который непосредственно следует из Рис. 2.2, заключается в том, что все модели с балджем имеют вертикально симметричный бар на все моменты времени

( $|S_{\text{bar}}| \approx 0$ ), в то время как аналогичные модели, но без балджа, демонстрируют явную потерю баром вертикальной симметрии ( $|S_{\text{bar}}|$  заметно больше нуля.). Влияние балджа наиболее ярко проявляется в модели с толстым начальным диском  $Z_d = 0.2$ . В модели без балджа верхняя часть бара (часть с  $z > 0$ ) имеет в два раза большую массу, чем нижняя (часть с  $z < 0$ ) при  $T \approx 3.5$  млрд. лет. Затем бар в течение долгого времени сохраняет асимметричное состояние. В то же время в модели с балджем эволюция бара происходит полностью симметрично. Ещё раз заметим, что влияние балджа одинаково для всех рассмотренных моделей: поздний изгиб бара оказывается полностью подавлен независимо от начальных параметров диска.

Что касается первичной потери вертикальной симметрии, Рис. 2.2 здесь может вводить в заблуждение. Не все модели без балджа демонстрируют первичную потерю баром вертикальной симметрии (см. модель с  $M_h = 1.5$  и  $Z_d = 0.1$ ). С другой стороны, в некоторых моделях с балджем на начальных стадиях такая асимметрия явно присутствует. Так, например, бар в модели с  $M_h = 1$  и  $M_b = 0.2$  демонстрирует асимметрию вертикального распределения массы в баре на уровне примерно 20% на момент времени  $T = 1.5$  млрд. лет. Модель с  $M_h = 1.5$  и балджем имеет даже чуть более выраженную асимметрию бара на момент времени 1 млрд. лет (30%), чем схожая модель без балджа (20%). Для всех остальных моделей наличие балджа действительно подавляет первичные изгибные возмущения в баре. Объяснение этих закономерностей требует тщательного изучения начальных стадий вертикальной эволюции бара и изгибов звёздного диска в целом в различных моделях. Как правило, такие возмущения развиваются на весьма короткой шкале времени. Для сравнения же с данными наблюдениями в первую очередь важно исследовать длительные фазы потери баром вертикальной симметрии. Поэтому далее в настоящей работе вопрос о начальных изгибных возмущениях в барах более затрагиваться не будет.

#### 2.4 Определение граничных параметров классического балджа, при которых поздний изгиб бара возможен

Результаты, описанные выше, показывают, что наличие в системе балджа малой массы предотвращает позднюю потерю баром вертикальной симметрии

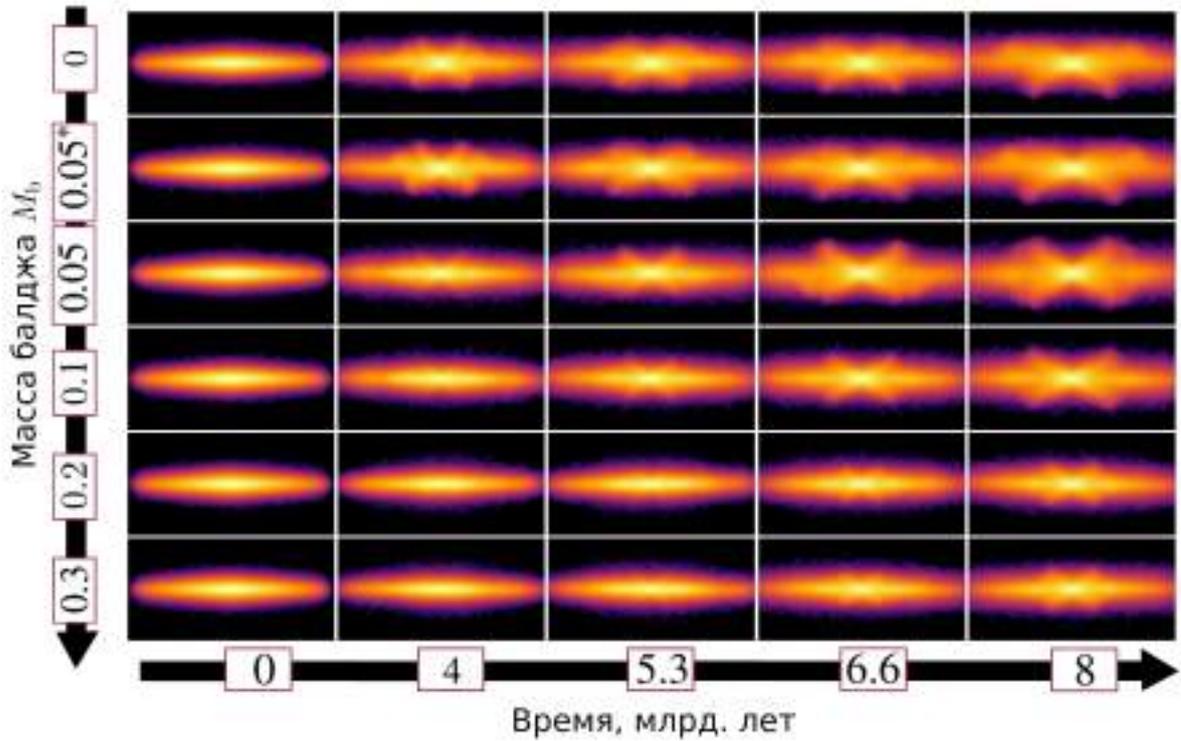


Рис. 2.3 — Вид с ребра моделей с различными вкладами классического балджа на различные моменты времени; символом “\*” обозначается модель с линейным масштабом балджа  $r_b = 0.4$ . Центральная концентрация увеличивается сверху вниз, время увеличивается слева направо. С увеличением центральной концентрации бар становится вертикально симметричными (см. верхний правый угол). Размер каждого прямоугольника составляет  $5 \times 2.5$  в единицах длины  $R_d$ .

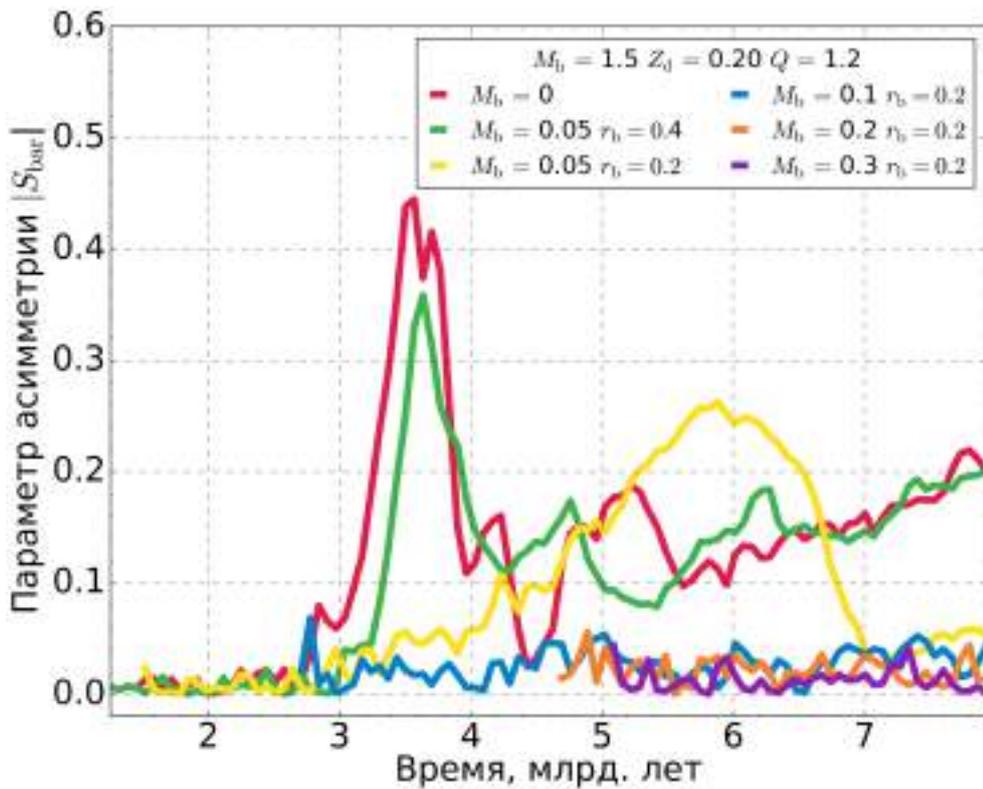


Рис. 2.4 — То же, что и на Рис. 2.2, но для моделей с различными параметрами балджа и фиксированными параметрами диска.

бара. В данном пункте попробуем ответить на следующий важный вопрос: насколько малой должна быть центральная концентрация, чтобы бар всё же терял свою вертикальную симметрию на поздних стадиях эволюции. Для нахождения граничной массы балджа рассмотрим дополнительную серию моделей с балджами различной массы (см. Таблицу 3). В качестве основной модели без балджа рассмотрим модель с изначально толстым диском  $Z_d = 0.2$ . В этой модели вертикальная асимметрия бара проявляется сильнее всего среди всех рассмотренных в настоящей работе моделей.

Изображения моделей с различными вкладами классического балджа на различные моменты времени показаны на Рис. 2.3. На Рис. 2.4 показана эволюция параметра асимметрии в этих моделях. Видно, что для балджей с массами  $M_b \geq 0.1$  вторичная потеря вертикальной симметрии не проявляется ( $|S_{\text{bar}}(t)| \lesssim 0.1$ ). В модели же с  $M_b = 0.05$  и  $r_b = 0.4$  наблюдается продолжительная потеря баром вертикальной симметрии, и бар вертикально асимметричен на все моменты времени, как и в модели без балджа. Модель с балджем такой же малой массы, но при этом более концентрированным ( $r_b = 0.2$ ), показывает другое поведение. Хотя вертикальная асимметрия и наблюдается на поздних стадиях эволюции бара, она сохраняется в течение 2-3 млрд. лет и к 8 млрд. лет всё же полностью исчезает. Отсюда следует, что важна не столько масса, сколько центральная концентрация вещества, которая определяется как массой  $M_b$ , так и характерным размером  $r_b$ , в пределах которого эта масса сосредоточена. В целом же модель с  $M_b = 0.05$  демонстрирует, что бары, асимметричные в вертикальном направлении, могут наблюдаться в настоящее время, если центральная концентрация достаточно мала,  $M_b < 0.1M_d$  и  $r_b > 0.2R_d$ . Полученный результат показывает, что масса балджа, достаточная для предотвращения развития вертикальной асимметрии бара, довольно мала, меньше типичных наблюдаемых значений масс балджей для реальных галактик (см. например, [105]). Здесь также важно отметить, что модель без балджа и толстым диском с  $Z_d = 0.2$  демонстрирует один из самых мощных эпизодов вторичной потери вертикальной симметрии среди всех рассмотренных в настоящей работе моделей. Отсюда можно заключить, что и для остальных моделей, где поздняя асимметрия бара развивается менее мощно, классические балджи с типичными параметрами также должны подавлять её развитие. Таким образом, можно заключить, что классические бары предотвращают возникновение баров, асимметричных в вертикальном направлении, для широкого диапазона условий в звёздных дисках.

## 2.5 Обсуждение результатов главы

Была рассмотрена серия моделей с широким диапазоном начальных параметров звёздного диска. В каждой модели добавление классического балджа малой массы и типичных размеров предотвращает развитие поздней вертикальной асимметрии у бара почти независимо от начальных условий в звёздном диске. Этот результат дополняет хорошо известный эффект ослабления изгибной неустойчивости за счет увеличения центральной концентрации, вызываемого постоянным падением охлаждающегося газа в центр звёздного диска [53; 109]. Если последний эффект объясняет, почему асимметричные бары, вероятно, не могут наблюдаться в галактиках поздних типов (где газ составляет значительную долю массы), полученные в данной главе результаты объясняют, почему галактики ранних типов (в которых обычно присутствуют классические балджи) не демонстрируют вертикально асимметричных баров. Таким образом, развитие вертикальной асимметрии успешно предотвращается за счет повышенной центральной концентрации в галактиках как ранних, так и поздних типов.

Означают ли полученные результаты, что вторичная потеря баром вертикальной симметрии не может быть обнаружена для реальных галактик? Рассмотрим этот вопрос подробно.

Во-первых, уже отождествлено три галактики промежуточных морфологических типов с характерной трапециевидной формой внутренних изофот [61; 62]. Такая форма изофот является косвенным признаком вертикальной асимметрии бара [61]. Однако стоит отметить, что одна из галактик (NGC 3227) взаимодействует с карликовой эллиптической галактикой NGC 3226. Более того, обе галактики заключены в общий кокон из звёзд и теплого газа, предположительно являющийся результатом слияния с третьей галактикой [110]. Отметим также, что один из кончиков изофот в области бара в NGC 3227 направлен точно в сторону спутника NGC 3226. То есть форма изофот в NGC 3227 может быть сильно искажена за счет взаимодействия, и не ясно, является ли наблюдаемая особенность изофот следствием изгиба бара, аналогичного тому, что наблюдается в модельных галактиках, или особенностью взаимодействия.

Во-вторых, ниже приводятся данные наблюдений, которые косвенно указывают на то, что бары в некоторых наблюдаемых галактиках все же могут

проходить через позднюю стадию потери вертикальной симметрии (и, следовательно, могут наблюдаться).

1. Недавние исследования  $S0$  галактик показывают, что  $S0$  галактика может иметь не классический, а дисковый балдж [111; 112] или даже составную структуру, состоящую из очень маленького классического балджа и дискового псевдобалджа [113]. В некоторых из таких галактик линия  $H\alpha$  не наблюдается. В отсутствие газа и классического балджа вертикальная асимметрия бара, по-видимому, может развиваться. Дополнительные наблюдательные исследования таких галактик могут показать, есть ли в них какие-либо доказательства вертикальной асимметрии бара.

2. В работе [48] было показано, что в моделях с концентрированным балджем в баре формируется так называемая барлинза. Барлинзы имеют небольшие размеры (линейный размер примерно половина или меньше большой оси бара). В проведенных в настоящей работе численных экспериментах модели с концентрированными балджами не демонстрируют заметной потери вертикальной симметрии (за исключением одной модели с легким, но концентрированным балджем). В то же время в работе [48] был определен класс галактик, в которых барлинза занимает практически всю внутреннюю область диска, а бар проявляется только в виде небольших ручек у края линзы (класс “e” в цитируемой работе). В рассмотренных моделях такая морфология возникает в случае горячего или толстого звездного диска без классического балджа, где бар, в свою очередь, проходит через позднюю стадию потери вертикальной симметрии. Такие галактики следует в дальнейшем исследовать на предмет вертикальной асимметрии бара.

3. Наконец, недавние исследования галактик  $S2B$  [114] показали, что внутренний бар некоторых галактик также демонстрирует наличие  $X$ -структуры (наряду с внешним баром и его  $X$ -структурой). Наличие двух  $X$ -структур, внешней и внутренней, может быть следствием прохождения бара через две фазы потери вертикальной симметрии, когда внутренняя  $X$ -структура формируется во время первой фазы потери вертикальной симметрии, а внешняя  $X$ -структура образуется во время второй.

Хотя в настоящей главе получено, что сферическая подсистема (классический балдж) довольно малой массы ведет к сохранению вертикальной симметрии бара, по-видимому, всё же могут существовать условия, при которых наличие классического балджа и газа в центра недостаточно, чтобы предотвратить развитие вертикальной асимметрии. Основываясь на описанных выше фактах, ис-

ключать наличие поздней стадии вертикальной асимметрии бара и её последствий для динамики реальных галактик, по-видимому, нельзя. Если же среди перечисленных выше объектов вертикальная асимметрия бара не будет обнаружена, необходимо будет искать другие причин, помимо газа и классических балджей, которые могут вести к подавлению развития вертикальной асимметрии.

## Глава 3. Природа X-структур в рассмотренных моделях

Данная глава подготовлена по материалам работы [115].

### 3.1 Введение

В Главе 1 подробно обсуждалась зависимость параметров X-структур от параметров модельных галактик. В то же время, вопрос о том, *почему X-структуры в моделях имеют различные параметры*, подробно не обсуждался. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо, прежде всего, понять, как устроены или, более точно, из каких орбит состоят X-структуры в построенных моделях. Настоящая глава посвящена решению этого вопроса.

Во-первых, если говорить о структуре в плоскости, бары представляют собой стоячую волну плотности, образованную синхронно прецессирующими орбитами [74]. Среди таких синхронно прецессирующих орбит можно выделить так называемые семейства периодических орбит. В случае бара самым важным из семейств является семейство орбит  $x_1$  [116]. Это плоские орбиты, вытянутые вдоль большой оси бара, у которых на две радиальных осцилляции приходится один оборот вокруг центра. Семейство орбит  $x_1$  также принято называть “костяком” бара [74]. При возмущении в вертикальном направлении из таких плоских орбит семейства  $x_1$  образуются новые семейства орбит, протяженные в вертикальном направлении. О них речь и пойдет ниже.

Ранее вопрос о вертикальной структуре баров уже рассматривался в работах [23; 40—44; 46]. В этих работах орбиты изучались, как правило, в аналитических потенциалах, в которых потенциалы компонент (диска, бара и балджа) жестко заданы. Важным результатом данных работ является нахождение выделенного семейства орбит  $x_1v_1$  (в терминах, введенных в работе [41]) или VAN (в терминах, используемых в работе [23]), которое возникает в том случае, когда в системе есть вертикальный резонанс 2:1 (то есть у орбиты звезды на таком резонансе на два вертикальных колебания приходится один оборот вокруг центра). Орбиты этого семейства часто называют “бананообразными” орбитами из-за их характерной формы, напоминающей банан, если смотреть на орбиту под опре-

деленным ракурсом. В [23; 40—44] это семейство орбит рассматривалось как основное семейство орбит, населяющее В/PS балджи реальных галактик. В работах [43; 117] было показано, что это же семейство орбит может создавать X-структуры. X-структура возникает в том случае, когда  $z$ -максимумы орбит  $x1v1$  последовательно выстраиваются вдоль некоторой линии. X-структура при этом есть огибающая этих максимумов. Семейства орбит более высоких порядков так называемого дерева орбит  $x1$  (3:1 или даже 4:1) также могут вносить вклад в В/PS балдж в некоторых потенциалах на больших расстояниях от центра [41; 117]. В работе [45] было показано, что ещё одно семейство орбит с характерным профилем в виде символа бесконечности ( $x1v2$  или АВАН), отделяющееся от семейства  $x1$  на вертикальном резонансе 2:1, также может вносить вклад в X-структуру.

Однако, недавно Портейлом и др. [118] были получены результаты, плохо согласующиеся с уже упомянутыми. Авторы исследовали орбитальную структуру типичной модельной галактики с баром. Модель включала экспоненциальный диск и гало НФВ [75]. Каждая из компонент при этом представлялась набором частиц. Периодические трёхмерные орбиты, связанные с вертикальным резонансом 2:1, оказались немногочисленны в такой модели и вносили вклад в вертикальную структуру бара в основном в его внешних областях. Авторами было высказано предположение, что орбиты, связанные с вертикальным резонансом 5:3 (так называемые орбиты-“брецельки”), ответственны за образование X-структуры во внутренних частях бара.

Орбитальный состав В/PS балджей, возникающих в модельных галактиках, рассматривался и в ряде других работ. В [51; 52; 119] орбиты в модели изолированной дисковой галактики исследовались при помощи метода “замороженного” потенциала, как и в уже упомянутой работе [118]. В [120] орбиты отслеживались прямо в меняющемся потенциале модели карликовой галактики с приливным баром. В [51] исследовалось две модели бара, возникающие в самосогласованных моделях экспоненциального диска и гало НФВ. Авторами [51] были оценены вклады различных семейств орбит. Для рассмотренных в этой работе моделей было найдено, что наиболее населенным семейством является так называемое семейство ящикообразных орбит, а не  $x1$ . В работе [52] те же модели использовались для определения семейств орбит, которые могли бы формировать X-структуру в галактике типа Млечного Пути. Результаты [52] в целом согласуются с выводами [118]. И, как и результаты, полученные в [118], они ставят под сомнение роль резонансных орбит 2:1 в формировании X-структур. В моделях,

рассмотренных Валури и др. [51] и Эбботом и др.[52], таких орбит оказалось немного, около 3% всех орбит бара, и они вносили вклад в вертикальную структуру бара в основном на его периферии. При этом отметим, что в работах других авторов [119; 120] было найдено значительное количество VAN-орбит. При этом в одной из этих работ [120] было найдено и множество других типов орбит помимо орбит 2:1 особенно во внутренней части бара (см. рисунок 10 цитируемой работы).

Противоречивые результаты относительно орбитального состава V/PS балджей и X-структур, представленные выше, могут быть обусловлены тем, что рассматриваемые в различных работах модели сильно различаются. В случае жестко заданного модельного потенциала это чаще всего диск Миямото-Нагаи [121], на который накладывается модельный потенциал трёхосного Ферреровского эллипсоида, представляющий бар и небольшой балдж. В работах, в которых рассматривается такой вид потенциалов, семейство периодических орбит  $x1v1$  рассматривается как основной строительный блок V/PS балджей. Напротив, в случае самосогласованных моделей галактик  $N$ -тел, как правило, рассматриваются другие потенциалы. В этом случае типичная модель состоит из экспоненциального диска, гало типа НФВ и бара, который формируется в ходе эволюции такой модели. Хотя такие модели могут различаться по изначально заданному набору параметров, все они демонстрируют малую долю орбит  $x1v1$ <sup>1</sup>. Также отметим, что постепенно в области нелинейной динамики внимание начинается уделяться орбитами, происходящим не от орбит семейства  $x1$ . Так, в недавней работе [46] было изучено происхождение так называемых мультипериодических орбит. Авторы показали, что большинство таких орбит может быть связано с резонансными орбитами-“ящичками”, найденными в модельных расчётах. Они имеют профиль, отличный от “банана” или знака бесконечности.

Косвенным подтверждением того факта, что V/PS балджи различных моделей галактик могут иметь различный орбитальный состав также служат результаты, представленные в Главе 1. Как было показано, и общая морфология X-структур, и характерные параметры X-структур зависят от параметров подстилающей галактики. В частности, углы раствора X-структур, протяженность лучей

<sup>1</sup>Результаты двух работ [57; 119], в которых рассматривался потенциал модели галактики  $N$ -тел, отличаются по следующим причинам. В работе [119] авторы используют также диск Миямото-Нагаи. Модель [57] состояла из экспоненциального диска и гало, но авторы исследовали не орбитальный состав V/PS балджа, а только роль орбит  $x1v1$  и  $x1v2$  в формировании X-структуры.

и их яркость сильно зависят от вклада темного гало в общий гравитационный потенциал, начальной толщины диска и значения параметра Тумре  $Q$ . При этом некоторые динамически горячие в плоскости диска модельные галактики, рассмотренные в Главе 1, даже демонстрировали двойные X-структуры со вторичной X-структурой более плоской и протяженной, чем первичная.

Данные наблюдений также свидетельствуют, что, по-видимому, существуют различные типы X-структур. Так, как уже отмечалось, углы раствора наблюдаемых X-структур лежат в диапазоне от  $20^\circ$  до  $45^\circ$  [47—49], и такой диапазон углов раствора, по-видимому, не объясняется только эффектами проекции. В работе [96] также было отмечено, что X-структуры бывают двух типов: центрированные (точка пересечения лучей лежит в центре диска) и смещённые относительно центра (лучи пересекаются не в центре).

Ясно, что наблюдаемая морфология X-структур должна определяться орбитальным составом самой X-структуры. И главный вопрос не в том, какие орбиты, поддерживающие V/PS балдж или X-структуру, могут существовать в теории, а в том, какие из них конкретно проявляются в том или ином потенциале. В данной главе будет показано, что наблюдаемое разнообразие X-структур может быть объяснено преобладанием в V/PS балдже тех или иных типов квазипериодических орбит.

Для этого будут проанализированы реальные орбиты частиц, движущихся в самосогласованном потенциале двух различных модельных галактик, уже рассмотренных в Главе 1.

В большинстве работ, выполненных на сегодняшний день, орбиты анализировались либо в аналитическом, либо в так называемом “замороженном” потенциале, который получается из потенциала модели  $N$ -тел, если зафиксировать потенциал последней на какой-то выбранный момент времени после образования бара и V/PS балджа. Здесь будет использован другой подход, аналогичный используемому в работах [120; 122; 123], где орбиты частиц исследовались прямо в меняющемся потенциале модели галактики  $N$ -тел. Такой подход используется по двум причинам. Во-первых, тремя цитируемыми работами исчерпываются все орбитальные исследования с использованием эволюционирующего потенциала самосогласованной модели, хотя такие потенциалы и более реалистичны, чем зафиксированные потенциалы, часто рассматриваемые в литературе. Во-вторых, такой подход легче распространить на другие задачи орбитальной динамики в будущем. Например, его можно использовать для изучения эволюции орбит на

длительном промежутке времени, сравнимом с характерным временем глобальной эволюции моделей. Первая попытка проанализировать, как распределение соотношений частот орбит изменяется за короткий период времени по мере роста бара в вертикальном направлении, была сделана в работе [100]. Такие исследования нуждаются в дальнейшем развитии.

В настоящей главе методами спектральной динамики [124] будут подробно проанализированы две многокомпонентные модели  $N$ -тел с одинаковой относительной массой темной материи и различными значениями параметра Тумре  $Q$  из Главы 1. В этих моделях X-структуры имеют различные углы раствора. Более того, горячая модель имеет двойную X-структуру. Будет проведён частотный анализ всех орбит, поддерживающих бар в обеих моделях, так же, как это было сделано в работе [120]. Будет продемонстрировано, как в таких моделях из различных типов орбит формируется X-структура.

## 3.2 Методы

### 3.2.1 Численные модели

В настоящей главе рассматривают две модельные галактики, ранее рассмотренные в Главе 1. Напомним, что каждая модель на начальный момент времени состоит из экспоненциального диска изотермического в вертикальном направлении, погруженного в тёмное гало с профилем плотности, близким к профилю НФВ [75]. Обе модели характеризуются вкладом тёмного гало  $M_h/M_d = 1.5$  в пределах сферы радиусом в четыре экспоненциальных масштаба диска  $R_d$ , начальной относительной толщиной диска  $Z_d/R_d = 0.05$  и значением параметра Тумре на  $R = 2R_d$   $Q = 1.2$  и  $Q = 1.6$ , соответственно. Здесь и далее модель с  $Q = 1.2$  будет обозначаться как модель SX (*от англ.* “single X-structure”), а модель с  $Q = 1.6$  как модель DX (*от англ.* “double X-structure”).

Выполненная серия пробных расчётов показала, что временного разрешения, использованного в Главе 1 при оценке параметров X-структур, не хватает для аккуратной оценки частотных характеристик орбит частиц-звёзд. Поэтому был выполнен повторный расчёт эволюции обеих моделей на временном промежутке

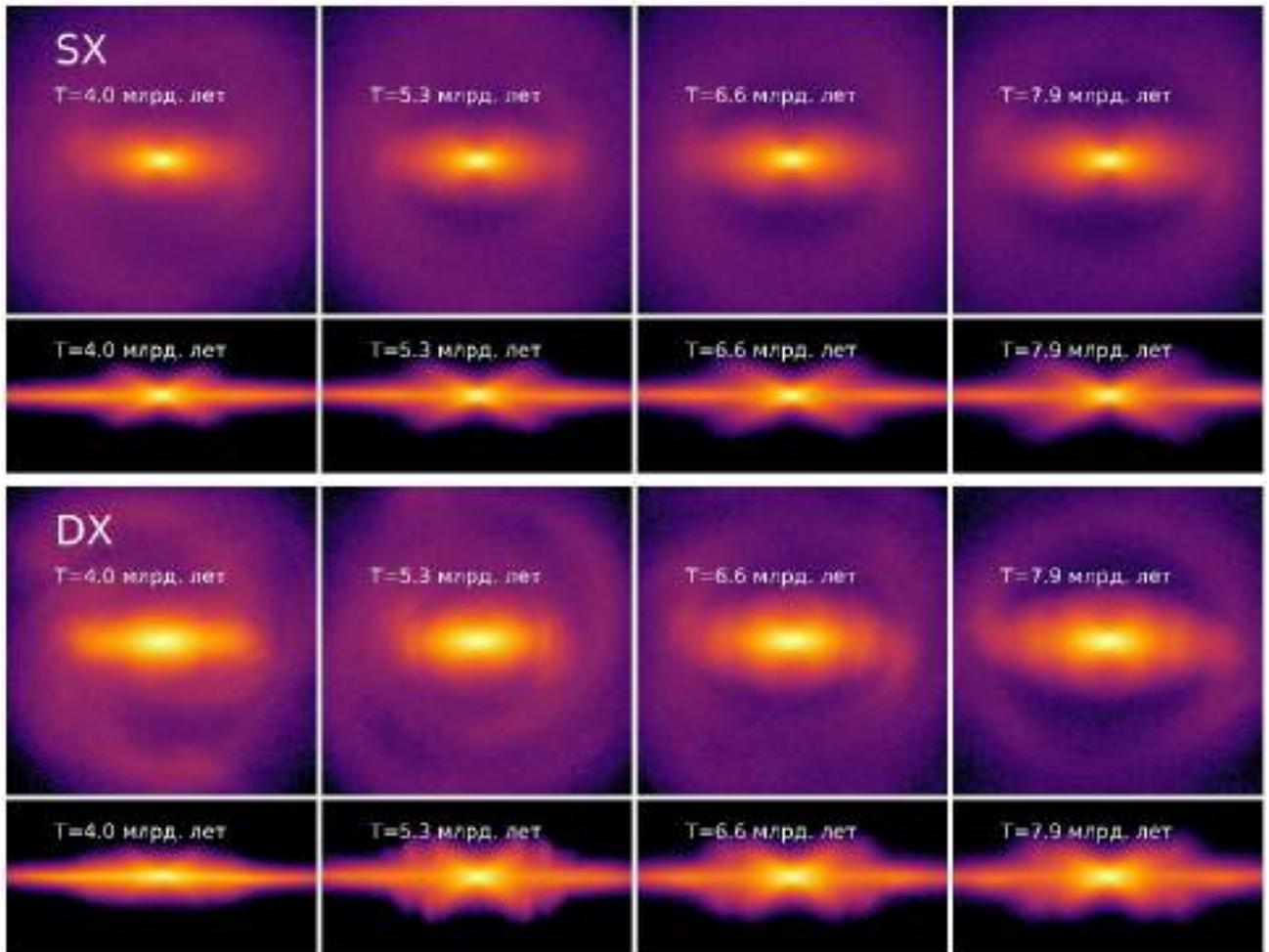


Рис. 3.1 — Вид плазмы и с ребра моделей SX (два первых ряда сверху, соответственно) и DX (третий и четвертый ряды, соответственно) на четыре разных момента времени  $t = 300$  (4.0 млрд. лет), 400 (5.3 млрд. лет), 500 (6.6 млрд. лет), 600 (7.9 млрд. лет). Большая ось бара для изображений с ребра выстроена перпендикулярно лучу зрения. Изображения плазмы показывают область  $[-4,4] \times [-4,4]$ , а изображения с ребра —  $[-4,4] \times [-2,2]$ .

от  $t = 300$  ( $\approx 4$  млрд. лет) до  $t = 600$  ( $\approx 8$  млрд. лет). Характеристики частиц при этом выводились с шагом в 0.125 единиц времени ( $\approx 1.65$  млн. лет), т. е. в сорок раз чаще, чем при анализе моделей в Главе 1. Эволюция рассчитывалась с помощью уже использованного ранее кода `gyrfalcon`.

Изображения обеих моделей на промежутке времени  $t = 300 - 600$  показаны на Рис. 3.1. На момент времени  $t = 300$  в обеих моделях в плоскости диска наблюдается сильный бар. К этому моменту времени бар уже успевает утолщиться в вертикальном направлении, четко различимы В/PS балдж и X-структуры. Модель SX с  $Q = 1.2$  симметрична в вертикальном направлении в течение всего промежутка времени, тогда как в модели с  $Q = 1.6$  при  $t = 350$  происходит вторичный изгиб бара. К  $t = 400$  бар снова становится вертикально симметричным. В результате произошедшего вторичного изгиба бара образуются четыре уярчения,

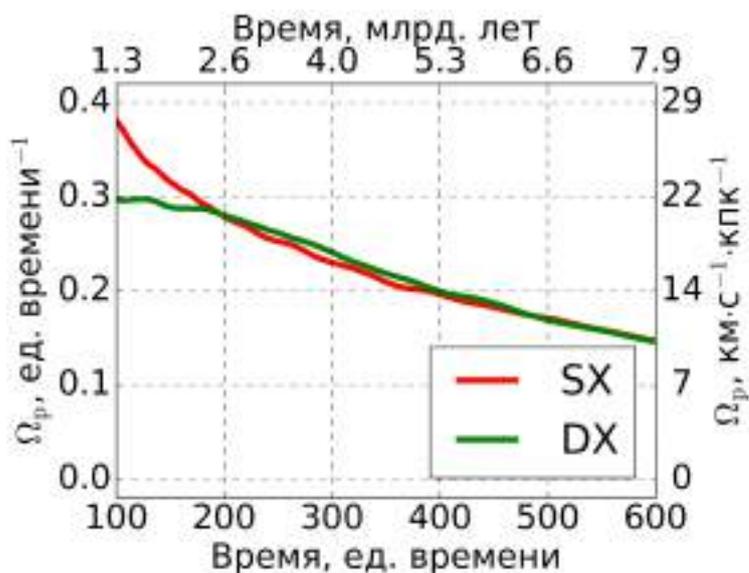


Рис. 3.2 — Эволюция скорости узора бара в моделях SX и DX.

которые пространственно смещены относительно лучей первичной X-структуры и лежат дальше от центра диска.

Для дальнейшего анализа орбитальной структуры бара важно знать, как меняется его скорость узора со временем. Эволюция скорости узора в обратных единицах времени моделирования (здесь и далее единица времени сокращается как ед. времени) и в обычно используемых единицах для скорости узора, км/с/кпк, показана на Рис. 3.2. С учётом нормировки одна обратная единица времени примерно равняется 72 км/с/кпк (см. пункт 1.2). Методика расчёта скорости узора совпадает с использованной ранее в Главах 1 и 2. Как видно из Рис. 3.2, на временном интервале  $t = 100 - 600$  бар в обеих моделях постепенно замедляется. Одновременно с этим он увеличивается в размерах как в радиальном, так и вертикальном направлении (Рис. 3.1).

### 3.2.2 Анализ главных частот

Будем рассматривать движение частиц в системе отсчета, вращающейся вместе с баром с угловой скоростью  $\Omega_p$ . Выстроим ось  $x$  вдоль большой оси бара, а ось  $z$  — ортогонально плоскости галактики. При этом направление оси  $y$  будет определяться правилом правой руки. Такая система отсчета является естественной для вращающегося бара, так как в этой системе отсчёта орбиты из семейства

$x_1$ , составляющего “костяк” бара, замыкаются в плоскости диска. Далее также будет использоваться понятие цилиндрического расстояния  $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Чтобы выделить орбиты, поддерживающие X-структуры, охарактеризуем каждую орбиту набором отношений частот  $f_R/f_x$  и  $f_z/f_x$ , где каждая из используемых частот  $f_R$ ,  $f_x$  и  $f_z$  есть главная частота (частота линии с наибольшей амплитудой) в соответствующем координатном спектре. Значения главных частот определялись следующим образом. Вначале выбирался временной интервал  $t = 400 - 500$ , на котором скорость узора бара изменяется медленно. Относительное изменение скорости узора на этом временном интервале примерно равно  $|\Omega_p(t = 500) - \Omega_p(t = 400)|/\Omega_p(t = 450) \approx 20\%$  (см. Рис. 3.2). Далее предполагалось, что орбитальные частоты существенным образом не меняются, поскольку бар эволюционирует медленно. Ниже будут приведены результаты вычисления значений частот на соседних временных интервалах и показано, что данное предположение верно (см. конец этого пункта). Для выбранного временного интервала  $t = 400 - 500$  для каждой координаты каждой частицы составлялся временной ряд из  $N_t = 801$  точек с шагом по времени  $\Delta t = 0.125$ . Затем с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) находился соответствующий спектр и определялась главная частота — частота, соответствующая наивысшему пику в спектре.

Спектр  $P_x$  для координаты  $x$  вычислялась следующим образом

$$P_x = \frac{1}{N_t} \left| \sum_{k=0}^{k=N_t-1} x_k \exp(-2\pi i f_j t_k) \right|, \quad (3.1)$$

где  $f_j = j/\Delta T$ ,  $\Delta T = 100.125$ ,  $t_k = k\Delta t$  и  $0 \leq j \leq (N_t - 1)/2$ . Спектры  $P_R$  и  $P_z$  рассчитывались аналогичным образом.

На Рис. 3.3 показано, как происходит изменение координат  $x(t)$ ,  $R(t)$  и  $z(t)$  со временем для одной из типичных частиц бара. Также на этом рисунке представлены соответствующие спектры и различные важные детали настоящего анализа, которые будут обсуждаться ниже.

Почти для всех частиц главная частота по радиальной координате  $f_R$  равна нулю. Это объясняется тем, что звёзды обычно вращаются вокруг центра, не падая на него. Для некоторых частиц доминирующие частоты  $f_x$  и  $f_z$  также равны нулю. Частицы с  $f_x = 0$  являются частицами диска, которые за рассмотренный промежуток времени не успевают один раз обернуться вокруг центра (см. Рис. 3.4). Они не принадлежат бару и далее исключались из анализа. В каждой модели таких частиц около  $4 \cdot 10^5$ . Визуальный просмотр орбит с  $f_z = 0$  показал, что такие орбиты

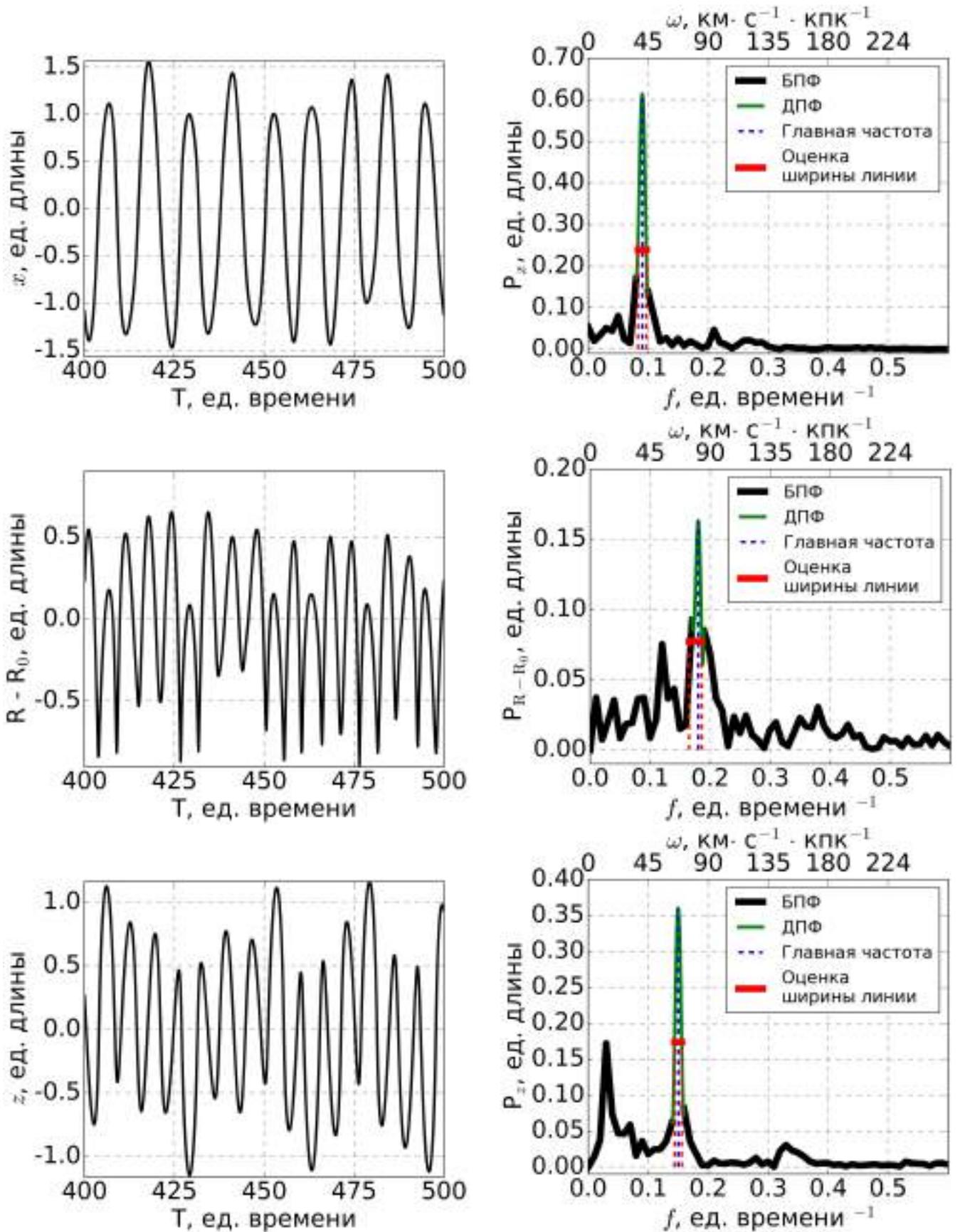


Рис. 3.3 — Пример измерения частот  $f_x$  (сверху),  $f_R$  (посередине) и  $f_z$  (внизу). Слева: изменение соответствующих координат во времени. Справа: Модули Фурье-преобразований временных рядов, представленных слева, с различными деталями настоящего анализа.

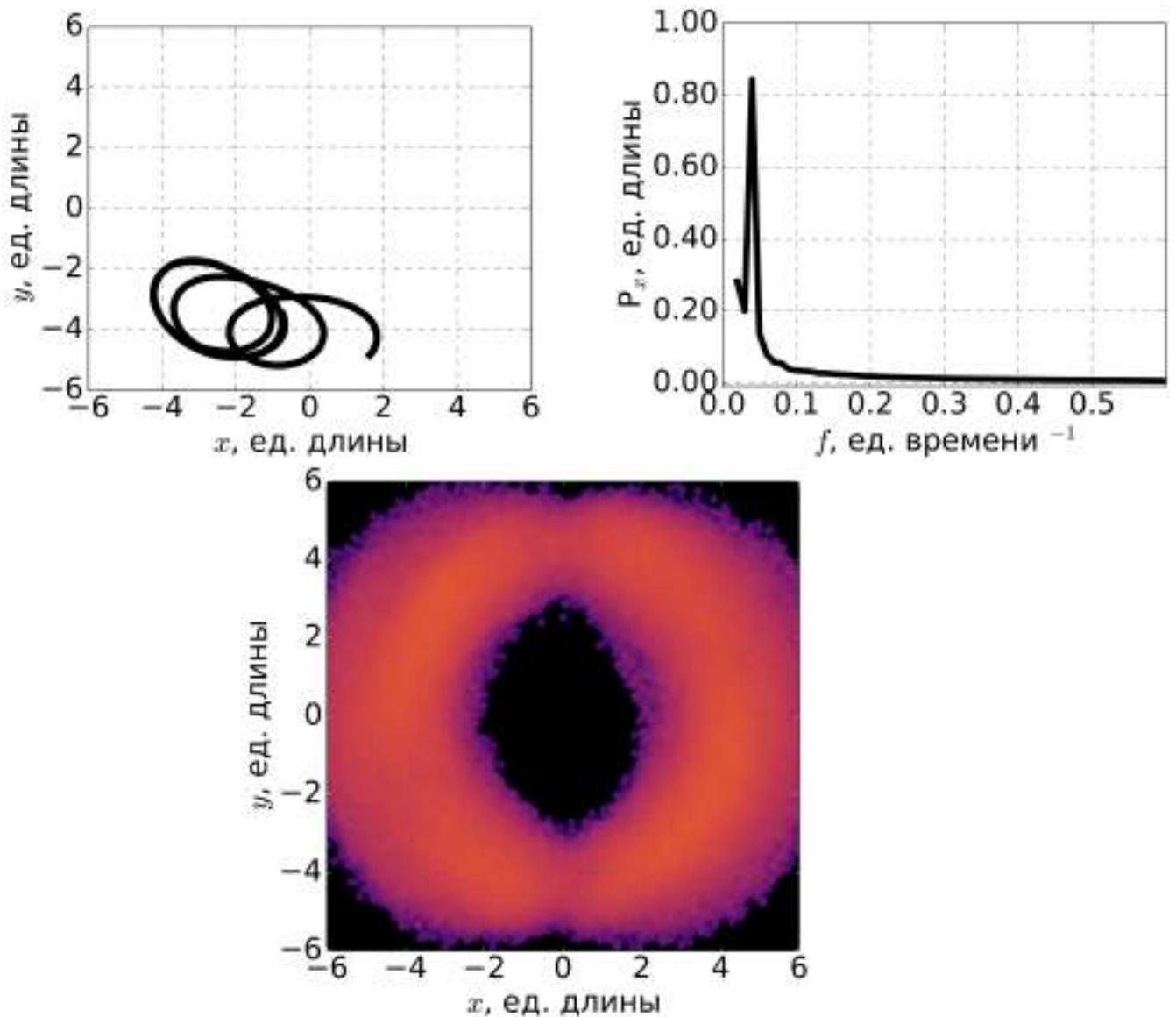


Рис. 3.4 — Частицы с доминирующей частотой осцилляций вдоль оси  $x$   $f_x = 0$ , исключенные из дальнейшего анализа. *Сверху*: пример типичной орбиты такой частицы в плоскости XY (*слева*) и соответствующий спектр  $P_x$  (*справа*). *Снизу*: изображение всех таких частиц в модели SX на момент времени  $t = 450$ . Используется та же цветовая шкала, что и на Рис. 3.1.

имеют форму банана и, как правило, соответствующие частицы принадлежат бару. Частицы с  $f_R = 0$  и  $f_z = 0$  включались в дальнейший анализ, однако для таких частиц средние значения  $\langle z \rangle_t = z_0$  и  $\langle R \rangle_t = R_0$  за рассмотренный промежуток времени вычитались из всех значений соответствующих временных рядов на этапе предварительной обработки. В дальнейшем использовались главные частоты, полученные из таких центрированных временных рядов.

В силу дискретности исследуемого временного ряда максимальное значение частоты, которое может быть определено, ограничено частотой Найквиста  $\nu_c = \frac{1}{2\Delta t} = 4.0$  ед. времени<sup>-1</sup> или  $\omega_c = 2\pi\nu_c \approx 1800$  км/с/кпк. При этом минимальная частота определяется длиной временного ряда. Это частота вычис-

ляется следующим образом  $\Delta\nu = \frac{1}{N_t \Delta t} = 0.01^2$  ед. времени<sup>-1</sup> или  $\Delta\omega \approx 4.5$  км/с/кпк. Заметим, что  $\Delta\nu$  также можно рассматривать как точность, с которой определяется положение пика, соответствующего главной частоте. Однако, как будет показано ниже, такое разрешение является недостаточным для точного измерения резонансных отношений. В общем случае, точность определения пика можно улучшить, используя различные методы, например, предполагая некоторую форму пика (гауссову или параболическую, см. [125]) или добавлением нулей к рассматриваемым временным ряду (англ. “zero-padding”, см. [126], глава 3.11). Процедура добавление нулей позволяет улучшить точность определения пика, поскольку с увеличением длины временного ряда рассматриваемая сетка частот оказывается более плотной. При этом заметим, что такая процедура все же не позволяет более точно отделить две соседних линии друг от друга. Последнего можно достичь только за счет увеличения длины реального временного ряда. Поэтому, для того чтобы различать разные линии в спектре орбиты, изначально рассматриваемый временной ряд должен быть достаточно большим, В частности, чтобы избежать перекрытия различных спектральных линий частота Найквиста  $\nu_c$  должна быть больше, чем самая высокая из наблюдаемых частот в спектре орбиты (см. [126], глава 2.1). Именно поэтому временной шаг рассматриваемого временного ряда должен быть небольшим. Далее будет показано, что типичные частоты орбит ограничены значением примерно в 1.0 ед. времени<sup>-1</sup>, что значительно ниже частоты Найквиста  $\nu_c = 4.0$  ед. времени<sup>-1</sup> для рассматриваемых временных рядов. Для уточнения положения пиков в настоящем анализе используется процедура, аналогичная процедуре заполнения нулями, но оптимизированная под настоящую задачу. Детали процедуры следующие.

Вначале находится главная частота, соответствующая пику в спектре, полученному с помощью обычного БПФ  $f_j$ . Затем вокруг найденного пика строится более плотная сетка по частотам от предыдущей базовой частоты БПФ  $f_{j-1}$  до следующей  $f_{j+1}$  с шагом  $\Delta f = 0.001$  вр. ед.<sup>-1</sup>. Для каждого узла новой более плотной сетки рассчитывается дискретное преобразование Фурье (ДПФ) рассматриваемого временного ряда (тонкая черная линия на правом верхнем графике на Рис. 3.3). Положение максимума ДПФ на новой сетке является более точной оценкой главной частоты. При этом разрешение пика, полученное после применения

<sup>2</sup>Точное значение шага по частоте  $\Delta\nu$  немного меньше, потому что  $N_t$  — нечетное число,  $\Delta\nu = 1.0/100.125 \approx 0.0099875$  вр. ед.<sup>-1</sup>.

описанной выше процедуры, равно  $\Delta f = 0.001$  вр. ед.<sup>-1</sup>. Отметим, что в работе [120] использовался схожий подход. Авторы [120] рассчитывали спектры с шагом по частотам в четыре раза более плотным, чем тот, который должен был бы использоваться при БПФ рассматриваемого авторами временного ряда. Авторы [120] оправдывают использование более маленького шага по частотам тем, что шаг по частотам, используемый в БПФ, сравним с шириной отдельных пиков. В настоящем анализе более мелкий шаг используется только вблизи пиков.

Убедимся, что при используемом маленьком разрешении каждая линия в спектре прослеживается хотя бы несколькими точками. Для этого оценим ширину исследуемых линий. Это можно сделать следующим образом. Каждой найденной главной частоте  $f_k$  соответствует некоторая амплитуда линии  $A_k$ . Найдем частоту  $f_1 < f_j$  такую, что  $P(f_1) \leq A_k/2$  и  $P(f_1 + \Delta f) > A_k/2$ . Аналогично найдем частоту  $f_2$  такую, что  $P(f_2) < A_k/2$ ,  $P(f_2 - \Delta f) > A_k/2$  и  $f_2 > f_j$ . Разность  $W_f = f_2 - f_1$  может быть рассмотрена как грубая оценка полной ширины линии на полувысоте. Полученные в результате такого анализа  $f_1$ ,  $f_2$  и  $W_f$  для орбиты типичной частицы бара также показаны на Рис. 3.3 (пунктирные и толстые красные линии соответственно).

На Рис. 3.5 показано распределение всех частиц из модели SX по величине  $W_f \cdot \Delta T$ . Эта величина есть ширина линии, нормированная на частотное разрешение БПФ  $\Delta \nu$ . Видно, что типичное значение  $W_f \cdot \Delta T$  близко к единице. Другими словами, типичная ширина линий составляет около  $1/\Delta T$ . Поскольку разрешение более плотной сетки около пика в десять раз больше, чем разрешение обычного БПФ, то каждая линия отслеживается в среднем по десяти точкам. Отметим, что отсюда также следует, что обычного разрешения БПФ оказывается недостаточно для определения частоты пика, что отмечалось в работе [120].

Для проверки первоначального предположения о малости сдвига по частотам на временном интервале  $t = 400 - 500$  оценим разность доминирующих частот, определенных для каждой орбиты на разных временных интервалах,  $\delta f_i = |f_{i,450-550} - f_{i,350-450}|$ , где  $i$  заменяет  $x, y, z$  или  $R$ . Для этого вычислим главные частоты на соседних временных интервалах  $t = 350 - 450$  и  $t = 450 - 550$ . Распределение орбит по частотным сдвигам  $f_i$  показано на Рис. 3.5. Типичный сдвиг частоты для орбит в рассматриваемых моделях составляет менее  $0.005$  ед. времени<sup>-1</sup>, хотя есть небольшое количество орбит с  $\delta f > 0.200$  ед. времени<sup>-1</sup>. Из Рис. 3.5 можно сделать вывод, что для большинства частиц первоначальное предположение о малости частотных сдвигов верно. Также интересно, что есть

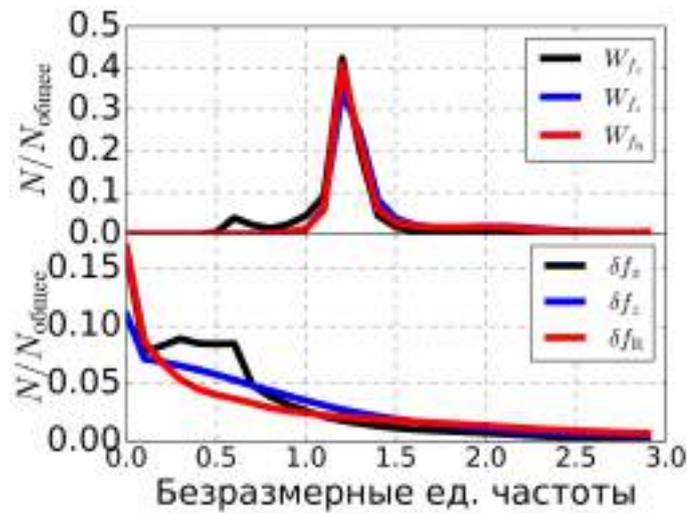


Рис. 3.5 — Распределение частиц по безразмерной ширине линии  $W_f \cdot \Delta T$  (сверху) и частотным сдвигам  $\delta f \cdot \Delta T$  (снизу) для частот  $f_x$ ,  $f_z$  и  $f_R$ , где  $\Delta T$  — длина рассматриваемого временного ряда. Ширина бина по  $\Delta f \Delta T$  равна 0.1.

орбиты, для которых сдвига по частотам не наблюдается даже с учётом используемого хорошего разрешения. Визуальный просмотр таких орбит выявил, что они не образуют какое-то выделенное семейство. Некоторые из них являются орбитами частиц бара из самой центральной области, а некоторые — круговыми орбитами частиц из внешних областей диска. Также отметим, что полученные оценки сдвига по частоте являются, скорее всего, завышенными, так как на временном интервале  $t = 350 - 450$  скорость узора падает существенно быстрее, чем на временном интервале  $t = 400 - 500$  (см. Рис. 3.2).

Ниже различные типы регулярных орбит будут выделены на основе анализа отношений частот  $f_R/f_x$  и  $f_z/f_x$ . Здесь следует сделать одно важное замечание. Поскольку частоты измеряются с некоторым конечным разрешением, строгого условия, которое позволило бы отличить почти периодические от непериодических, но регулярных орбит, лежащих на ближайших инвариантных кривых вокруг идеальных периодических, не существует. Это естественный недостаток спектрального анализа орбит частиц, движущихся в потенциале самосогласованной модели  $N$ -тел, и его нельзя избежать. Отметим также, что анализ частот на конечном промежутке времени для модели  $N$ -тел не позволяет отличить липкие хаотические орбиты от регулярных. В работе [123] авторы показали, что доля орбит, которые могут считаться хаотическими, сильно зависит от некоторых субъективно определяемых параметров, таких как максимально допустимый дрейф частоты и максимальное количество линий, которые можно считать значимыми в спектрах орбит. Однако в работе [127] авторы, используя другой подход, показали,

что доля хаотических орбит в баре уменьшается со временем, достигая примерно 10% после 6 миллиардов лет эволюции для моделей с сильным баром. Бары в рассматриваемых в настоящей работе моделях содержат более 50% всех исходных частиц диска, то есть сильные. Поэтому, основываясь на результатах [127], всё же можно предполагать, что вклад хаотических орбит в рассматриваемых моделях с сильным баром невелик.

### 3.3 Бар и диск с точки зрения орбит

Поскольку X-структуры являются подсистемой В/PS балджа, вначале проанализируем орбитальный состав всего В/PS балджа, а затем уже перейдем к анализу самой X-структуры. Для этого, во-первых, необходимо отделить частицы В/PS балджа (3D-бара) от частиц внешнего диска. Орбиты частиц в диске близки к круговым, и такие частицы не вносят вклад в особенности вертикальной структуры бара. Напротив, В/PS балдж в основном должен быть населен различными типами регулярных или липких хаотических трёхмерных орбит. Такие орбиты могут возникать из-за различных динамических механизмов, но большинство из них связано с деревом орбит  $x1$  (подробный обзор см. в [43]). Само семейство  $x1$  вытянуто вдоль плоского бара и составляет его “костяк”. По мере роста бара орбиты этого семейства становятся все более и более многочисленны. В то же время за счет малых вертикальных возмущений, всегда присутствующих в системе, некоторые из таких орбит отклоняются от средней плоскости диска и начинают поддерживать арахисоподобную структуру – В/PS балдж [100; 120].

Характеристикой, позволяющей отделить частицы диска от частиц балджа В/PS, является отношение частот  $f_R/f_x$ . Однако прежде чем анализировать различные группы орбит на основе этого отношения частот, сделаем несколько замечаний относительно терминологии, используемой ниже. В литературе используются различные классификации орбит. В работах, где отдельные орбиты изучаются в терминах сечений Пуанкаре (англ. “surfaces of section”, SoS), часто используется термин “семейство орбит”. Семейство есть набор периодических орбит, которые можно получить непрерывным изменением некоторых физических параметров орбит (например, энергией Якоби орбиты (см. [128], глава 2.4.2) . Орбиты из одного семейства имеют одинаковое количество точек пе-

ресека с сечениями Пуанкаре. В работах, где рассматриваются численные модели, как правило, используется более простая классификация, основанная на различиях в морфологии орбит (см., например, [51]). В настоящем анализе будет использоваться другая классификация орбит, основанная на спектрах орбит и их свойствах. В частности, термины “группа” или “семейство” орбит будет применяться для обозначения набора орбит с почти одинаковыми отношениями частот  $f_R/f_x$  или  $f_z/f_x$ . Такой подход близок к используемому в работе [129]. Под “почти одинаково” здесь имеется в виду, что отношения частот внутри одной группы орбит различаются менее чем на 0.1. Такая классификация несколько субъективна, поскольку в реальности в распределениях орбит по отношениям частот резкой границы не существует (см. пункт 3.4). Однако такая классификация позволяет грубо оценить роль различных типов орбит в формировании X-структур, возникающих в рассматриваемых здесь самосогласованных потенциалах. По возможности полученные здесь результаты будут сравниваться с результатами предыдущих работами, но отметим, что к такому сравнению следует относиться с большой осторожностью, поскольку классификации орбит в различных работах разная.

На Рис. 3.6 показано двумерное распределение частот  $f_x$  и  $f_R$  для моделей SX и DX. На представленном рисунке четко выделяется семейство частиц с  $f_R/f_x = 2.0 \pm \Delta(f_R/f_x)$  (самая яркая полоска на обоих распределениях). Эти частицы составляют основу трёхмерного бара (V/PS балджа). В обеих моделях в него вовлечено около 50% от всех частиц, представляющих звёздную компоненту. Визуальный просмотр орбит показал, что условие по  $f_R/f_x$ , указанное выше, не позволяет отличить орбиты семейства  $x1$  от орбит-ящиков [51], которые также могут участвовать в формировании бара. Для разделения этих двух типов необходимо классифицировать орбиты по отношению частот  $f_y/f_x$ , которое характеризует колебания звезды в плоскости диска. Это было сделано в работе [130], однако дальнейшее обсуждение этого вопроса выходит за рамки настоящей работы.

На двумерных распределениях, представленных на Рис. 3.6, также выделяется отдельное семейство частиц с  $f_R/f_x \simeq 2.4$ . По-видимому, оно образовано частицами, ранее найденными в работе [120] (см. также [131] и рисунок A6 в [46].) и имеющими  $(\Omega - \Omega_p)/\kappa = 0.44$ . Эти частицы не принадлежат внешнему диску. Они участвуют в формировании V/PS балджа, однако их орбиты не вытянуты вдоль бара. Это семейство практически отсутствует в модели SX ( $\approx 5\%$ ), хотя

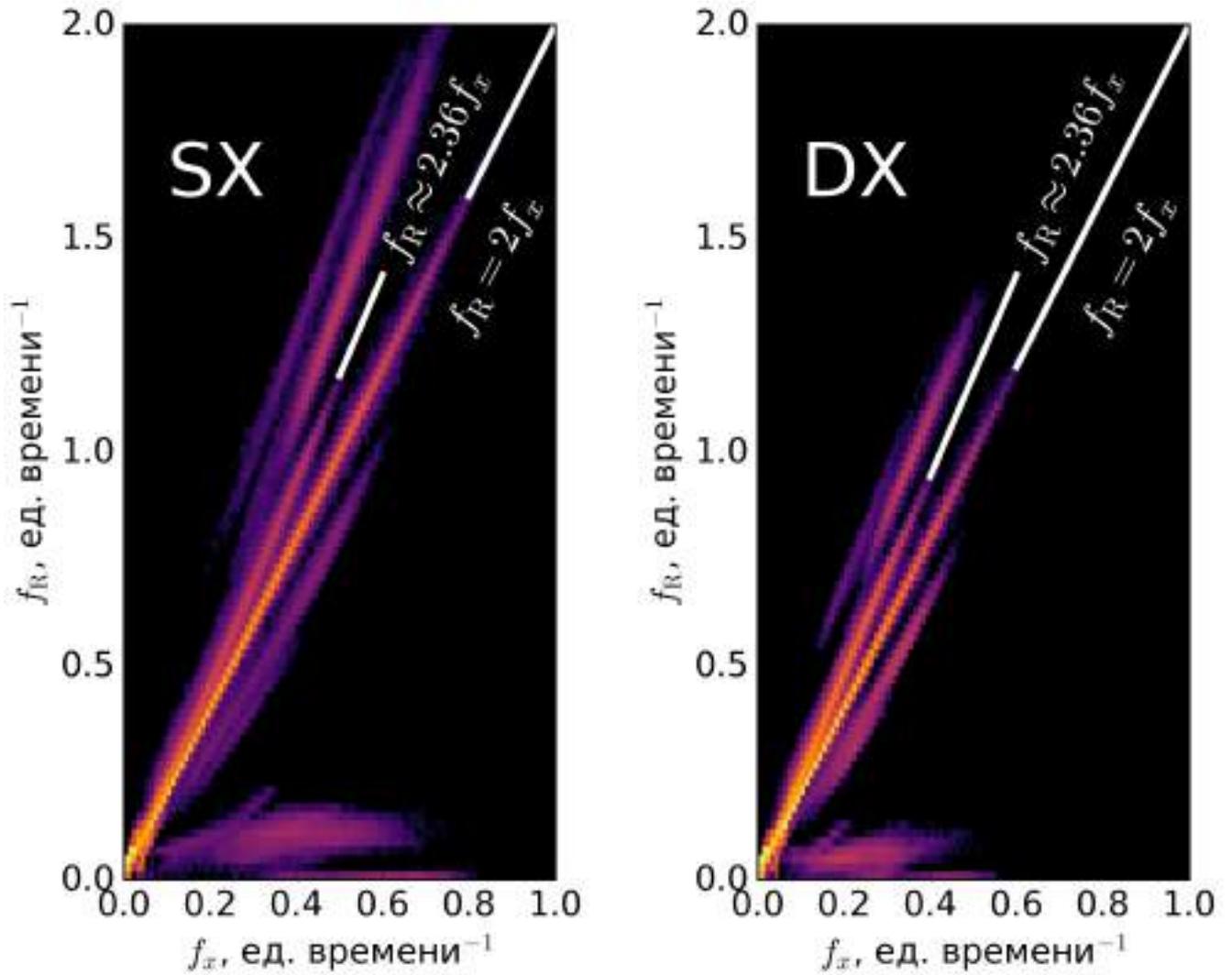


Рис. 3.6 — Двумерное распределение частиц по частотам  $f_R$  и  $f_x$  для моделей SX (слева) и DX (справа). Белыми линиями отмечены наиболее населенные орбитальные семейства: орбитальное семейство с соотношением частот  $f_R/f_x = 2$ , характерным для частиц бара, и дополнительное орбитальное семейство с  $f_R/f_x \approx 2.36$  ( $f_x/f_R \approx 0.42$ ).

в модели DX таких частиц около 20%. Остальные семейства (например, второй луч сверху на Рис. 3.6) ещё менее населённые. В среднем их орбиты характеризуются большими значениями  $f_x$ , и сами семейства дают вклад в наблюдаемую структуру только в центральных областях рассматриваемых моделей. Внешний диск (за пределами бара) заполнен орбитами с очень низкими  $f_R$  и  $f_x$  (яркое пятно около нуля). В работе [118] за частицы бара принимались частицы, у которых  $f_R/f_x 2.0 \pm 0.1$ . В настоящей работе частицы бара также выделяются по этому условию.

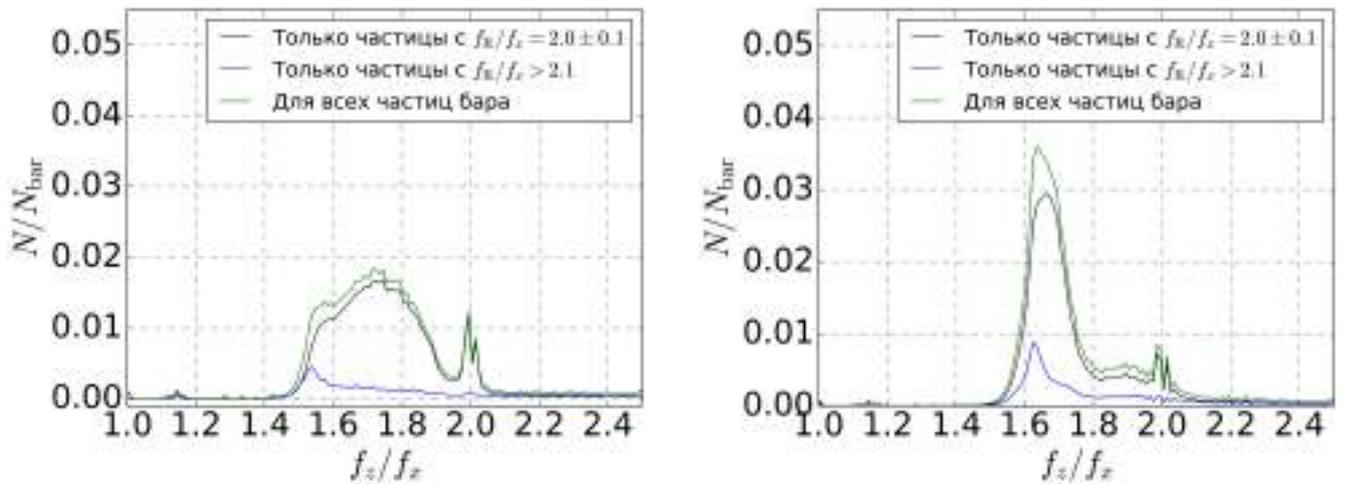


Рис. 3.7 — Распределение частиц бара по отношению  $f_z/f_x$  для моделей SX (слева) и DX (справа) для временного интервала  $t = 400 - 500$ . Чёрной линией показано распределение для всех частицы бара; синей — только для частиц с отношением частот эпициклических колебаний к частоте колебаний по оси  $x$   $f_R/f_x > 2.1$ ; зелёной линией показано суммарное распределение  $f_z/f_x$  для обоих семейств орбит.

### 3.4 Орбитальный состав В/PS балджей

Роль различных семейств орбит в формировании толстой части бара (В/PS балджа) определяется двумя факторами. Первый — это то, насколько каждое конкретное семейство орбит с определенным соотношением  $f_z/f_x$  широко представлено в модели, то есть насколько велика доля частиц соответствующего семейства. Этим определяется общий вклад в поверхностную плотность частиц из одного семейства. Вторым фактором — пространственное распределение орбит в выделенном семействе. Например, ансамбль орбит может заполнить определенную область, не создавая заметных градиентов плотности, или, наоборот, частицы могут быть распределены таким образом, что общий профиль плотности всего ансамбля содержит некоторые особенности градиента плотности такие, как лучи X-структуры. В случае В/PS балджей первое означает, что определенное семейство орбит создает только фон балджа, не участвуя в формировании X-структуры. Как будет показано ниже, этот частный случай встречается редко, и все орбиты из различных семейств участвуют в формировании X-структуры в рассматриваемых моделях. В данном пункте будет представлено общее описание распределения орбит по отношению частот  $f_z/f_x$ . В следующих пунктах будет показано, какое пространственное распределение имеют различные семейства орбит, выделенные

по отношению частот  $f_z/f_x$ , и какие структуры формируются из каждого отдельного семейства.

### 3.4.1 Распределения частиц по отношению частот $f_z/f_x$

На Рис. 3.7 представлено распределение отношений частот  $f_z/f_x$  частиц бара с  $1.9 \leq f_R/f_x \leq 2.1$  (черная линия) для обеих моделей. Ширина бина равна  $\Delta(f_z/f_x) = 0.01$ . На этом рисунке также отдельно показан вклад семейства с соотношением частот  $f_R/f_x \simeq 2.4$  (синяя линия). Как уже отмечалось, орбиты этого семейства не вытянуты вдоль бара и вносят вклад только в самые центральные области В/PS балджа. Они практически не вносят вклад в распределение в модели SX. В модели DX они немного поднимают максимум распределения, при этом не искажая его формы. Так как это семейство весьма малочисленно, и его орбиты отличаются от типичных орбит частиц бара, это семейство далее не рассматривалось.

Выделим наиболее заметные особенности распределения частиц бара по отношению  $f_z/f_x$  для обеих моделей.

Во-первых, как видно из Рис. 3.7, орбиты с отношением частот вблизи резонансного отношения 2:1, составляют лишь небольшую часть ( $\approx 7\%$ ) всех орбит В/PS балджа. Хотя они образуют явный пик на  $f_z/f_x = 2$ , их существенно меньше, чем орбит других типов в обеих рассмотренных моделях, особенно в модели DX. Этот факт уже косвенно указывает на то, что резонансные орбиты 2:1 не могут быть основными строительными блоками X-структуры в рассматриваемых моделях. В следующем пункте это будет показано в явном виде на основе анализа пространственных распределение различных семейств орбит.

Отметим, что пик 2:1 на Рис. 3.7, в свою очередь, образован комбинацией двух типов орбит. Визуальный анализ нескольких десятков орбит 2:1 из модели SX показал, что, даже если для орбит с хорошей точностью выполняется условие  $f_z/f_x = 2.00 \pm 0.05$ , сами орбиты при этом не похожи на типичные бананообразные орбиты. Большинство просмотренных орбит демонстрируют вторую волну на зависимости  $z(t)$ , и, соответственно, второй значимый пик в спектре (см. Рис. 3.3, правая панель). Наличие такой волны в спектре приводит к тому, что орбита теряет характерную форму банана. На плоскости  $(xz)$  такая орбита имеет форму

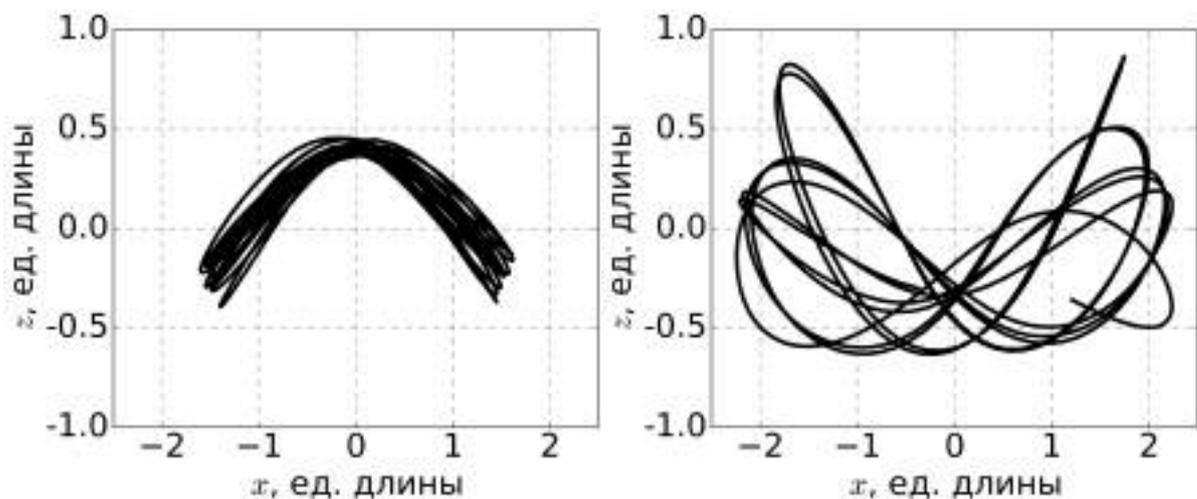


Рис. 3.8 — Примеры орбит с  $f_z/f_x \simeq 2.0$  из модели SX.

знака бесконечности. Такие орбиты также связаны с вертикальным резонансом 2:1, однако они связаны не с семейством  $x1v1$ , которое образовано бананообразными орбитами, а с семейством  $x1v2$  [117]. Такие орбиты также принято называть АВАН орбитами [23]. На Рис. 3.8 показано два характерных типа орбит с  $f_z/f_x = 2.0$  из модели SX: почти периодическая версия бананообразной орбиты (левая панель) и либрирующий ”банан”(правая панель). Профиль либрирующего ”банана”очень похож на профиль, возникающей у липких хаотических орбит из работы [43] (см. их рисунок 13). Пример либрирующей ”банановой”орбиты также можно увидеть в работе [118], хотя и для отношения частот  $f_z/f_x = 1.9$  (рисунок 2, класс E в цитируемой работе).

Доля орбит 2:1 в обеих моделях примерно одинакова. В то же время другие группы орбит проявляются в каждой модели совершенно по-разному (см. Рис. 3.7). Распределение отношений частот в модели SX имеет широкий пик от  $f_z/f_x \simeq 1.5$  до  $f_z/f_x \simeq 1.95$  с максимумом около  $f_z/f_x \simeq 1.75$  (7:4). В то же время в модели DX это распределение имеет довольно узкий и высокий пик при малых значениях отношения частот (максимум примерно на 1.66 или 5:3). Можно заключить, что в более горячей модели DX преобладают орбиты с меньшим соотношением частот  $f_z/f_x$ , тогда как в модели SX распределение более равномерное для отношения частот ниже 2:1. Важно отметить, что распределения для обеих моделей весьма гладкие в диапазоне значений от 1.5 до 1.9, и на них отсутствуют резкие резонансные пики.

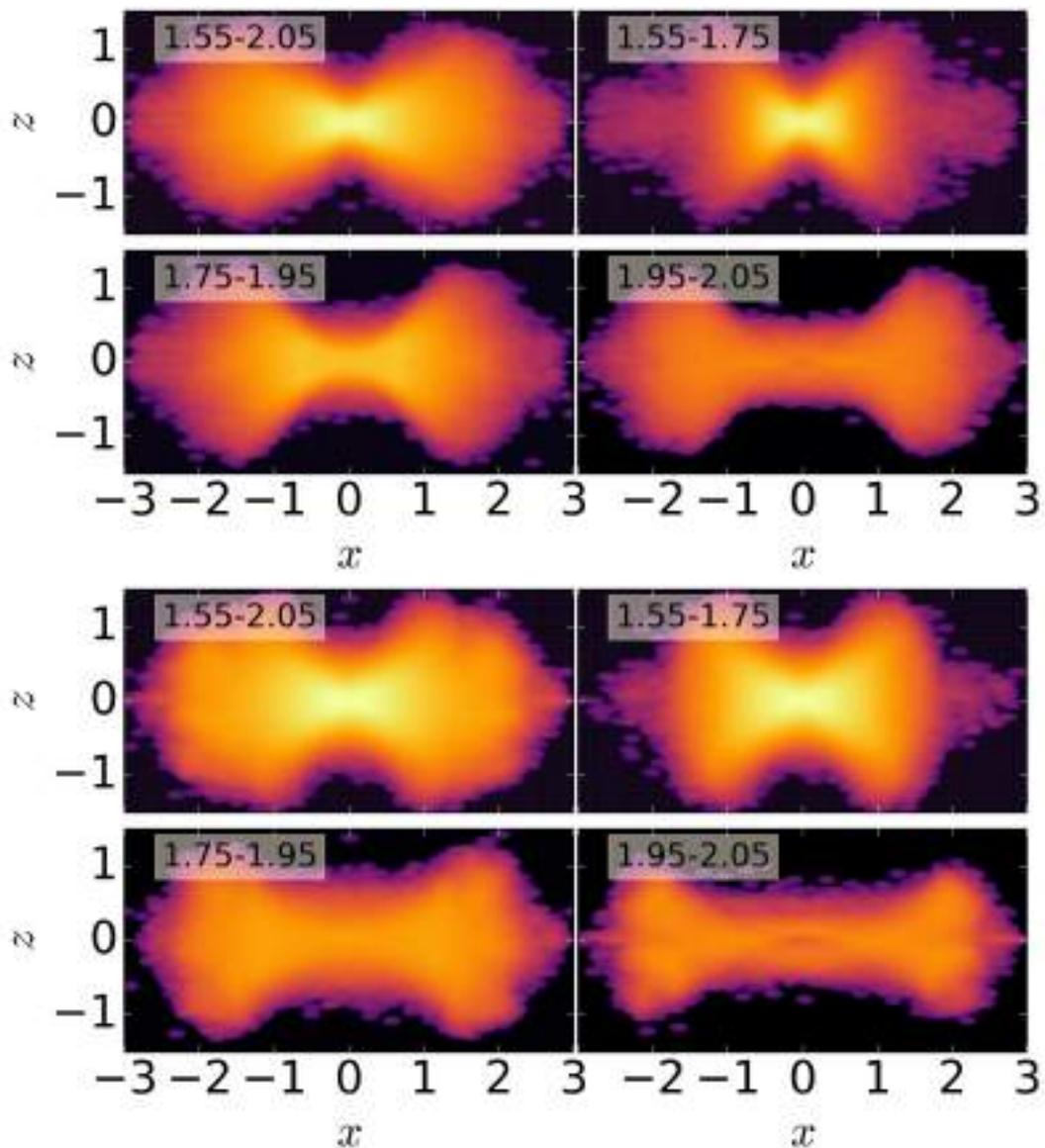


Рис. 3.9 — Изображения всего В/PS балджа в проекции на плоскость ( $xz$ ) и распределений плотности, создаваемых отдельными группами частиц с различным отношением  $f_z/f_x$  для моделей SX (сверху) и DX (снизу). Значение отношений  $f_z/f_x$  для выделенных групп указано в легенде. Отсчёты по осям указаны в единицах длины симуляций.

### 3.4.2 Пространственное распределение различных групп орбит

В данном пункте будет подробно разобрано, какие структуры формируются из групп орбит с различными отношениями  $f_z/f_x$  на некоторый выделенный момент времени.

На Рис. 3.9 представлены изображения структур, которые создаются частицами из трёх различных частей распределения  $f_z/f_x$  для обеих моделей на момент времени  $t = 450$ . Показан вид с ребра (проекция на плоскость ( $xz$ )) для случая, когда большая ось бара выстроена перпендикулярно лучу зрения. Рас-

сматривались следующие промежутки по  $f_z/f_x$ :  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$ ,  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$  и  $f_z/f_x = 1.95 - 2.05$ . На левой верхней панели для каждой из моделей представлены изображения для всех частиц В/PS балджа. На остальных панелях представлены изображения для каждой из выделенных по  $f_z/f_x$  групп орбит.

Как видно из рисунка, каждая из рассмотренных частей распределения  $f_z/f_x$  демонстрирует арахисоподобную структуру с ярко выраженной (для низких отношений частот) и слабо выраженной (для высоких отношений частот) X-структурой. Причём такая ситуация наблюдается в обеих моделях. Общая морфология выделенных по отношению частот подсистем также различается. Орбиты с низкими отношениями частот образуют профиль в форме бабочки, в то время как орбиты с высокими отношениями частот образуют структуру, напоминающую гантель с явной перемычкой в центре. Структура, образованная орбитами с низким отношением частот,  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$ , имеет примерно одинаковую протяженность в радиальном и вертикальном направлениях. Орбиты с более высокими значениями  $f_z/f_x$  ( $1.75 - 2.05$ ) формируют более вытянутые и уплотненные структуры. Орбиты с  $f_z/f_x = 2.0$  вносят вклад в X-структуру только во внешних областях и определяют границу В/PS балджа в радиальном направлении. Отметим, что в модели DX в отличие от модели SX присутствует большое количество бананообразных орбит, подобных орбите представленной на Рис. 3.8 (левая панель). Множество таких орбит формирует два перевернутых полумесяца. Эти полумесяцы пересекаются, при этом в середине наблюдается характерная незаполненная область.

Рис. 3.9 явно демонстрирует, что бананообразные орбиты не могут быть “костяком” X-структуры в рассматриваемых моделях. Более того, другие орбитальные группы, по-видимому, участвуют в формировании X-структуры.

### 3.5 Вклад различных периодических и близких к периодическим орбит в вертикальную структуру

#### 3.5.1 Интеграл Якоби

Более подробную картину пространственного распределения орбит в трёхмерном баре можно получить, если рассмотреть распределение орбит по интегралу Якоби — константы, которой можно охарактеризовать каждую орбиту в неинерциальной системе отсчета, вращающейся с постоянной угловой скоростью. Интеграл Якоби определяется следующим образом. Пусть пробная частица, захваченная баром, с модулем скорости  $v$  и радиус-вектором  $\mathbf{r}$  имеет полную энергию  $E = v^2/2 + \Phi(\mathbf{r})$ , где  $\Phi(\mathbf{r})$  — потенциальная энергия в точке  $\mathbf{r}$ . Тогда постоянная Якоби есть  $E_j = E - \Omega_p \cdot L_z$ , где  $L_z$  — проекция углового момента на вертикальную ось, а  $\Omega_p$  — скорость узора бара.

На Рис. 3.10 показано распределение частиц из модели SX на момент времени  $t = 500$  в координатах  $(E, L_z)$ . На этом рисунке также представлены треки отдельных частиц на временном интервале  $t = 400 - 500$ . Видно, что в течение этого промежутка времени частицы движутся по почти прямым линиям с примерно одинаковым наклоном, мало меняющимся со временем. Положение каждого трека на рассматриваемой плоскости определяется константой  $C_j = -E_j/\Omega_p = L_z - kE$ , где  $E_j$  — энергия Якоби, а числовой коэффициент  $k = 4.8$ , определяется скоростью узора бара. В силу того, что  $C_j$  и  $E_j$  однозначно связаны, здесь и далее в зависимости от удобства изложения для характеристики орбит иногда будет использоваться константа  $C_j$ , а иногда —  $E_j$ .

Выделим в В/PS балдже несколько зон по константе  $C_j$ , однозначно связанной с энергией Якоби  $E_j$ . Польза такого разделения станет ясна ниже. Рассмотрим шесть различных областей. Границы каждой из рассмотренных областей представлены в Таблице 4. На Рис. 3.11 показано, как выделенные области выглядят на плоскости  $E - L_z$  (левые панели) и плоскости  $(xz)$  (правые панели) для обеих моделей. Как видно из рисунка зона V является самой центральной и наиболее гравитационно связанной, в то время как область, соответствующая диску, является наиболее протяженной и удаленной от центра, и в нее не входят частицы, принадлежащие трёхмерному бару. В среднем полная энергия частиц от области

zone	$C_j$	$E_j$	zone	$C_j$	$E_j$
диск	$< 8$	$> -1.7$	III	$10 \div 11$	$-2.3 \div (-2.1)$
I	$8 \div 9$	$-1.9 \div (-1.7)$	IV	$11 \div 12$	$-2.5 \div (-2.3)$
II	$9 \div 10$	$-2.1 \div (-1.9)$	V	$> 12$	$< -2.5$

Таблица 4 — Границы рассмотренных зон по константе  $C_j$  и энергии Якоби  $E_j$ .

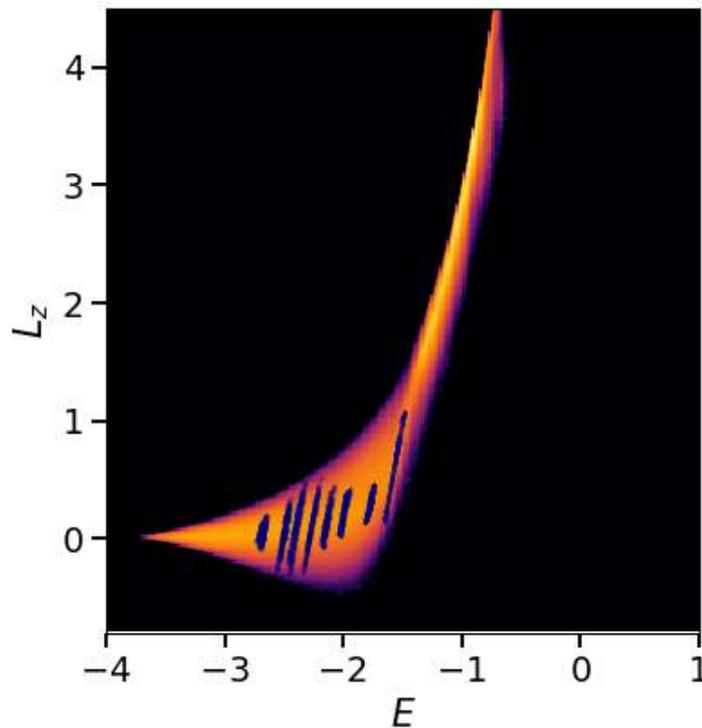


Рис. 3.10 — Распределение всех частиц из модели SX на плоскости “полная энергия – угловой момент и треки отдельных частиц. Наклон треков  $k \approx 4.8$  определяется скоростью узора бара  $\Omega_p$ .

диска к области V становится меньше и, следовательно, разделение по энергии Якоби приводит к разделению орбит и в координатном пространстве.

Основное преимущество такого разделения на зоны заключается в следующем. На всём рассматриваемом промежутке времени частицы мало меняют свою энергию Якоби. Это означает, что частицы, расположенные внутри выбранных зон, как правило, в них же и остаются. Тогда, анализируя орбитальный состав каждой выделенной зоны, можно оценить вклад различных орбитальных групп в вертикальную структуру от центра к периферии на все моменты времени, а не только на какой-либо один выделенный, как это было сделано ранее в пункте 3.4.

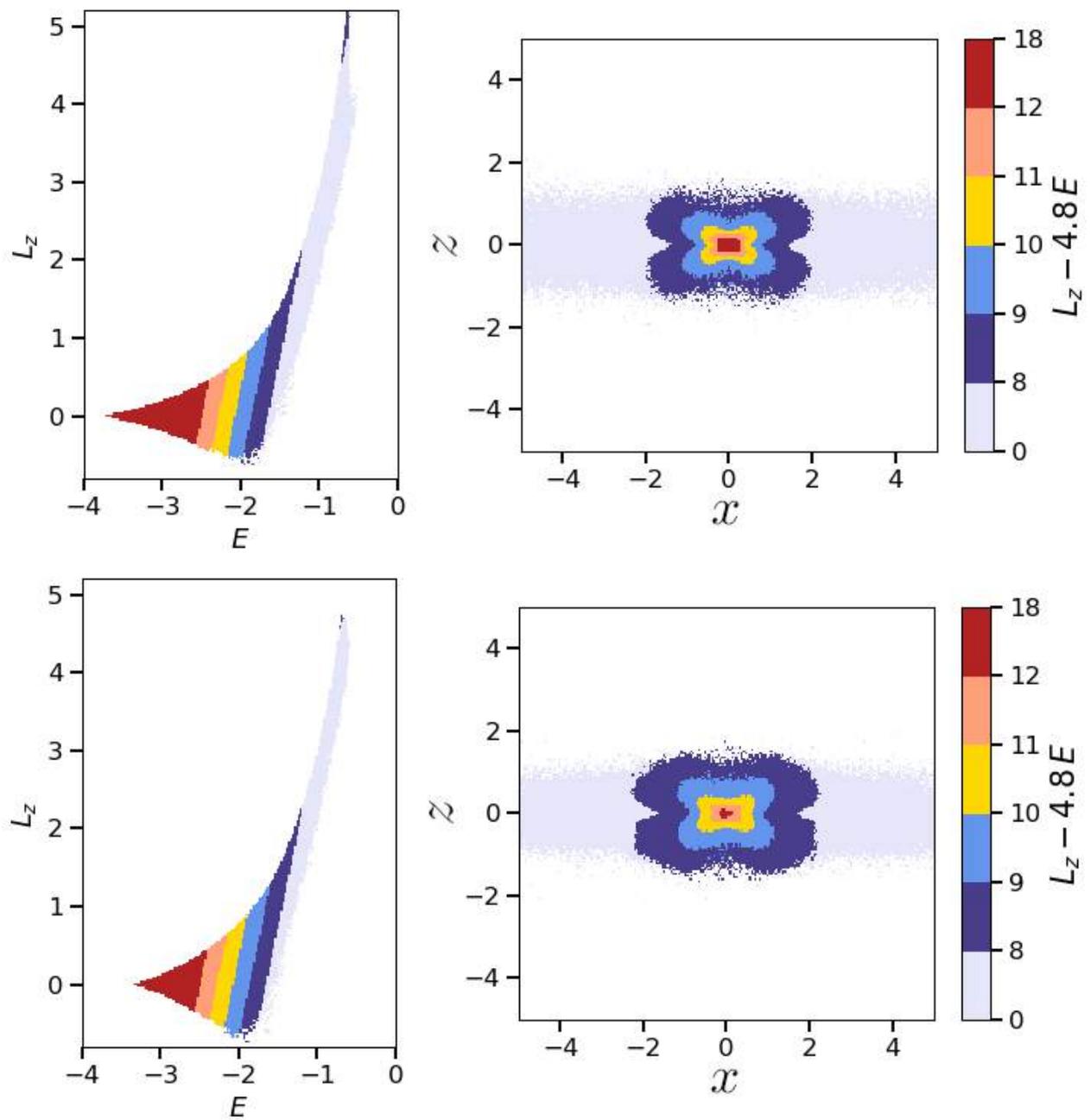


Рис. 3.11 — Распределение частиц на плоскости  $E - L_z$  (слева) и на плоскости  $(xz)$  (справа) для модели SX (сверху) и модели DX (снизу). Цветом указывается значение параметра  $L_z - 4.8E$ ;

### 3.5.2 Структура В/PS балджа от центра к периферии

На Рис. 3.12 показано распределение различных групп орбит по энергии Якоби  $E_j$ . Распределение показывает насколько вероятно найти орбиту конкретного типа с заданным отношением частот  $f_z/f_x$  в той или иной области В/PS балджа. Вертикальными линиями обозначены границы зон по энергии Якоби  $E_j$ , выделенные ранее (см. Рис. 3.11). Как видно из Рис. 3.12 каждая группа орбит имеет широкое распределение. В модели SX орбиты с  $f_z/f_x < 1.6$  в основном сосредоточены во внутренних областях. При этом таких орбит почти нет в области, прилегающей к внешнему диску. Напротив, бананообразные орбиты чаще встречаются во внешних областях В/PS балджа. Однако их всё же можно найти и во внутренних областях (Рис. 3.13). Орбиты из других групп можно найти практически во всех областях.

В модели DX распределение групп орбит по  $E_j$  имеет другой характер. Здесь в распределении вкладов орбит наблюдается более строгая закономерность. Орбиты-“брецельки” (орбиты 5:3) можно найти везде, но их вклад падает к периферии. Орбиты с отношением частот  $f_z/f_x > 1.8$  встречаются за редким исключением только на периферии.

Рис. 3.12 демонстрирует ещё одно важное свойство орбит 2:1. В отличие от других групп орбит, такие орбиты существуют в довольно узком диапазоне энергий  $E_j$ .

В Таблице 5 и Таблице 6 представлены количественные характеристики вкладов различных типов близких к периодическим орбит в зонах, выделенных по значению  $E_j$ .

Общая тенденция в распределении различных типов орбит следующая. Орбиты с более высокими отношениями  $f_z/f_x$  населяют более далёкие области В/PS балджа (зоны I и II). В то же время в самой центральной области (зона V) нет орбит с отношением частот  $f_z/f_x = 2.0$ . Отметим, что в каждой модели есть пространственные области, где вклады различных орбитальных групп примерно одинаковы. Например, в модели SX в зоне I 40 % орбит — это орбиты с  $f_z/f_x = 2.0 \pm 0.05$  и ещё 38 % в той же зоне — это орбиты с  $f_z/f_x = 1.85 \pm 0.05$ . В модели DX аналогичная ситуация возникает в зоне I для орбит с  $f_z/f_x = 1.65 \pm 0.05$  и  $f_z/f_x = 1.75 \pm 0.05$ .

$f_z/f_x$	I	II	III	IV	V	Общий
1.5–1.6	1%	3%	6%	9%	35%	15%
1.6–1.7	4%	14%	22%	30%	42%	26%
1.7–1.8	17%	30%	43%	49%	21%	30%
1.8–1.9	38%	40%	25%	9%	2%	19%
1.9–2.05	40%	13%	5%	2%	0%	10%

Таблица 5 — Относительные вклады каждой орбитальной группы в различных областях В/PS балджа, выделенных по энергии  $E_j$ , для модели SX.

$f_z/f_x$	I	II	III	IV	V	Общий
1.5–1.6	3%	4%	4%	6%	14%	6%
1.6–1.7	24%	48%	62%	74%	81%	56%
1.7–1.8	26%	36%	30%	20%	4%	24%
1.8–1.9	19%	6%	2%	1%	0%	6%
1.9–2.05	28%	6%	2%	0%	0%	8%

Таблица 6 — Относительные вклады каждой орбитальной группы в различных областях В/PS балджа, выделенных по энергии  $E_j$ , для модели DX.

В целом, то, как происходит “сборка” В/PS балджей из различных групп орбит в рассмотренных моделях согласуется с выводами авторов работы [118] относительно рассмотренных в [118] моделей. Однако точная картина представляется более сложной, чем описанная Портейлом и др. [118], когда “каждая из групп орбит является доминирующей на некотором расстоянии от центра”<sup>3</sup>. Во-первых, существуют пространственные зоны, в которых вклад различных орбитальных групп примерно одинаков. Во-вторых, даже если в определенной зоне есть доминирующее семейство, другие, менее многочисленные семейства, также вносят вклад в эту зону со своим собственным весом, который для каждого конкретного семейства свой (см. Таблицу 5 и Таблицу 6). В-третьих, общая картина распределения орбит сильно зависит от рассматриваемой модели. В модели SX наблюдается плавный переход главенства орбитальных семейств из одной зоны в другую (см. Рис. 3.12). Напротив, в модели DX во всех зонах, кроме одной доминирует только одно орбитальное семейство

<sup>3</sup>цитата из [118], перевод автора

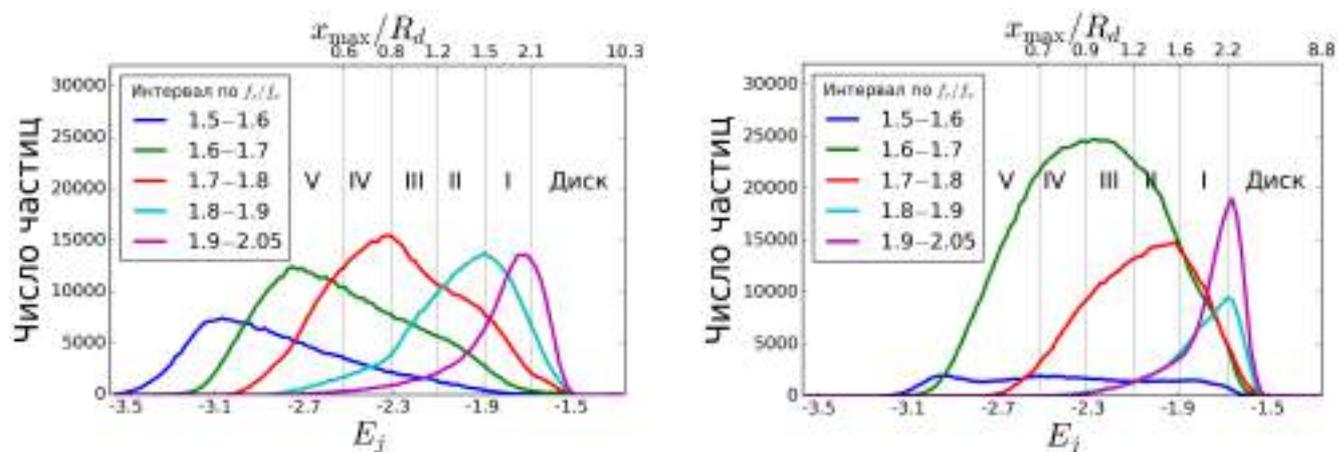


Рис. 3.12 — Распределение различных групп орбит по энергии Якоби  $E_j$  для модели SX (слева) и модели DX (справа). По дополнительной оси абсцисс сверху откладывается максимальное расстояние вдоль оси  $x$ , которое достигается частицами с энергией Якоби  $< E_j$  в рассмотренных моделях, деленное на *изначальный* радиальный масштаб диска  $R_d$ .

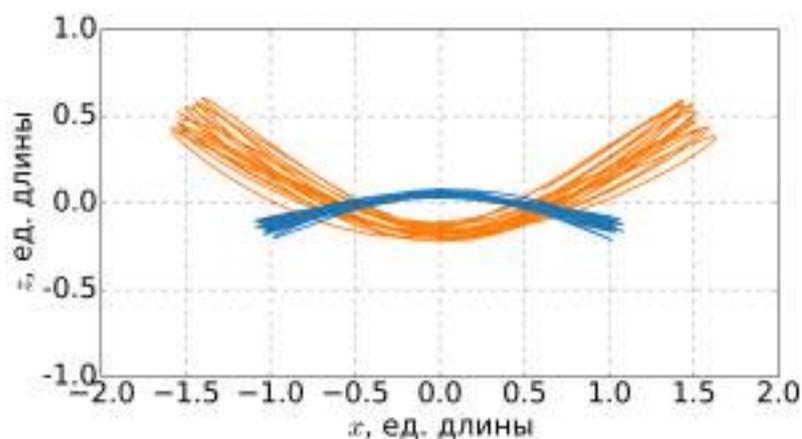


Рис. 3.13 — Две бананообразные орбиты из модели SX; Синим показано орбита с  $E_j = -2.2$ , желтым — с  $E_j = -1.9$ . Орбиты представлены на временном интервале  $t = 400 - 500$ .

### 3.6 Отдельные орбиты и X-структура

Хотя то, как различные типы орбит формируют В/PS балдж в рассмотренных моделях теперь понятно, точные причины появления X-структур в рассмотренных моделях всё ещё не ясны. Авторы работы [43] объясняли феномен X-структуры следующим образом. Они рассмотрели орбиты 2:1 в широком диапазоне энергий Якоби  $E_j$  и пришли к выводу, что  $z$ -максимумы в апоцентрах таких орбит выстраиваются вдоль некоторой линии, которая и соответствует лучу X-структуры. Ясно, что такое объяснение не подходит для рассмотренных в настоящей работе моделей, поскольку в них вклад орбит 2:1 в В/PS балджи незначителен. Чтобы понять, как X-структура в принципе может быть сформирована

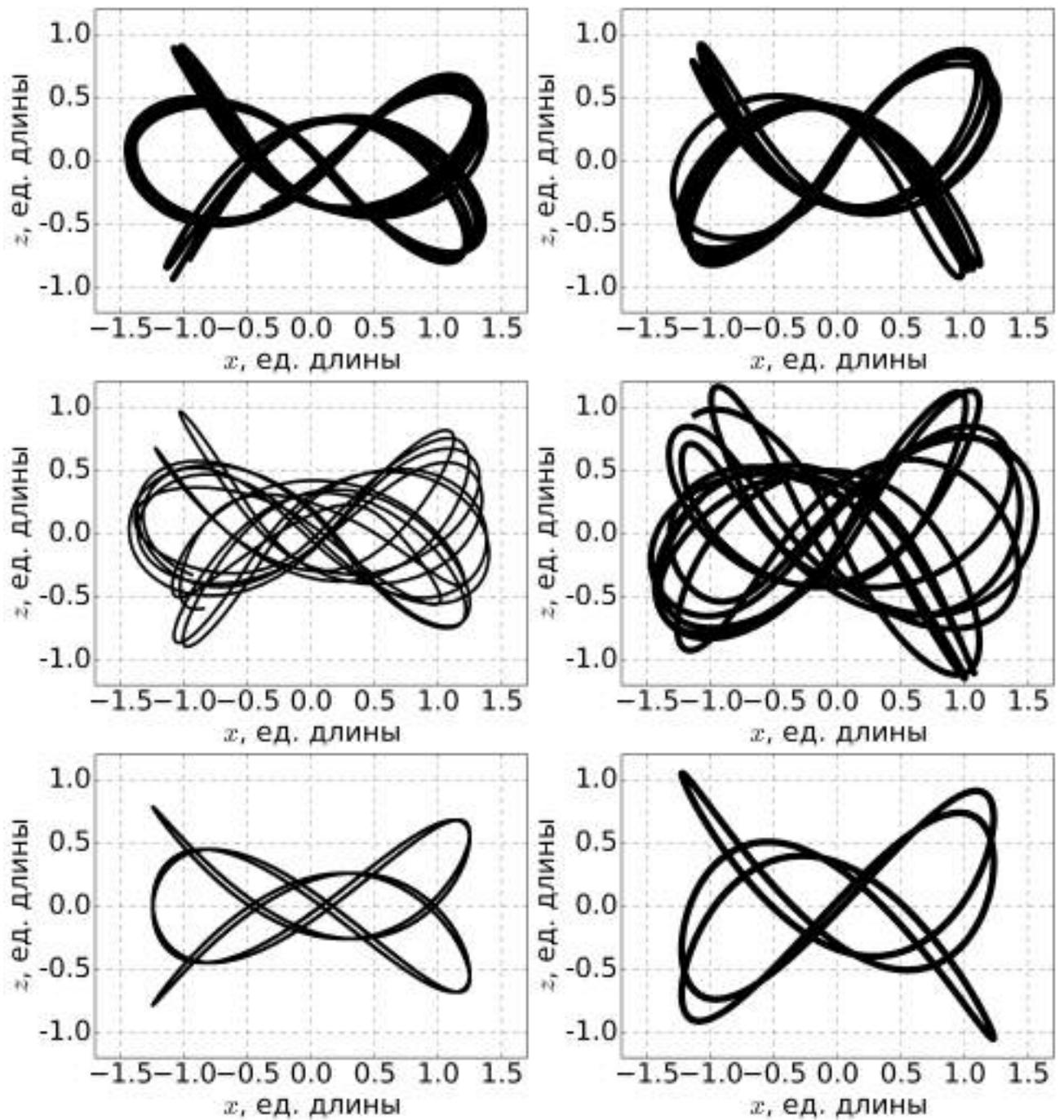


Рис. 3.14 — Орбиты с  $f_z/f_x = 7/4$  (слева) и  $f_z/f_x = 5/3$  (справа); *Сверху* — квазипериодические орбиты; *В середине* — возмущенные версии квазипериодических орбит из верхней панели; *Снизу* — “очищенные” от возмущений родительские орбиты (см. текст). Орбиты представлены на временном интервале  $t = 400 - 500$ .

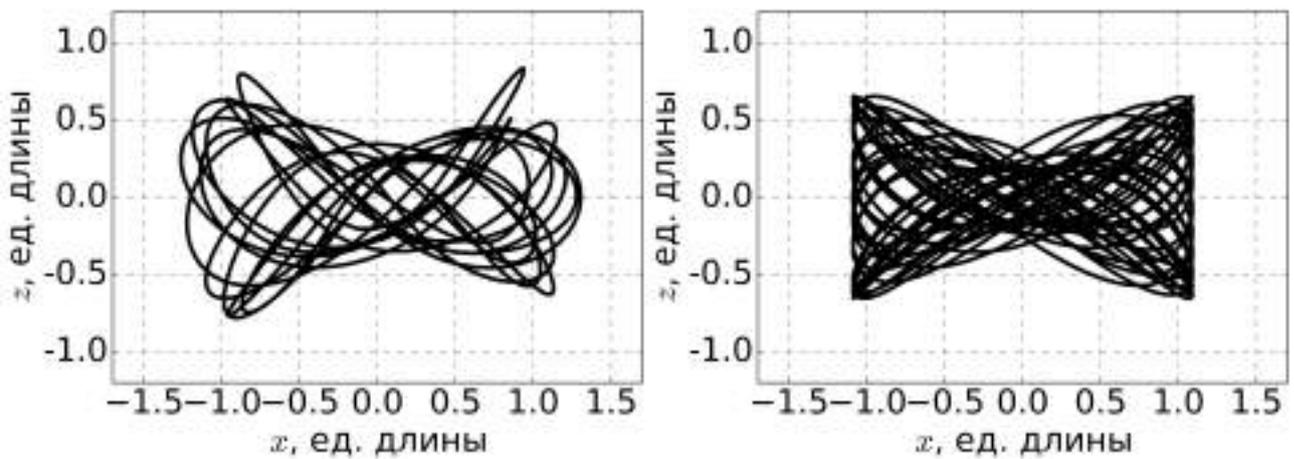


Рис. 3.15 — Орбиты с  $f_z/f_x = 1.73$ ; Слева — реальная орбита; Справа — ”очищенная” орбита. Орбита представлена на временном интервале  $t = 400 - 500$ .

из орбит, принадлежащих к различным орбитальным группам и отличным от бананообразных орбит 2:1, рассмотрим наиболее типичные орбиты в обеих моделях и проверим, существует ли возможная связь между отдельными типами орбит и X-структурой.

### 3.6.1 Морфология наиболее типичных орбит

На Рис. 3.14 показаны примеры наиболее типичных орбит, отношение частот  $f_z/f_x$  которых может быть выражено как отношение малых целых чисел, для рассматриваемых моделей. Для модели SX это орбиты 7:4, а в модели DX в основном распространены орбиты 5:3 или, как их ещё называют, орбиты-”брецельки” [118]. На верхних графиках изображены почти периодические орбиты обоих типов. Хотя представленные орбиты не являются строго периодическими, а есть слегка утолщенные версии соответствующих периодических орбит, характерная морфология ”родительских” периодических орбит всё же явно заметна даже по таким изображениям. На средних панелях Рис. 3.14 представлены несколько другие орбиты, однако имеющие те же отношения частот 7:4 (слева) и 5:3 (справа), соответственно, и ту же энергию  $E_j$ , что и у орбит, представленных на верхних панелях. Хотя отношение частот для этих представленных орбит также выражается отношением малых целых чисел, сами орбиты не замкнуты. Орбиты как бы ”раскручиваются”. По-видимому, такой эффект может быть связан с тем, что интегрирование уравнений движения выполняется не в

аналитическом или “замороженном” потенциале, как это было, например, в работах [33; 51; 52; 57; 118; 119; 132], а в меняющемся потенциале модели  $N$ -тел при изменяющейся, пусть и мало, скорости узора бара. Также нельзя исключить, что представленные орбиты могут быть липкими хаотическими орбитами. Отметим, что характерный профиль соответствующей периодической орбиты все же можно получить после некоторой дополнительной обработки таких “разматывающихся” орбит. Для этого достаточно из координатного спектра такой разматывающейся орбиты, удались все линии, кроме двух наиболее значимых. Для определенности, будем именовать таким образом вычищенные орбиты “идеальными”. “Идеальная” орбита, таким образом, есть реальная орбита, очищенная от зашумляющих линий в спектрах  $P_x$  и  $P_z$ .

Замкнутые орбиты типа орбиты 5:3, представленной на правой панели Рис. 3.14, ранее наблюдалась во многих работах, где исследовались модели галактики  $N$ -тел [51; 52; 123; 129]. Такой тип орбит происходит от семейства орбит  $x1mul3$  (см. [46], орбиту **vm33u**). Орбиты типа орбиты 7:4, представленной на левой панели Рис. 3.14, пока что широко не исследовались. Такой тип орбит был в явном виде описан совсем недавно в работе [46] (орбита **vm41u**). Заметим, однако, что представленная орбита напоминает орбиту, представленную на рисунке 8 (нижний правый график) работы [100]. По-видимому, многие орбиты из модели SX являются около периодическими версиями орбиты 7:4.

Как видно из Рис. 3.7, распределение по  $f_z/f_x$  гладкое. То есть для большинства орбит отношение частот  $f_z/f_x$  лежит между простыми резонансными отношениями, такими как  $1.6 = 8:5$ ,  $1.667 = 5:3$ ,  $1.75 = 7:4$  или  $1.8 = 9:5$ . Другими словами, для большинства орбит отношение  $f_z/f_x$  есть несократимая дробь с большими числами в числителе и знаменателе. На Рис. 3.15 показан пример такой орбиты и ее “идеальная” версия. Даже “идеальная” версия орбиты такого типа не периодична. Сама орбита заполняет некоторую область на плоскости  $(xz)$  в форме бабочки. Возможно, такой тип орбит можно связать с около периодическими орбитами вокруг семейства плоских орбит  $x1$  ([43], см. рисунок 15 цитируемой работы; [45; 133]). Более точный вывод относительно происхождения таких орбит можно сделать на основании исследования поверхностных сечений Пуанкаре, что, однако, выходит за рамки настоящей работы.

Отметим, что представленные орбиты не демонстрируют профилей в виде X-структуры. То есть рассмотрение отдельных орбит не позволяет объяснить феномен X-структур. Однако, по крайней мере, в случае орбиты-бабочки *огива-*

ющая орбиты напоминает крест, аналогичный кресту X-структуры. Используем этот факт, для того чтобы яснее понять природу X-структуры в рассмотренных моделях. Для этого рассмотрим, какие распределение плотности создаются всем ансамблем звёзд, движущихся по ранее выделенным орбитам.

### 3.6.2 Усредненные по времени орбиты

Предположим, что пробная звезда движется по орбите подобной представленной выше орбите-“бабочке”. Вероятность найти звезду на разных участках траектории разная. Эта вероятность пропорциональна времени, которое звезда проводит на данном участке, которое, в свою очередь, обратно пропорционально абсолютному значению скорости. Абсолютное значение скорости изменяется по орбите, и существует несколько предельных точек, где достигается минимальное значение скорости. Следовательно, каждая конкретная орбита создает неравномерное распределение плотности с определенными градиентами, которые определяются конкретной морфологией орбиты. Ансамбль орбит каждого типа, в свою очередь, формирует неоднородное распределение плотности, зависящее как от морфологии орбит данного типа, так и от того, насколько много таких орбит в принципе. Для орбит  $x1v1$  предельными точками являются точки, в которых достигается максимум по вертикальной координате  $z$ . Именно в них наблюдаются уярчения плотности. В модели, рассматриваемой в [43], уярчения плотности, создаваемые такими орбитами (и близкими к ним около периодическими орбитами), выстраивались в прямые сегменты, которые и наблюдались как лучи X-структуры (см. рисунок 10 в [43]). Для орбит более сложной морфологии (Рис. 3.14) картина распределения плотности должна быть более сложной. Множественные самопересечения и наложения петель траектории частицы также могут способствовать увеличению плотности на некоторых участках орбиты. Прежде чем перейти к детальному изучению ансамблей орбит разных типов, уточним, какое распределение плотности создается отдельными орбитами подобным тем, что представлены на Рис. 3.14 и 3.15.

На Рис. 3.16 показаны распределения плотности, создаваемые отдельными орбитами, рассмотренными ранее. При построении использовались “идеальные” орбиты, представленные на Рис. 3.14 и Рис. 3.15. Изображения строились

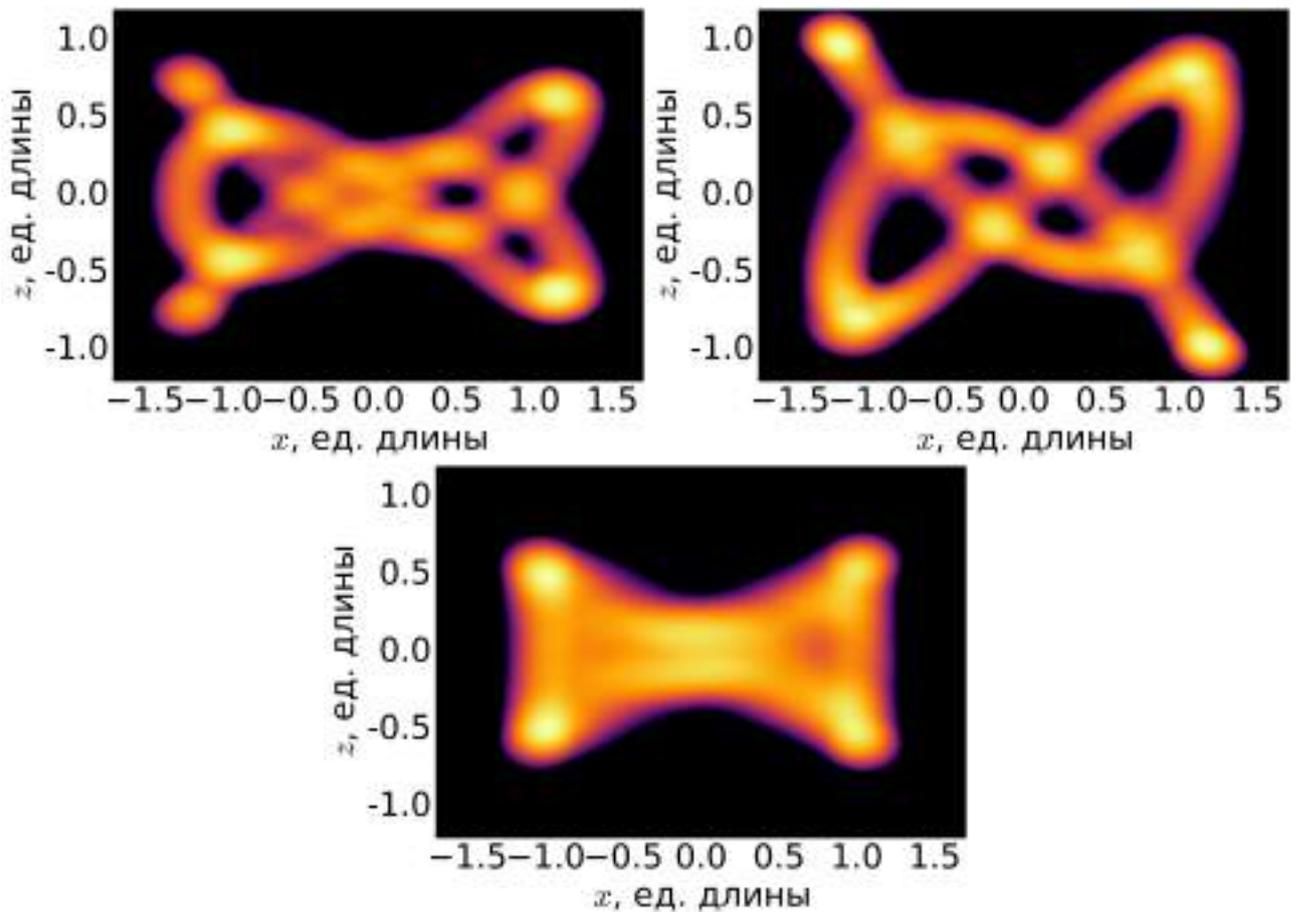


Рис. 3.16 — Распределение плотности, создаваемое ансамблем орбит 7:4 (слева сверху), орбитами 5:3 (справа сверху) и орбитами-бабочками (снизу).

таким образом, чтобы каждому уровню плотности в заданной точке орбите соответствовал свой цвет. Цветовая гамма использовалась такая же, как на Рис. 3.9. Сама плотность равна с точностью до константы количеству точек траектории, попадающих в некоторую фиксированную окрестность точки, в которой рассчитывается плотность. Здесь важно отметить, что траектория рассчитывалась с фиксированным шагом по времени  $\Delta t = 0.125$ , точно таким же, как и шаг исходного временного ряда для каждой из орбит. Сама плотность рассчитывалась в круге с центром в рассматриваемой точке и радиусом 0.1 единиц длины. Как видно из рисунка, распределение плотности для орбиты-“бабочки” действительно имеет крестообразную огибающую. При этом наиболее сильные уярчения наблюдаются в четырех крайних точках, в которых частицы максимально далеко отходят от плоскости диска ( $z$ -максимумы орбиты). Случаи орбиты-“брецельки” (5:3) и орбиты 7:4 оказываются более сложными. Распределение плотности орбиты-“брецельки” не показывает характерной X-образной огибающей, но при этом на нём всё же заметны несколько сильных уярчений. При этом самые яркие из них наблюдаются в крайних точках петель орбиты. Что касается орбит 7:4, то в прин-

ципе, они могут создавать внутреннюю X-структуру, если учесть, что у каждой такой орбиты должна существовать зеркально-симметричная орбита-партнёр. Орбиты 7:4 также демонстрируют яркие пятна на периферии в  $z$ -максимумах орбиты.

### 3.6.3 Природа X-структуры

X-структуры, возникающие в рассмотренных моделях, имеют непрерывное распределение интенсивности на больших пространственных масштабах без резких провалов (Рис. 3.1). Даже если предположить, что X-структуры связаны с какой-либо выделенной группой орбит (например, орбитами-бабочками), всё равно возникает вопрос о том, каким образом ансамбль орбит с выбранным отношением частот может формировать наблюдаемые прямолинейные сегменты-лучи, которые протягиваются из центра до периферии В/PS балджа, при том, что в каждом таком ансамбле орбиты как-то распределены в пространстве в соответствии со своим значением энергии Якоби (см. Таблицу 5 и Таблицу 6). Для того чтобы разобраться в данном вопросе, рассмотрим распределение частиц-звёзд по интегральным параметрам их орбит. Будем использовать параметры, которыми можно охарактеризовать крайние точки каждой отдельной орбиты. Такими параметрами является постоянная Якоби  $E_j$  и максимальное возвышение частиц, движущейся по заданной орбите, над плоскостью диска  $z_{\max}$ . Преимущества использования этих параметров станут понятны ниже.

На Рис. 3.17 показано двумерное распределение орбит по этим параметрам для обеих моделей для разных групп орбит с определенными значениями отношения  $f_z/f_x$ . Отметим, что ранее на Рис. 3.16 рассматривались профили плотности для усреднённых по времени “идеальных”, то есть почти периодических орбит. Напротив, на Рис. 3.17 отражено распределение всех орбит в заданной группе, и сюда могут входить как периодические орбиты, так и около периодические и даже, возможно, хаотические орбиты. Хотя каждая группа орбит имеет широкое распределение по выбранным параметрам, в распределении каждой группы заметна чётко различимая полоса, которая является местом сгущения орбит. Отметим, что часть орбит имеет значение  $z_{\max}$  близкое к нулю (плоские орбиты). Также есть и орбиты, лежащие над яркой полосой. Но, как видно из рисунка,

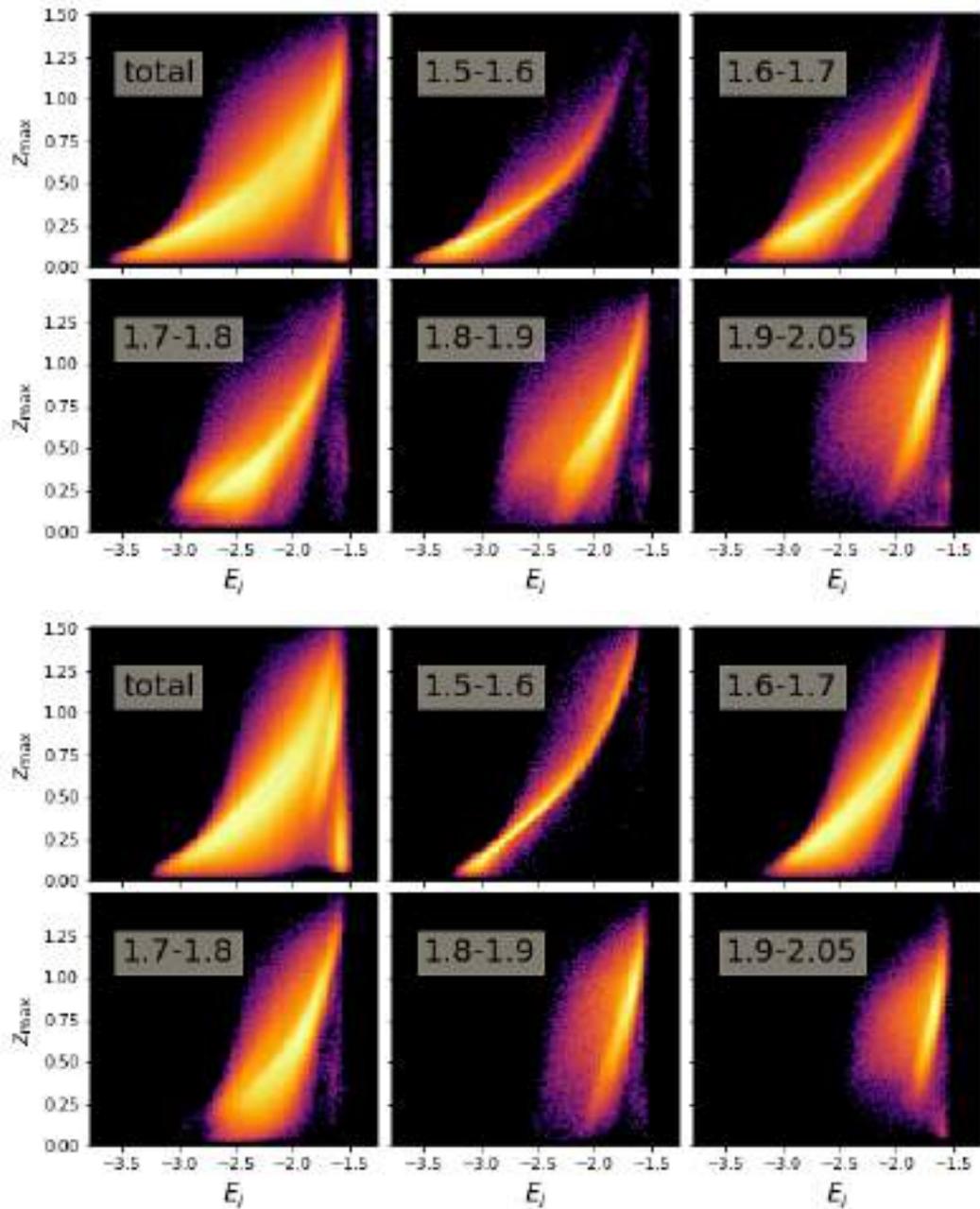


Рис. 3.17 — Распределение орбит по энергиям  $E_j$  и максимальному достижимому возвышению над плоскостью диска  $z_{\max}$  для моделей SX (сверху) и DX (снизу). В верхнем левом углу каждой из панелей представлено распределение для всех частиц бара, а в последующих — для отдельных групп орбит. Значения отношений частот выделенных групп указываются в подписи.

полоса сгущения орбит существует для каждого выделенного семейства орбит, включая орбиты с  $f_z/f_x \approx 2.0$ . Это означает, что крайние точки большинства орбит одного орбитального семейства имеют тенденцию выстраиваться вдоль некоторой гладкой кривой. По-видимому, такой феномен все же следует связывать с почти периодическими и около периодическими орбитами, иначе трудно объяснить наблюдаемое общее регулярное поведение. Как показано на Рис. 3.16, крайние точки орбит также соответствуют самым ярким точкам распределения плотности, создаваемого ансамблем одинаковых орбит каждого конкретного семейства. Отметим, что это утверждение верно не только для орбит типа бабочки, но и для орбит типа “брецелек” и орбит 7:4.

Резюмируя вышесказанное, важно отметить два факта. Во-первых, частицы стремятся проводить больше времени в крайних точках петель орбиты. Во-вторых, такие крайние точки для каждой выделенной группы орбит с фиксированным отношением  $f_z/f_x$  выстраиваются в пространстве вдоль некоторой гладкой кривой. Каждый такой сегмент, состоящий из сгущений плотности, создаваемых крайними точками соответствующих орбит из какого-либо семейства, формирует свой собственный луч X-структур. Протяженность сегмента вдоль оси абсцисс различна для различных групп орбит. Для всей же модельной галактики, в которой различные семейства перемешаны, наблюдается некий усреднённый луч, геометрические параметры которого определяются тем, какое из орбитальных семейств является доминирующим.

Рисунок 11 в работе [43] демонстрирует тот же эффект выстраивания крайних точек орбит, но только для периодических орбит  $x1v1$  и близких к ним квазипериодических и хаотических орбит. В рассмотренных в настоящей работе моделях для таких орбит выстраивание крайних точек орбит происходит только для больших  $E_j$ . Это указывают на то, что такие орбиты вносят вклад в общую X-структуру только на периферии. Отметим также, что луч, формируемый этими орбитами, исходит не из центра (в центре наблюдаются только орбиты с малыми значениями  $E_j$ ), а смещён относительно него к периферии. Такой эффект для орбит 2:1 явно заметен на Рис. 3.17 (панель с  $f_z/f_x = 1.9 - 2.05$ ).

Проведённый анализ приводит к следующей интерпретации X-структур. X-структуры есть, с одной стороны, динамический эффект, возникающей из-за неоднородности распределения плотности, создаваемого каждой конкретной орбитой, и с другой стороны коллективный эффект, возникающий за счёт того, что эти распределения плотности накладываются друг на друга определенным об-

разом. Ключевое отличие такой интерпретации X-структур от предложенной в работе [43] заключается в том, что каждый тип орбит, наблюдаемый в рассмотренных моделях, участвует в формировании X-структур. При этом общий принцип, состоящий в том, что X-структуры возникают за счёт увеличения плотности в выстроенных  $z$ -максимумах орбит, что интересно, остаётся прежним.

### 3.7 X-структуры, создаваемые различными группами орбит

#### 3.7.1 Выделение X-структур

В этом пункте свойства X-структур, формируемых из различных групп орбит, будут проанализированы более подробно. Для этого будет использоваться техника нерезкого маскирования. Нерезкое маскирование часто используется для выделения X-структур в реальных галактиках [96]. Оно позволяет повысить локальный контраст изображения там, где наблюдается резкое изменение градиента интенсивности (плотности частиц). Маскированное изображение получается из исходного заменой интенсивности в каждом пикселе на разницу между интенсивностью в пикселе и средним значением интенсивности в некоторой окрестности этого пикселя. Радиус такой окрестности в данном случае выбирался таким образом, чтобы подчеркнуть интересные особенности изображения. К маскированному изображению также применялась процедура гауссовой фильтрации.

#### 3.7.2 Свойства X-структур, составленных из различных групп орбит

Маскированные изображения для обеих моделей для всех групп орбит, выделенные ранее на Рис. 3.9, показаны на Рис. 3.18. Заметим, что все группы орбит с различными отношениями  $f_z/f_x$  создают свои собственные X-структуры за исключением орбитальной группы с  $f_z/f_x = 2.0$  в модели SX. При этом каждые такие X-структуры имеют различную морфологию за модель. Комбинированная

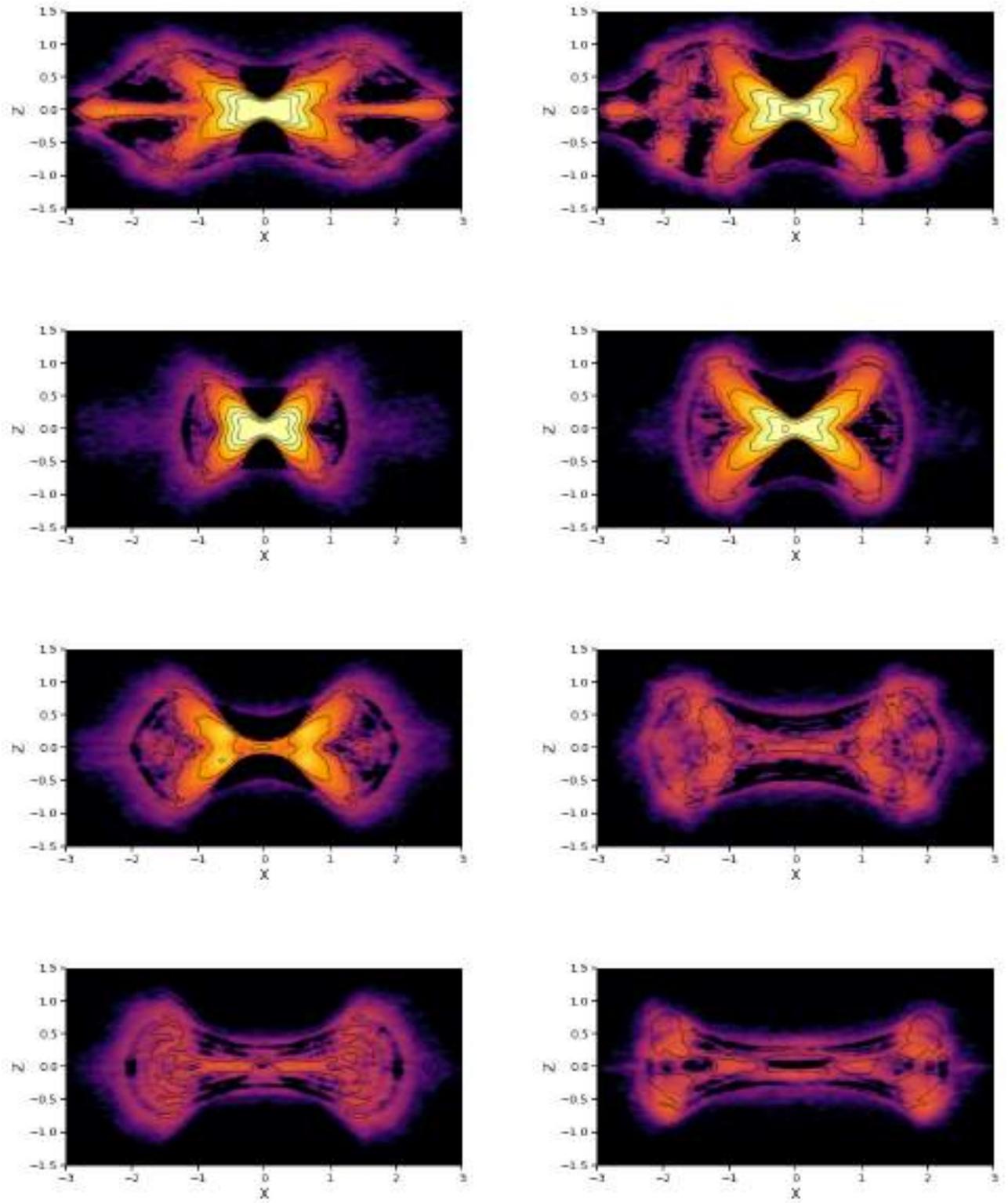


Рис. 3.18 — Маскированные изображения для моделей SX (слева) и DX (справа) для всех частицы В/PS балджа и частиц с  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$ ,  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$  и  $f_z/f_x = 1.95 - 2.05$  (сверху вниз). Показан вид с ребра в случае, когда большая ось бара выстроена перпендикулярно лучу зрения.

Отсчёты по осям указаны в единицах длины симуляций.

X-структура (Рис. 3.18, *верхний ряд*) является результатом наложения X-структур, создаваемых каждой группой орбит.

Отметим характерные изменения в морфологии X-структур при изменении отношения  $f_z/f_x$  рассматриваемых орбит. Эти изменения в целом аналогичны уже обсуждавшимся ранее изменениям в морфологии всего V/PS балджа при изменении  $f_z/f_x$  (Рис. 3.9). Для обеих моделей лучи X-структур, формируемые орбитами с низкими частотами 1.55 – 1.75 (Рис. 3.18, второй ряд сверху), выглядят короче и толще, чем лучи других групп. При этом угол раствора сравнительно большой, и между лучами практически отсутствует перемычка. С увеличением отношения частот (1.75 – 2.05) X-структуры становятся все более плоскими и более вытянутыми в радиальном направлении. При этом также растёт центральная перемычка между лучами.

X-структуры, формируемые одними и теми же группами орбит в различных моделях, отличаются друг от друга. Эти различия уже ранее были заметны на Рис. 3.9, но процедура нерезкого маскирования позволяет выделить их более четко. Во-первых, лучи X-структур орбит с низкими отношениями частот (1.55–1.75) в модели SX менее вытянуты как в вертикальном, так и в радиальном направлениях, чем в модели DX (Рис. 3.18, вторая строка сверху). Это связано с тем, что соответствующие орбиты в модели DX не только более многочисленны (Рис. 3.7), но и более широко распределены по диску. Из Рис. 3.12 видно, что соответствующие орбиты в модели DX распределены в гораздо более широком диапазоне энергий  $E_j$ , чем аналогичные орбиты в модели SX. Это означает, что размер области, населенной этими орбитами, больше, хотя форма самой области и угол раствора лучей X-структуры остаются такими же, как в модели SX.

X-структуры, формируемые орбитами с более высокими отношениями частот, также выглядят совершенно по-разному в обеих моделях. Но в этом случае различие в основном связано с тем, что группы орбит в соответствующих моделях различаются количественно. В частности, орбиты с  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$  более распространены в модели SX. Доля таких орбит сопоставима с долей орбит с  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$ , и они создают очень яркие лучи. Соответствующее маскированное изображение более яркое и с более резко выделяющейся X-структурой, чем аналогичное для модели DX. В отношении орбит с  $f_z/f_x = 1.95 - 2.05$  две модели различаются следующим образом. Во-первых, между полумесяцами в самой центральной части модели DX есть пустое пространство. Это связано с тем, что в этой модели преобладают почти периодические бананообразные орбиты, а не их

“либрирующие” аналоги (см. пункт 3.4). Во-вторых, вся структура в модели DX выглядит более вытянутой. В модели SX на маскированном изображении на периферии остаются только две слабые полуоболочки без характерного полумесяца. Такие структуры напоминают структуры, найденные ранее авторами работы [52] (см. рисунок 7, 2-я строка слева цитируемой работы).

Общая X-структура, получаемая с участием всех групп орбит, оказывается различной для рассматриваемых моделей. В модели SX, где орбиты с  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$  и  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$  одинаково многочисленны, угол раствора всей X-структуры получается как некое среднее между углом X-структуры, создаваемой орбитами с  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$ , и углом X-структуры, создаваемой орбитами с  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$ . При этом результирующий угол раствора оказывается меньше, чем угол раствора X-структуры в модели DX, где основным компонентом X-структуры являются орбиты  $f_z/f_x \simeq 1.65$ . Поскольку обе группы орбит с  $f_z/f_x = 1.55 - 1.75$  и  $f_z/f_x = 1.75 - 1.95$  в модели SX одинаково многочисленны, но соответствующие X-структуры имеют разные длины лучей и разные углы раствора, общая X-структура имеет изогнутый луч. На общем маскированном изображении такой излом луча хорошо заметен в центральных областях, где как раз происходит смена доминирующего семейства (Рис. 3.18, верхние левые панели).

Происходит ли такой переход (смена доминирующего семейства) в реальных наблюдаемых галактиках, пока что не ясно. Это ещё предстоит проверить анализом кривизны реально наблюдаемых лучей X-структуры. Заметим всё же, что некоторые X-структуры, выделенные в работах [48] (см. рисунок B4, NGC 5353) и [49] (см. их рисунок 4), демонстрируют высокую степень кривизны. Пока что, однако, нельзя исключить, что такой эффект является следствием используемых фотометрических моделей или свойств алгоритма обработки. Отметим также, что наблюдаемое искривление лучей X-структур не является характерным только для рассматриваемой в данной работе модели SX. Похожий эффект также наблюдался в численных моделях, рассмотренных Портейлом и др. [118] (хотя там он не привлек особого внимания). Действительно, если внимательно посмотреть на рисунок 3 в [118], нарушение прямолинейности луча X-структуры хорошо заметно в центральных областях маскированного изображения.

X-структура в модели DX существенно отличается от X-структуры в модели SX. Смена доминирующего семейства орбит здесь более резкая. При этом

за счёт такой резкой смены возникают дополнительные уярчения, не попадающие на лучи основной X-структуры. В принципе, наличие таких вторичных пиков плотности может быть индикатором того, что распределение отношений частот имеет два отдельных пика как на Рис. 3.7. Однако, заметим, что эффекты проекции могут приводить к тому, что дополнительные пики плотности могут быть не заметны. Например, в работе [118] авторы приводят распределение отношений частот  $f_z/f_x$  для моделей типа Млечного Пути. Рассматриваемое в цитируемой работе распределение похоже на распределение по частотам рассматриваемой здесь модели DX: в окрестности  $f_z/f_x = 5/3$  есть резкий пик и широкое плато от 1.8 до 2.0. К сожалению, орбитальный состав В/PS балджей для этих моделей авторами не исследовался, но, по-видимому, такие модели должны показывать двойные X-структуры. В тоже время на изображениях, представленных в [118], двойных X-структур не заметно. Однако эти изображения были построены для случая, когда бар сильно развернут у лучу зрения (как в случае Млечного Пути), так что, строго говоря, по ним невозможно идентифицировать точно, есть ли или нет в системе двойная X-структура.

Ещё одна особенность X-структур, формируемых группами орбит с различными отношениями  $f_z/f_x$ , заключается в следующем. В результате наложение плотностей, создаваемых такими группами орбит, в некоторых случаях на маскированных изображениях могут создаваться X-структуры как с пересекающимися в центре лучами ( $><$ ), так и с лучами с перемычками ( $> - <$ ). Оба типа морфологий встречаются в реальных галактиках [96]. В первом случае, говорят, что лучи центрированные (тип CX), во втором - нецентрированные (тип OX) В работе [45] уже исследовался вопрос о том, за счёт каких орбитальных семейств происходит образование этих двух типов, однако, авторы [45] рассматривали только орбиты близкие к орбитам 2:1. Эти авторы показали, что орбиты  $x1v1$  (в обозначении [41] или орбиты VAN в обозначении [23]) дают X-структуры типа OX, а орбиты  $x1v2$  (AVAN) приводят к образованию X-структур типа CX. Результаты данного пункта показывают, что X-структура оказывается типа CX, когда основным доминирующим семейством является семейство с низким значением отношения  $f_z/f_x$ , и типа OX, когда X-структура сформирована в основном орбитами с высокими отношениями частот.

### 3.8 Выводы главы

Для исследования природы X-структуры в рассмотренных в Главе 1 моделях в данной Главе было рассмотрено две характерных модели с различной морфологией X-структур. Начальные условия для моделей различались только степенью начального динамического нагрева звёздного диска в его плоскости, то есть рассматривались модели с различными начальными значениями параметра Тумре. В ходе эволюции в обеих моделях образовывались V/PS балдж и X-структура. В более горячей модели X-структура была двойной. На примере этих моделей было рассмотрено, как X-структуры формируются из орбит с различным отношением частот осцилляций вертикальных колебаний и колебаний в плоскости  $f_z/f_x$ . Сами отношения частот получались следующим образом. Рассматривался Фурье-спектр пространственных координат каждой частицы-“звезды”. В отличие от большинства предыдущих работ [33; 51; 52; 57; 118; 119; 132] анализ частот выполнялся в меняющемся потенциале модели  $N$ -тел. Был рассмотрен временной интервал после времени формирования бара  $t = 400 - 500$  в единицах времени симуляций или 5.9 – 7.4 млрд. лет. На рассматриваемом промежутке времени были определены значения главных частот  $f_R$ ,  $f_x$  и  $f_z$  для всех без исключения частиц звёздного диска ( $N_d = 4 \cdot 10^6$ ) для обеих моделей. Оказалось, что обычное разрешение по частоте БПФ недостаточно для надежной идентификации главной частоты. Точность определения пика была повышена с помощью ДПФ временных рядов в окрестности пиков, полученных с помощью БПФ. Полученная точность была равна  $\Delta f = 10^{-3}$  в обратных единицах времени симуляций или  $\Delta \omega = 0.45$  км/с / кпк. Это разрешение в несколько раз лучше, чем используемое в работе [120] на сравнимом по длительности интервале времени. Была оценена ширина линий и получено, что большинство пиков прослеживались, по крайней мере, с десятью точками данных с улучшенным разрешением по частоте.

Полученная точность позволила отождествить семейства орбит с различными соотношениями частот как в плоскости (отношение  $f_R/f_x$ ), так и в вертикальном направлении (отношение  $f_z/f_x$ ). В отличие от модели, рассмотренной в [120], для которой скорость узора бара постоянной во времени, в рассматриваемых здесь моделях бар постепенно замедляется. Несмотря на это различие, получившаяся картина распределения частот оказалась похожей.

Для обеих рассмотренных моделей распределение отношения  $f_R/f_x$  показывает большой пик в районе 2:1. Частицы этого пика составляют бар, наблюдаемый в рассмотренных моделях. Распределение по  $f_R/f_x$  также позволяет выделить семейство, связанное с внешним диском, и несколько небольших семейств, которые в основном состоят из частиц, орбиты которых не вытянуты вдоль бара и населяют самые центральные области диска. Далее исследовалась вертикальная структура, формируемая частицами бара, у которых соотношение частот  $f_R/f_x$  близко к 2,  $f_R/f_x = 2 \pm 0.05$ .

Для этих частиц исследовалось распределение по отношению частот вертикальных осцилляций и осцилляций в плоскости  $f_z/f_x$ . В обеих моделях распределения непрерывно заполняют промежуток от  $f_z/f_x \approx 1.5$  до  $f_z/f_x \approx 2.0$ . В обеих моделях распределения оказывались гладкими без резких резонансных пиков за исключением пика на 2:1.

С помощью константы Якоби было проанализировано, как различные группы орбит заполняют различные пространственные области моделируемых галактик. В [118] авторы утверждали, что “каждая из групп орбит является доминирующей на некотором расстоянии от центра”<sup>4</sup> Для рассмотренных моделей это утверждение оказывается верным только в случае модели SX. Но даже для этой модели каждое конкретное семейство орбит имеет широкое пространственное распространение, и в некоторых областях трудно выбрать главенствующее семейство. Для более горячей модели DX ситуация оказывается совершенно другой. Здесь одно выделенное семейство орбит преобладает над всеми остальными почти во всем баре за исключением самых центральных и периферийных областей. Отсюда можно сделать вывод, что в зависимости от рассматриваемых моделей пространственные распределения различных семейств орбит устроены по-разному, и единообразной картины для различных условий, по-видимому, нет.

В некоторых работах [20; 23; 31; 32; 43; 45; 117] бананообразные орбиты с  $f_z/f_x \simeq 2.0$  рассматривались как главные “строительные блоки” В/PS балджей и X-структур. Для рассмотренных моделей было найдено, что семейство таких орбит весьма малочисленно по сравнению с другими орбитальными семействами. Визуально такие орбиты практически незаметны на фоне огромного количества орбит с меньшими отношениями  $f_z/f_x$ .

Тем не менее, в обеих рассмотренных моделях проявляются яркие X-структуры. Чтобы определить, какими орбитами поддерживается X-структура,

---

<sup>4</sup>цитата из [118], пер. автора

были рассмотрены различные срезы распределения  $f_z/f_x$  от 1.5 до 2.0. Оказалось, что каждая выделенная группа орбит формирует свою X-структуру, которая при этом есть часть общей X-структуры. Этот эффект особенно заметен на изображениях для каждой выделенной группы, обработанных процедурой нерезкого маскирования. Затем были рассмотрены распределения плотности, создаваемые наиболее типичными орбитами в каждой из моделей. В модели DX это орбиты-“брецельки”, введенные ранее [118] с  $f_z/f_x = 5/3$ , тогда как в модели SX преобладают орбиты с  $f_z/f_x = 7/4$ . Поскольку все распределение представляется гладкими функциями от  $f_z/f_x$ , также был рассмотрен промежуточный тип орбит с соотношением частот, которое не может быть выражено простой несократимой дробью. Такие орбиты напоминают бабочку и заматают область в форме V/PS балджа. Анализ распределения плотности, создаваемого ансамблем звёзд, движущихся по орбитам кого-либо одного выделенного типа, показал, что полученное распределение неоднородно, причем самые яркие точки соответствуют крайним точкам петель таких орбит. При этом было найдено, что пространственное распределение таких крайних точек для разных орбитальных групп имеет вид плавной кривой, фиксированной для каждой конкретной группы. Таким образом, оказалось, что X-структура есть место концентрации петель (каустик) различных орбит и, соответственно, место повышенной плотности частиц. В работах [43; 117] феномен X-структур объяснялся аналогичным образом, но учитывались только орбиты 2:1 [43; 45; 46]. Одним из важных результатов данной Главы является то, что орбиты других групп, а не только орбиты 2:1, также могут формировать линейные сегменты повышенной плотности. Эти сегменты формируют X-структуру, которая есть огибающая V/PS балджа, поддерживаемого такими орбитами. Заметим, что вопрос, почему крайние точки петель упорядочены в пространстве в виде прямого луча для каждого конкретного класса орбит, не поднимался, хотя и представляется интересным. Вся X-структура является суперпозицией набора таких лучей. В соответствии с этим орбиты с различными значениями отношения  $f_z/f_x$  участвуют в формировании X-структуры, и X-структуры не связаны однозначно с орбитами 2:1. Более того, в рассмотренных моделях орбиты 2:1 практически не участвуют в формировании X-структур.

Несмотря на изначальное сходство исследуемых численных моделей, морфология образующихся V/PS балджей и X-структур в них существенно различается. Проведенный анализ выявил существенное различие и в их орбитальном составе. В частности, оказалось, в модели DX, где угол раствора общей X-

структуры больше, преобладают орбиты с более низким отношением частот, чем в модели SX. На основе анализа X-структур, создаваемых различными группами орбит, было показано, что угол раствора X-структур определяется тем, какой тип орбит является доминирующим в V/PS балдже. Орбиты с низким соотношением частот  $f_z/f_x$  формируют X-структуру с большим углом раствора. Орбиты с большим соотношением частот дают более плоскую и вытянутую X-структуру. Вероятно, с этим обстоятельством связан наблюдаемый разброс [47; 49; 97] углов раствора X-структур в реальных галактиках. В то же время, оказалось, что при отсутствии доминирующего семейства орбит луч X-структуры может быть искривленным и иметь бо́льший угол раствора в центре и меньший на периферии. Фотометрические исследования реальных галактик с X-структурой могут показать, насколько распространено это явление.

Было получено, что доминирование той или иной группы орбит определяет ещё одну особенность X-структур, ранее отмеченную в наблюдениях, а именно то, почему некоторые X-структуры имеют перемычку между лучами, а у некоторых X-структур лучи просто пересекаются в центре. Этот эффект также исследовался в работе [45], но учитывались орбиты только 2:1 (BAN) и неустойчивые орбиты 2:1 (ABAN). В рассмотренных здесь моделях пересекающиеся лучи характерны для орбит с низким соотношением частот ( $f_z/f_x \approx 1.5 - 1.85$ ), а перемычки возникают из-за орбит с более высоким соотношением частот ( $f_z/f_x \gtrsim 1.85$ ).

Отметим, что в этой главе не рассматривалась эволюция X-структур во времени. При этом в Главе 1 было показано, что параметры X-структур со временем изменяются, пусть и медленно. А именно, на больших промежутках времени длина лучей X-структур растёт, а углы раствора, как правило, уменьшаются. Как показано в настоящей главе, преобладание определенной группы орбит определяет значение угла раствора X-структур. Следовательно, эволюция X-структуры может быть связана с постепенным изменением орбитального состава, которое, в свою очередь, может быть связано с резонансным захватом новых орбит или переходом орбит из одного семейства в другое. Эту гипотезу ещё предстоит проверить, исследуя изменения орбитального состава моделей на больших промежутках времени.

## Глава 4. Улучшенная фотометрическая модель В/PS балджа с X-структурой

Данная глава подготовлена по материалам работы [134].

### 4.1 Введение

В Главе 1, где была рассмотрена серия численных моделей и было найдено, что X-структуры в рассмотренных моделях имеют углы раствора от  $26^\circ$  до  $42^\circ$ , в то время как углы раствора реальных X-структур охватывают почти тот же диапазон значений с небольшим сдвигом в сторону меньших значений [49]. Этот факт вызывает беспокойство, поскольку углы раствора X-структур реальных галактик на самом деле должны быть смещены к более высоким значениям, а именно, они должны быть в среднем больше  $30^\circ$  за счёт эффектов проекции (см. Рис. 1.22 в Главе 1). В принципе, такое несоответствие может возникнуть из-за небольшого различия в подходах к измерению углов раствора X-структуры, использованных в Главе 1 настоящей работы и в работе [49]. В [49] максимумы плотности измерялись вдоль фотометрических разрезов, перпендикулярных лучам X-структуры, в то время как в Главе 1 использовались разрезы, параллельные плоскости диска. Однако действительно ли расхождения в результатах есть следствие упомянутого различия в подходах, должно быть строго проверено, так как согласно результатам Главы 1 существуют и некоторые физические причины, в силу которых наблюдаемые X-структуры могут быть более сплюснутыми. Например, X-структуры становятся более плоскими в процессе их вековой эволюции. Следовательно, большая сплюснутость наблюдаемых X-структур может быть показателем того, что их возраст в среднем больше, чем 6 млрд. лет. Сильно сплюснутые X-структуры могут также наблюдаться в галактиках с большим вкладом тёмной материи в пределах оптического радиуса диска (см. Рис. 1.10 в Главе 1).

Еще одна несоответствие между результатами Главы 1 и результатами работы [49] заключается в том, что X-структуры, выделенные в [49], обычно демонстрируют изогнутые лучи (см. рисунок 4 цитируемой работы). При этом такого эффекта не наблюдается для X-структур в численных моделях, рассмот-

ренных в Главе 1. Опять же, такой эффект может быть показателем того, что в наблюдаемых галактиках В/PS балдж формируется набором из нескольких различных орбитальных семейств (см. Главу 3) или же такой эффект есть следствие различий в алгоритмах обработки.

В настоящей главе будет решён вопрос о том, возникают ли упомянутые несоответствия в силу различий в алгоритмах обработки, или же они возникают за счёт реальных физических причин. С этой целью В/PS балджи некоторых численных моделей из Главы 1 и реальных галактик из выборок, рассмотренных ранее в [47] и [49], будут обработаны с помощью одной и той же процедуры обработки. Отметим, что идея изучения В/PS балджей численных моделей галактик и реальных галактик с использованием одинаковых алгоритмов обработки уже использовалось в [48]. Это позволило авторам получить важные результаты, касающиеся связи между В/PS балджами реальных галактик и барлинз, что доказывает, что такой подход оказывается весьма плодотворным.

Основной инструмент, который будет использоваться в настоящей главе для исследования В/PS балджей и X-структур, — процедура фотометрической декомпозиции. В [49] В/PS балджи обрабатывались с помощью аналогичной процедуры. Но, в отличие от фотометрической модели для X-структуры, рассмотренной в [49], в настоящей главе будет построена новая фотометрическую модель, которая одновременно учитывает наличие как В/PS балджа, так и его X-структуры. Такой подход в большей степени согласуется с результатами Главы 3 и недавними исследованиями природы X-структур и В/PS балджей [42; 43], где было показано, что X-структуры являются не выделенной подсистемой В/PS балджа (в динамическом смысле), а естественной его частью, образованной теми же самыми орбитами, которые населяют и сам В/PS балдж. Новая фотометрическая модель будет построена на основе “динамического” разложения одной из численных моделей галактики, ранее рассмотренных в Главе 3. Под “динамическим” разложением здесь понимается разложение галактики на подсистемы, составленные различными орбитальными группами или семействами с разными отношениями орбитальных частот. Это разложение будет выполнено с использованием методов спектральной динамики [124], уже использовавшихся в Главе 3.

## 4.2 Фотометрическая модель В/PS балджа с X-структурой

В/PS балджи реальных галактик обычно описываются двумерной функцией Сёрсика [135],

$$I(x,y) = I_e \exp \left[ -\nu_n \left( \left( \frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right) \right], \quad (4.1)$$

где  $I_e$  — это эффективная яркость,  $R_E$  — эффективный радиус,  $n$  — индекс Сёрсика,  $\nu_n$  — это некоторая функция от  $n$  [136] и  $r$  — расстояние, измеряемое вдоль большой оси эллипса с эллиптичностью  $\varepsilon$ , проходящего через точку с координатами  $(x,y)$ . Также часто используется другая функция — функция Феррера [137]:

$$I(r) = I_0 \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{\text{out}}} \right)^{2-\beta} \right]^\gamma, \quad r < r_{\text{out}} \quad (4.2)$$

где  $I_0$  — это интенсивность в центре,  $r_{\text{out}}$  — радиус обрезания,  $\beta$  и  $\gamma$  — параметры, определяющие общую форму профиля, а  $r$  — то же самое расстояние, что и в выражении (4.1).

X-структуры выделяются на фоне В/PS балджей как резкие градиенты плотности. Обе же представленные выше функции не дают таких резких градиентов и поэтому не могут быть использованы для описания X-структур реальных галактик. Для учёта X-структур Савченко и др. [49] добавили в Ферреровский профиль плотности (4.2) возмущение следующего вида:

$$r = r_0 [1 + a_4 \cos(4(\varphi + \varphi_0))], \quad (4.3)$$

где  $a_4$  и  $\varphi_0$  — амплитуда и фаза добавляемого Фурье возмущения, соответственно. Правая часть выражения (4.3) подставляется в формулу (4.2) вместо переменной  $r$ . Итоговый двумерный профиль имеет вид бабочки с четырьмя симметричными лучами (см. Рис. 4.2, средняя панель, верхний ряд). Фотометрическая модель, полученная таким образом, действительно учитывает как В/PS балдж, так и его X-структуры. Однако при применении такой модели для измерения параметров X-структур необходимо выполнить серию дополнительных измерений максимумов плотности в фотометрических разрезах, как это было сделано в [49] для реальных галактик и в Главе 1 для модельных галактик. Если для модельных галактик такой подход хорошо работает, так как нет проблем с пространственным

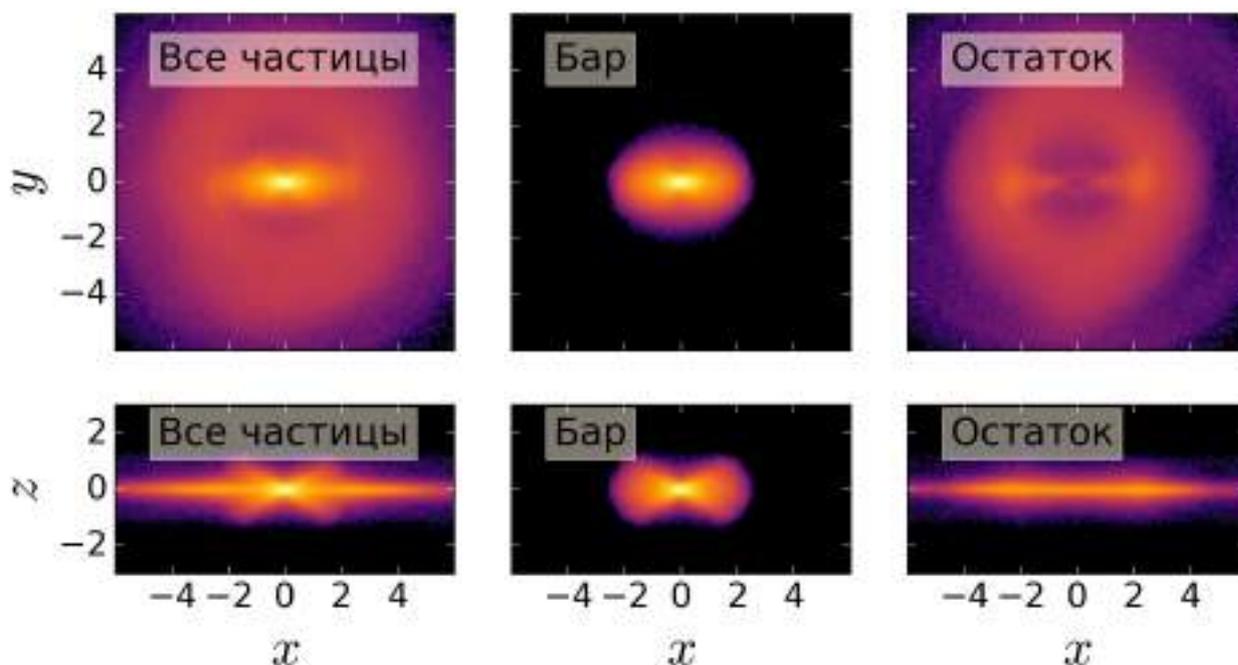


Рис. 4.1 — Выделение в типичной модельной галактике бара на основе частотного анализа. Слева: изображение всей галактики; В центре: только бар-компонента; Справа: остаток (вся модель минус бар-компонента).

разрешением, то для реальных галактик в принципе может существовать ситуация, когда отдельные пики плотности определяются плохо. Также существует потенциальная проблема, связанная с тем, что результат может зависеть от того, используются ли разрезы параллельные плоскости диска или разрезы, каким-либо образом наклонённые к плоскости диска. В случае реальных галактик плоскость диска может быть наклонена к лучу зрения под небольшим плохо определяемым углом, и в этом случае, строго говоря, нужно подстраивать направление фотометрических разрезов индивидуально под исследуемую галактику. Чтобы избежать подобных проблем, в настоящей главе параметры X-структур будут измеряться только с использованием некоторой фотометрической модели. С этой целью будет построена новая фотометрическая модель, в которой значение угла раствора будет фигурировать явно.

Рассмотрим бар и соответствующий V/PS балдж реперной модели из Главы 1 с  $M_h = 1.5$ ,  $Q(2R_d) = 1.2$ ,  $Z_d/R_d = 0.05$  и без балджа, где бар, образуется естественным образом за счёт эффектов самогравитации. Рис. 4.1 показывает распределения плотностей в  $(xy)$  и  $(xz)$  плоскостях, создаваемые всеми частицами-“звёздами” (левая панель), только частицами бара (средняя панель) и всеми частицами, не захваченными в бара (правая панель). Распределения показаны на 6 млрд. лет. Представленное разделение на частицы, захваченные в бар и

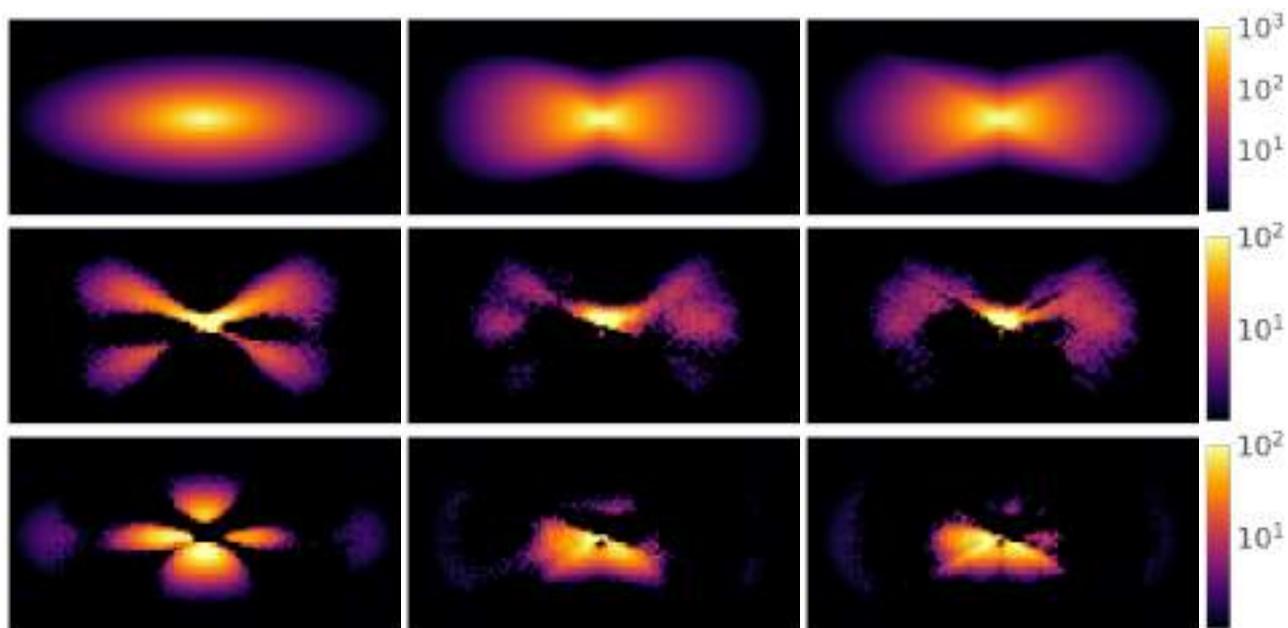


Рис. 4.2 — Различные фотометрические модели вертикального распределения плотности в баре, показанного на Рис. 4.1 (верхний ряд) и изображения остатков, положительная часть (средний ряд) и отрицательная часть (нижний ряд). Левая колонка: обычная сёрсиковская модель; Средняя колонка: модель из Савченко и др.[49]; Правая колонка: фотометрическая модель из настоящей работы.

не захваченные в бар, было сделано с использованием спектральных характеристик орбит (отношений частот  $f_r/f_x$  и  $f_z/f_x$  и самих значений частот  $f_x$  и  $f_y$ ), как это делалось в Главе 3. В силу того, что бар, представленный на Рис. 4.1, очищен от вклада диска (а также так называемых “ручек” или, как их ещё называют, ансе (от англ. “ansae”, см. правую панель Рис. 4.1), такой бар может быть использован для проверки того, насколько хорошо различные фотометрические модели В/PS балджа восстанавливают реально наблюдаемое распределение плотности. Отметим, что именно в этом состоит преимущество использования модельных данных для проверки различных фотометрических моделей, состоящее в том, что можно избежать необходимости учитывать другие компоненты и изучать только распределение плотности в самом В/PS балдже.

На Рис. 4.2 можно видеть три различных оптимальных фотометрических модели для распределения плотности в баре, показанного на правой панели Рис. 4.1: обычная сёрсиковская модель (левая панель), модель Савченко и др. [49] (средняя панель) и новая фотометрическая модель из настоящей работы (правая панель), детали которой будут приведены ниже. Процедура подгонки была выполнена с использованием пакета `Imfit` [138]. Для нахождения оптимальных значений параметров использовался метод максимального правдоподобия и рассматрива-

лась статистика  $\chi^2$ :

$$-2 \ln \mathcal{L} = \chi^2 = \sum_{i=0}^N w_i (I_{m,i} - I_{d,i})^2, \quad (4.4)$$

где  $w_i$  — это веса индивидуальных пикселей, а  $I_{m,i}$  и  $I_{d,i}$  есть интенсивности в фотометрической модели и в исходном изображении, соответственно. В тексте далее значения  $\chi^2$  будут приводиться с нормировкой на степени свободы  $\nu = n - m$ , где  $n$  — количество пикселей на изображении, а  $m$  — количество свободных параметров. Серсиковская модель приводится на Рис. 4.2 в основном из методологических соображений. На её примере хорошо видно, что при использовании обычной сёрсиковской модели для аппроксимации В/PS балджа в остатке остаются четыре ярких луча, которые можно связать с X-структурами. Модель, использованная в работе [49], в целом хорошо описывает наблюдаемое распределение плотности, однако она не демонстрирует резко выделяющихся острых лучей, параметры которых можно было бы связать с параметрами X-структур. Чтобы построить фотометрическую модель, в которой значение угла раствора фигурирует явно, рассмотрим обычный сёрсиковский профиль (4.1) и модифицируем его следующим образом:

$$I(x,y) = \begin{cases} I_s(x,y), & y \leq kx, \\ I_s(x,y) \cdot \exp(-|x - x_0|/s_x), & y > kx. \end{cases} \quad (4.5)$$

Здесь  $I_s(x,y)$  — интенсивность обычной функции Сёрсика (4.1) в пикселе с координатами  $x$  и  $y$ ,  $k$  — угловой коэффициент луча X-структуры, арктангенс которого есть значение угла раствора  $\varphi = \arctan k$ ,  $x_0$  — это абсцисса точки, которая имеет ординату  $y$ , но при этом лежит на луче X-структуры,  $x_0 = y/k$  и  $s_x$  — это параметр, который определяет, как быстро интенсивность спадает в области выше луча. Выражение (4.5) приведено для первого квадранта. Для оставшихся трёх квадрантов необходимо сделать замену знаков перед  $x$  и  $y$ .

Рис. 4.3 схематично показывает, как рассчитывается интенсивность в такой двумерной фотометрической модели. Ниже луча распределение интенсивности совпадает с распределением интенсивности, задаваемым сёрсиковским профилем. Выше же луча спад интенсивности более быстрый, чем в обычном сёрсиковском профиле. Отметим, что в ходе работы также были проведены эксперименты с различными законами падения плотности. Например, также было рассмотрено

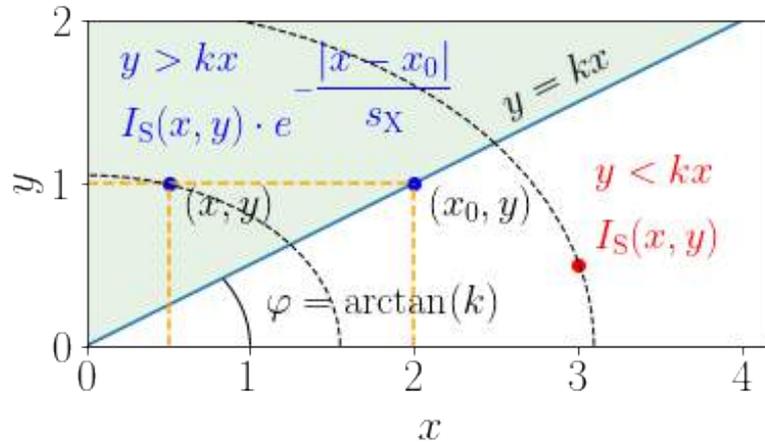


Рис. 4.3 — Схематическое изображение, показывающее, как рассчитывается интенсивность в фотометрической модели, определяемой выражением (4.5).  $I_S$  здесь обозначает интенсивность обычной двумерной функции Сёрсика.

спадание по закону  $\sim \exp -x^2$ , но оказалось, что использование экспоненциального и гауссового законов спадаения приводит к схожим результатам. В итоге использовался экспоненциальный закон. Отметим, что также рассматривались и другие варианты направления преимущественного спадаения плотности в выражении (4.5). Например, рассматривалось спадаение плотности вдоль эллиптических изофот или прямых линий, перпендикулярных лучу X-структуры. В обоих этих случаях было найдено, что такие модели дают некоторые нефизичные профили плотности при применении к некоторым реальным галактикам.

Одним из важных параметров предложенной выше модели является эллиптичность изофот  $\varepsilon$ . В отличие от простой сёрсиковской модели параметр эллиптичности для модели, задаваемой системой (4.5), полностью определяет форму изофот только ниже луча X-структуры. Форма же изофот выше луча определяется как эллиптичностью, так и параметром  $s_x$ . В силу некоторых технических причин удобно определять эллиптичность следующим образом:

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 - b/a, & b \leq a \\ a/b - 1, & b > a, \end{cases} \quad (4.6)$$

где  $a$  и  $b$  — длины большой и малой осей эллипса-изофоты, соответственно. Согласно такому определению  $\varepsilon$  может принимать значения от  $-1$  до  $1$ . В случае больших отрицательных значений ( $\varepsilon \approx -1$ ) изофоты модели между плоскостью диска и лучами X-структуры могут идти практически перпендикулярно плоскости диска.

С точки зрения  $\chi^2$  фотометрическая модель, использованная Савченко и др. [49], практически идентична предложенной здесь фотометрической модели (4.5), и первая даже немного лучше, 0.7 против 0.8, соответственно. При этом обе этих модели значительно лучше модели Сёрсика, для которой  $\chi^2 = 1.8$ . Вычеты также выглядят похоже (Рис. 4.3). Интересно, что распределение интенсивности в вычете показывает чёткую асимметрию на уровне около 10% от общей интенсивности (см. подписи к цветовому бару). Вероятно, такая асимметрия является следствием первичного изгиба бара в этой конкретной модели галактики. Также интересно, что модель Савченко и др. [49], примененная здесь для “чистого” В/PS балджа с предварительно убранной компонентой диска не показывает характерных тёмных областей под лучами X-структуры. Такие области наблюдаются практически на всех изображениях X-структур, выделенных в реальных галактиках в [49]. Возможно, это означает, что наличие таких областей связано не с моделью балджа, а с моделями других компонент (например, моделью диска).

Предложенная здесь фотометрическая модель характеризуется девятью параметрами. Четыре из них являются стандартными параметрами для любой фотометрической компоненты: координаты центра, позиционный угол и интенсивность в центре. Ещё три параметра совпадают с аналогичными для двумерной функции Сёрсика. Это эффективный радиус  $r_x$ , индекс Сёрсика  $n_x$  и эллиптичность изофот  $\varepsilon_x$ . Нижний индекс здесь добавлен, чтобы избежать дальнейшей путаницы с простой сёрсиковской моделью. Ещё два параметра определяют параметры луча X-структур. Это угол раствора  $\varphi$  и характерный масштаб падения плотности над лучом X-структуры  $s_x$ . На практике отношение  $r_x/s_x$  является хорошим индикатором того, насколько резко выделяется X-структура на фоне всего В/PS балджа и диска. На Рис. 4.4 представлено несколько примеров, как выглядит предложенная здесь фотометрическая модель для разных значений этого отношения. Видно, что чем меньше отношение  $r_x/s_x$ , тем меньше провал между лучами и тем ближе рассматриваемая модель к обычной модели Сёрсика. Здесь и далее отношение  $r_x/s_x$  будем называть параметром контрастности. В принципе значение этого параметра можно связать с формой В/PS балджа. А именно, значение этого параметра может показывать имеет ли балдж форму более близкую к ящику или к арахису. Однако, заметим, что эллиптичность  $\varepsilon_x$  также влияет на распределение интенсивности выше луча. Это связано с тем, что в предложенной модели распределение интенсивности выше луча получается модификацией распределения интенсивности двумерной функции Сёрсика, одним из параметров которой и

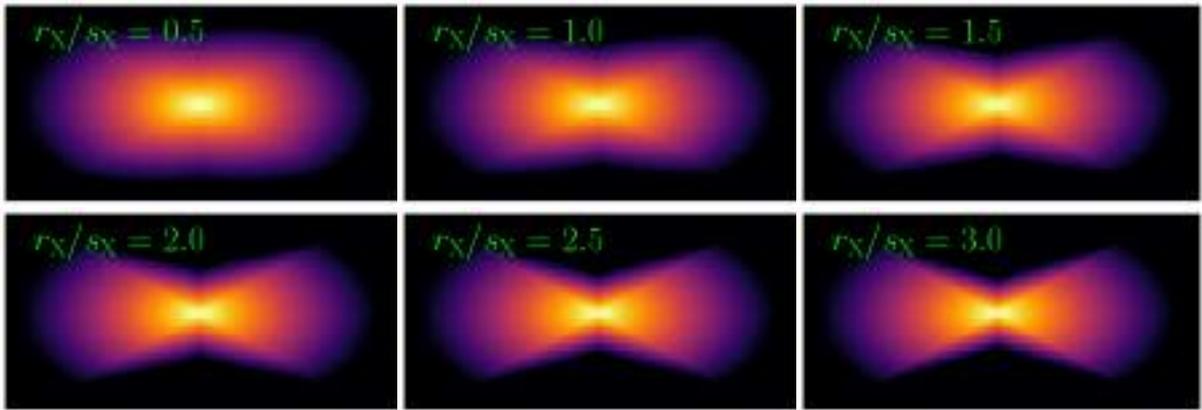


Рис. 4.4 — Вид фотометрической модели (4.5) для различных значений параметра контрастности  $r_x/s_x$  и фиксированных значений линейного масштаба  $r_x$ , индекса Сёрсика  $n_x = 1$  и угла раствора  $\varphi = 30^\circ$ . Другие параметры модели также имеют одинаковые значения для всех представленных случаев.

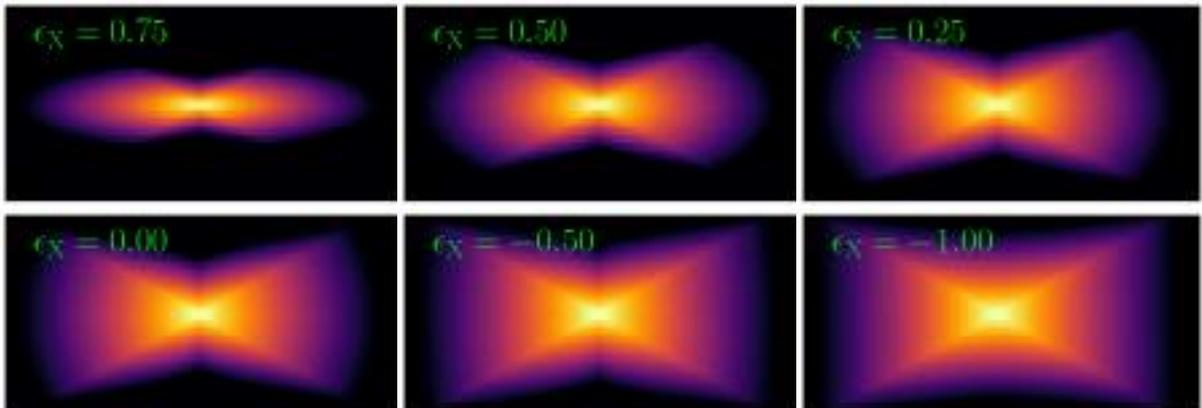


Рис. 4.5 — Вид фотометрической модели (4.5) для различных значений эллиптичности  $\epsilon_x$  и фиксированного значения параметра контрастности  $r_x/s_x = 2$ , индекса Сёрсика  $n_x = 1$  и угла раствора  $\varphi = 30^\circ$ . Другие параметры модели также имеют одинаковые значения для всех представленных случаев.

является эллиптичность. Из Рис. 4.5 видно, что профиль начинает напоминать ящик с уменьшением  $\epsilon_x$ . В то же время во всех случаях выделяется заметная X-структура. Из рисунка также видно, что использовать параметр  $\epsilon_x$  как индикатор формы балджа следует только для моделей с похожими значениями  $r_x/s_x$ . Положительной стороной такого довольно сложного поведения является то, что фотометрическая модель может учитывать случаи, когда В/PS балдж имеет форму ящика, но при этом на его фоне резко выделяется X-структура.

В заключение этого пункта заметим, что была получена модель В/PS балджа, в которой значение угла раствора X-структуры фигурирует явным образом. Далее для краткости будем называть такую модель моделью ХВ (от англ. “X-shaped bulge”).

### 4.3 Подгонка модели

Поскольку фотометрическая модель имеет на два параметра больше, чем обычная модель сёрсиковского балджа, найти оптимальные параметры такой модели сложнее, чем в случае обычного сёрсиковского балджа. В этом пункте будет подробно описано, как решалась эта проблема в данной работе. Прежде всего, будем предполагать, что индекс Сёрсика  $n_x$  для рассматриваемых балджей должен быть близок к единице. Это предположение основано на том факте, что бары когда-то были частью дисков, в которых они существуют, и поэтому имеют профиль плотности экспоненциального типа. Для надежности это предположение было проверено в серии дополнительных прогонов со свободными значениями  $n_x$  для некоторых из модельных галактик. В таких пробных экспериментах было найдено, что индекс Сёрсика действительно близок к единице для различных моделей (точнее, он получается в диапазоне от около 0.9 до 1.3).

Сама подгонка выполнялась итеративным способом, от простой начальной модели типа “диска+балдж” к конечной многокомпонентной, включающей в себя более сложный диск, обрезанный внутрь (см. ниже), и X-структуру. Вся процедура делилась на три этапа, а именно:

1. Предварительный прогон; целью этого прогона являлось определение начальных условий для XВ модели балджа.
2. Промежуточный прогон; на этом этапе проводилась некоторая дополнительная доводка параметров (см. ниже).
3. Итоговый прогон, в котором определялись окончательные значения параметров для XВ модели вместе с параметрами другими фотометрическими компонент.

Опишем более подробно каждый из этапов. В предварительном прогоне находится оптимальная фотометрическая модель галактики, в которой V/PS балдж подгоняется с помощью обычной (не модифицированной) функции Сёрсика с фиксированным значением индекса Сёрсика  $n = 1$  и фиксированным значением позиционного угла  $\varphi_{pa} = 90^\circ$ . На этом этапе еще не применяется модифицированная модель балджа. Подгонка выполняется вместе с другими компонентами, такими как диск, кольцо и т. д. В результате такого предварительного прогона находятся грубые параметры диска и оптимальные параметры обычного сёрсиковского балджа. После того, как получены оптимальные параметры обычного

сёрсиковского балджа, с их помощью находится начальное приближение для параметров ХВ модели балджа. Поскольку модель ХВ отличается от модели обычного сёрсиковского балджа наличием только двух дополнительных параметров (при этом все остальные параметры фактически совпадают), начальные значения параметров модели ХВ могут быть приравнены значениям соответствующих параметров для ранее полученной модели обычного сёрсиковского балджа. Новыми параметрами, значения которых необходимо каким-то образом выбрать, являются  $\varphi$  и  $s_x$ . Характерный диапазон углов раствора реальных галактик составляет от  $20^\circ$  до  $40^\circ$ . Поэтому значение угла раствора можно выбрать вблизи  $30^\circ$ . Характерный масштаб спадания плотности  $s_x$  можно оценивать по-разному. В настоящей работе в качестве грубого начального приближения  $s_x$  рассматривалась величина характерного вертикального масштаба диска  $z_d$ . После получения начального набора параметров для ХВ модели балджа подгонка всех компонент из предварительного прогона выполнялась заново уже с использованием модели ХВ для представления балджа. На этом этапе также иногда добавляются некоторые дополнительные компоненты, такие как кольцо или небольшие гауссианы. Затем выполняется ещё один вспомогательный прогон, в котором для модели ХВ значение позиционного угла  $\varphi_{pa}$  и координаты центра фиксированы (позиционный угол фиксируется на  $90^\circ$ ). Такой прогон необходимо выполнять, так как в противном случае решение может “уехать” из-за добавления дополнительных компонент. Наконец, в финальном прогоне освобождаются все параметры балджа (за исключением индекса Сёрсика  $n_x$ ) и снова выполняется поиск оптимальных параметров.

Важной особенностью настоящего исследования является то, что вместо обычной модели диска будет рассматриваться модель диска, обрезанного внутри, или, проще говоря, модель диска с дыркой в центре:

$$j(r, z) = j_0 \operatorname{sech}^{2/n} \left( \frac{nz}{2z_0} \right) \times \begin{cases} \exp \left( -\frac{r}{h} \right), & r \geq R_T, \\ \exp \left( -\frac{r}{h} - \frac{R_T - r}{h_T} \right), & r < R_T. \end{cases} \quad (4.7)$$

Здесь  $j_0$  — плотность светимости в центре,  $h$  — величина экспоненциального масштаба в плоскости диска,  $z_0$  — вертикальный масштаб,  $n$  определяет, к какому типу профиля вертикальное распределение ближе, к  $\operatorname{sech}^2$  с  $n = 1$  или  $\exp(-z/z_d)$  с  $n \rightarrow \infty$ ,  $r_T$  — размер дырки и  $h_T$  — характерный масштаб спадания плотности к центру. Выражение (4.7) записывается в цилиндрической системе координат

$(r, z)$ . Интенсивность в каждом конкретном пикселе получается интегрированием величины  $j(r, z)$  вдоль луча зрения.

Причины рассматривать именно такую модель диска следующие. Во-первых, если посмотреть на изображение различных динамических компонент в ранее рассмотренной модельной галактике (Рис. 4.1), то можно заметить, что дисковая компонента действительно имеет провал в центре. С физической точки зрения такая ситуация понятна, так как в условиях сильного бара звездам в центральной области тяжело удержаться на круговых орбитах, и они преимущественно захватываются в бар. По-видимому, схожая ситуация должна возникать и в реальных галактиках, однако здесь дело обстоит сложнее. Различные типы моделей дисков действительно часто обсуждаются в контексте галактик с барами (см., например, [139]). Но в случае реальных галактик изменения в профиле плотности диска могут возникать не вследствие бара, а вследствие других физических причин [139]. Кроме того, в наблюдательных работах обычно рассматривают диски с изменением наклона профиля плотности, как в [139], а не с дыркой. При изучении же В/PS балджей важно следующее. Если диск на самом деле имеет дырку в центре, а при этом подгоняется профиль плотности диска, который, наоборот, растёт к центру, то естественно ожидать, что профиль плотности В/PS балджа в этом случае будет искажён неким нетривиальным образом из-за того, что часть интенсивности “уйдет” в дырку. В случае же модели диска с дыркой такое искажение может быть скомпенсировано хотя бы частично, даже если параметры дырки оцениваются грубо. Вопрос о различных моделях диска будет обсуждаться более тщательно в следующем пункте. Сама по себе подгонка фотометрической модели диска с дыркой выполнялась следующим образом. На практике было обнаружено, что в некоторых случаях необходимо зафиксировать приближенные значения параметров дырки  $R_T$  и  $h_T$  и оставлять их фиксированными пока не будет определена оптимальная модель балджа с X-структурой. Эти параметры затем освобождались в финальном прогоне.

В ходе работы также использовались другие стандартные фотометрические компоненты. Это гауссово кольцо, плотность светимости которого определяется следующим выражением:

$$j(r, z) = j(r_{\text{ring}}, 0) \exp\left(-\frac{(r - r_{\text{ring}})^2}{2\sigma_{\text{ring}}^2}\right) \exp\left(-\frac{|z|}{h_z}\right), \quad (4.8)$$

где  $r_{\text{ring}}$ ,  $\sigma_{\text{conf}}$ ,  $h_z$  — радиус, ширина и высота кольца, соответственно, а  $j(r_{\text{Ring}}, 0)$  — плотность светимости при  $r = r_{\text{ring}}$ . В некоторых случаях также использовалась двумерная гауссиана:

$$I(a) = I_0 \exp(-a^2/(2\sigma^2)). \quad (4.9)$$

Здесь  $\sigma$  — это характерный размер гауссианы, а  $A$  — это расстояние между данным пикселем и центром гауссианы. Для учета пыли в реальных галактиках использовался метод, использованный ранее в [49], в котором пылевая компонента представляется диском с отрицательной интенсивностью, видимым с ребра. Интенсивность диска, видимого с ребра, рассчитывалась по следующей формуле:

$$I(r, z) = M_h(0, 0) \frac{r}{h} K_1 \left( \frac{r}{h} \right) \text{sech}^{2/n} \left( \frac{nz}{2z_0} \right), \quad (4.10)$$

где  $M_h(0, 0)$  — центральная поверхностная яркости,  $K_1$  — модифицированная функция Бесселя первого рода, а все остальные обозначения такие же, как и в выражении (4.7) для профиля трёхмерного диска.

Для оценки ошибок параметров использовался алгоритм бутстрэп ресемплинга (*от англ. “bootstrap resampling”*), программная реализация которого встроена в пакет Imfit. Этот алгоритм работает следующим образом. Для исследуемого изображения галактики строится аналогичное изображение, но для этого нового изображения значения некоторых пикселей заменяются случайным образом на значения других пикселей из исходного изображения. Затем выполняется подгонка фотометрической модели для такого нового изображения, и определяются оптимальные значения параметров модели. Для каждой из модельных и реальных галактик выполнялось 200 подобных итераций (минимальное количество итераций, рекомендованное автором Imfit’a). По распределению каждого из параметров затем находится соответствующий доверительный интервал.

Ниже будут приведены результаты фотометрической декомпозиции модельных и реальных галактик. Вначале будут приведены результаты для численных моделей и показано, как различные эффекты, которые не являются следствием каких-либо физических причин, влияют на получаемые параметры В/PS балджей. Такими эффектами являются эффекты проекции, связанные с возможным наклоном диска или поворотом бара вокруг оси диска, и эффекты, связанные с выбором фотометрической модели (в частности, с выбором модели диска). Также процедура декомпозиции будет проведена для некоторой модельной галактики, в которой изначально добавлен классический балдж. Это делается

для проверки того, как наличие в галактике балджа другой физической природы влияет на измеряемые параметры В/PS балджа. Затем будет рассмотрено, как значения получаемых параметров меняются для различных физических моделей и, наконец, значения, полученные для модельных и реальных галактик, будут сравнены между собой.

#### 4.4 Численные модели

В данном пункте будут заново рассмотрены четыре различные модели галактики, уже исследовавшиеся в Главе 1. При этом для одной реперной модели будет проведён анализ влияния эффектов проекции и фотометрической модели диска. В качестве реперной модели рассмотрим реперную модель из Главы 1 с  $M_h = 1.5$ ,  $Q(2R_d) = 1.2$  и  $Z_d/R_d = 0.05$ . Рассмотрим один момент времени, а именно  $T \approx 6$  млрд. лет после начала моделирования. На этот момент времени быстрая вертикальная эволюция бара уже не идет, В/PS балдж эволюционирует медленно и почти без изменений в морфологии X-структуры. По распределениям плотности звёздной компоненты на рассмотренный момент времени подготавливался набор fits-изображений (*англ.* Flexible Image Transport System) для нескольких ориентаций бара относительно оси диска (азимутальных углов бара) и нескольких наклонов плоскости диска. Здесь и далее азимутальный угол бара рассчитывается от луча зрения, то есть этот угол составляет  $0^\circ$ , когда большая ось бара выровнена вдоль луча зрения, и  $90^\circ$ , когда большая ось бара ортогональна лучу зрения.

Фотометрическая модель для балджа с X-структурой (4.7) характеризуется девятью различными параметрами. Но только четыре из них представляют интерес для сравнения с реальными наблюдательными данными. Дело в том, что значение любого размерного параметра (масштаб, интенсивность), измеренного в моделях, зависит от процедуры нормировки. Чтобы сравнить размерные параметры, полученные в моделях, с данными наблюдений, необходимо знать некоторые количественные характеристики реальных галактик, такие как масштабная длина, общая масса диска и параметры тёмного гало. Так как, в свою очередь, определение этих параметров для реальных галактик осложняется наличием различного рода ошибок, в настоящей работе будут рассмотрены только безразмерные па-

раметры. И именно их значения будут сравниваться для модельных и реальных галактик. Таких параметров всего четыре: угол раствора лучей X-структур  $\varphi$ , параметр контрастности  $r_x/s_x$ , эллиптичность изофот  $\varepsilon_x$  и индекс Сёрсика  $n_x$ . Ниже будут представлены результаты только для двух из них,  $\varphi$  и  $r_x/s_x$ . Значение  $n_x$  фиксируется на единицу в настоящей работе. Для эллиптичности  $\varepsilon_x$  было найдено, что её значения в основном лежат в диапазоне от 0.2 до 0.5 в случае модельных галактик, хотя есть и некоторые интересные исключения, когда она принимает отрицательные значения. Эллиптичность также показывает некоторую корреляцию с азимутальным углом бара и видом фотометрической модели диска, однако, чтобы не усложнять дальнейшую дискуссию, параметр эллиптичности более обсуждаться не будет.

### **“Идеальные” значения параметров**

В численных моделях существует возможность отделить бар от остальных компонент с помощью некоторых динамических соображений (см. Рис. 4.1). В настоящей работе эта возможность будет использована с целью наиболее тщательно исследовать, какое влияние оказывают различные нефизические эффекты на получаемые параметры. Для этого для каждого из исследуемых полных изображений модельной галактики с диском и баром были подготовлены изображения, на которых с помощью анализа частот была выделена только компонента бара. Пример такого изображения для реперной модели показан ранее на Рис. 4.1. Такие изображения также можно анализировать с помощью процедуры фотометрической декомпозиции, однако в данном случае компоненты должна быть всего одна, а именно модель В/PS балджа. По сути, анализ выделенных по динамическим параметрам В/PS балджей позволяет получать “идеальные” значения параметров в том смысле, что параметры полученного балджа при этом независимы от выбранной модели диска и моделей других фотометрических компонент. Параметры полученной модели балджа по такому изображению без диска можно затем сравнить с параметрами модели, полученной по полному изображению всей модельной галактики. Сравнение с “идеальными” значениями параметров позволяет более чётко понять, как изменения в фотометрической модели (в той же модели диска) влияют на получаемые параметры балджа.

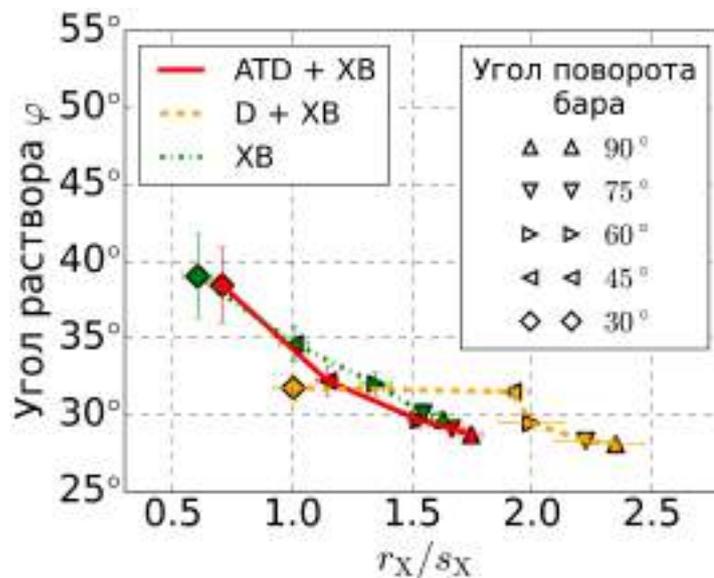


Рис. 4.6 — Влияние различных фотометрических моделей диска и азимутального угла бара на угол раствора  $\varphi$  и параметр контрастности  $r_x/s_x$  фотометрической модели балджа с X-структурой. Для обозначения фотометрических компонент в легенде используются следующие сокращения: “D” — обычный экспоненциальный диск, видимый с ребра, “ATD” — диск, обрезанный внутрь и также видимый с ребра (см. основной текст), “XB” — введённая ранее модель балджа с X-структурой.

### Различные фотометрические модели диска

Рассмотрим два типа моделей дисков: простой экспоненциальный диск и диск, обрезанный внутрь (см. пункт 4.3). Рис. 4.6 показывает как распределены углы раствора и параметры контрастности для различных азимутальных углов бара для этих двух фотометрических моделей диска (оранжевым и красным цветом, соответственно) и для В/PS балджа с предварительно вычтенным диском (зелёным цветом). Из рисунка видно следующее. Во-первых, если бар виден практически сбоку (азимутальный угол от  $75^\circ$  до  $90^\circ$ ), в В/PS балдже наблюдается ярко выраженная X-структура ( $r_x/s_x$  от 1.5 до 2.5, см. для сравнения Рис. 4.4). С точки зрения углов раствора выбор модели диска в этом случае оказывается существенен: разница между моделью диска с дыркой и простой моделью экспоненциального диска составляет около  $1^\circ$ . Обе модели дают значения углов раствора меньше, чем “идеальные” значения (зеленая кривая) примерно на  $2^\circ$ , хотя расхождение и становится больше для меньших углов поворота бара. В целом же, различные модели дисков дают практически согласующиеся друг с другом значения углов раствора в случае бара, видимого сбоку, и в этом случае полученные значения близки к «идеальным» значениям. Однако с точки зрения

другого параметра — параметр контрастности — применение различных моделей дисков приводит к значимым отличиям. Применение простой модели диска приводит к существенно большим значениям этого параметра. То есть простая модель диска приводит к более выраженной, чем она есть на самом деле, X-структуре.

При повороте бара на угол от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  В/PS балдж сжимается до такой степени, что наблюдаемый профиль начинает существенно зависеть от выбранной модели диска. Для таких азимутальных углов бара наблюдается большое несоответствие не только для параметров контрастности, но и для углов раствора. Простая экспоненциальная модель диска даёт значения, которые меньше, чем идеальные примерно на  $5^\circ$ - $7^\circ$ .

Еще одна важная деталь, которую нужно отметить, касается модели диска с дыркой. Дело в том, что модель диска с дыркой вырождается для баров, повернутых менее чем на  $60^\circ$ . А именно, для таких азимутальных углов бара модель имеет тенденцию увеличивать масштаб дырки  $h_T$  по мере уменьшения угла поворота бара. Другими словами, дырка постепенно замывается при вращении большой оси бара к лучу зрения. Это происходит потому, что для галактики, наблюдаемой с ребра, наблюдатель видит интегрированный вдоль луча зрения профиль светимости, и при этом система “диск+бар” может иметь некоторые дополнительные асимметричные компоненты, такие как ансе (см. Рис. 4.1). Они связаны с баром и при повороте бара также поворачиваются к лучу зрения. При этом по мере поворота они всё более и более накладываются на диск и бар, внося дополнительный вклад в интенсивность в центральных областях. На практике при подгонке модели значение  $h_T$  фиксировалось, если соотношение  $r_T/h_T$  оказывалось больше двойки. В этом случае модель диска имеет плато в центре вместо дырки. Тем не менее, Рис. 4.6 показывает, что даже такая вырожденная модель обрезанного внутри диска всё же лучше, чем модель простого экспоненциального диска, особенно в случае малых параметров контрастности.

### Влияние наклона диска

Хотя в выборке реальных галактик, которая будет изучаться ниже, в основном представлены только галактики, видимые практически с ребра, полезно проверить насколько зависят значения получаемых параметров от небольшого

наклона плоскости диска. Проблема здесь состоит в том, что свет, приходящий от слегка наклонённого диска, смешивается с излучением, приходящим от В/PS балджа. При этом чем более наклонённый диск рассматривается, тем в большей степени модель диска оказывает влияние на В/PS балдж. Чтобы оценить влияние наклона диска, рассмотрим четыре следующих случая. Во-первых, проверим, как параметры самого В/PS балджа изменяются с наклоном в том случае, если диск предварительно убран из динамических соображений. Рис. 4.7 (левая верхняя панель) показывает зависимость угла раствора  $\varphi$  и параметра контрастности  $r_x/s_x$  от наклона диска для различных углов поворота бара. Как видно из рисунка, слегка наклонённый В/PS балдж имеет почти такие же значения углов раствора X-структур и параметров контрастности, что и не наклонённый В/PS балдж. Это результат означает, что свойства самого балджа слабо меняются при малых углах наклона плоскости диска.

Далее рассмотрим, как наклон диска влияет на параметры В/PS балджа, если компонента диска присутствует на изображении. Рассмотрим поведение трёх различных фотометрических моделей диска: *a)* наклонённого трехмерного диска с дыркой (Рис. 4.7, справа сверху); *b)* не наклонённого диска с дыркой (Рис. 4.7, слева снизу); *c)* простого не наклонённого экспоненциального диска (Рис. 4.7, справа снизу). Последние два случая следует рассматривать, поскольку наклон диска, хотя его и можно рассматривать как свободный параметр, в некоторых случаях надёжно оценить трудно из-за фактического разрешения изображения и наличия других фотометрических компонент.

Общий вывод из Рис. 4.7 следующий. Наклон диска действительно изменяет значения угла раствора и параметра контрастности. При этом лучшая фотометрическая модель диска, которая даёт значения, наиболее согласующиеся с идеальными, — это модель трёхмерного наклонённого диска с дыркой в центре. Для этой модели значения углов раствора и параметра контрастности практически не различаются для различных углов поворота бара и наклона диска, как и в ранее рассмотренном случае В/PS балджа без диска (см. Рис. 4.7, левая верхняя панель). Фотометрическая модель не наклонённого диска с фиксированным значением наклона  $i = 90^\circ$ , примененная к реально наклонённому диску, даёт значения углов раствора отличные от идеальных значений примерно на  $2^\circ - 3^\circ$  в зависимости от ориентации бара и наклона диска. Значение параметра контрастности также зависит от наклона диска в этом случае. Как видно из Рис. 4.7, использование простой модели диска (без дырки) приводит к сильным искажениям параметров

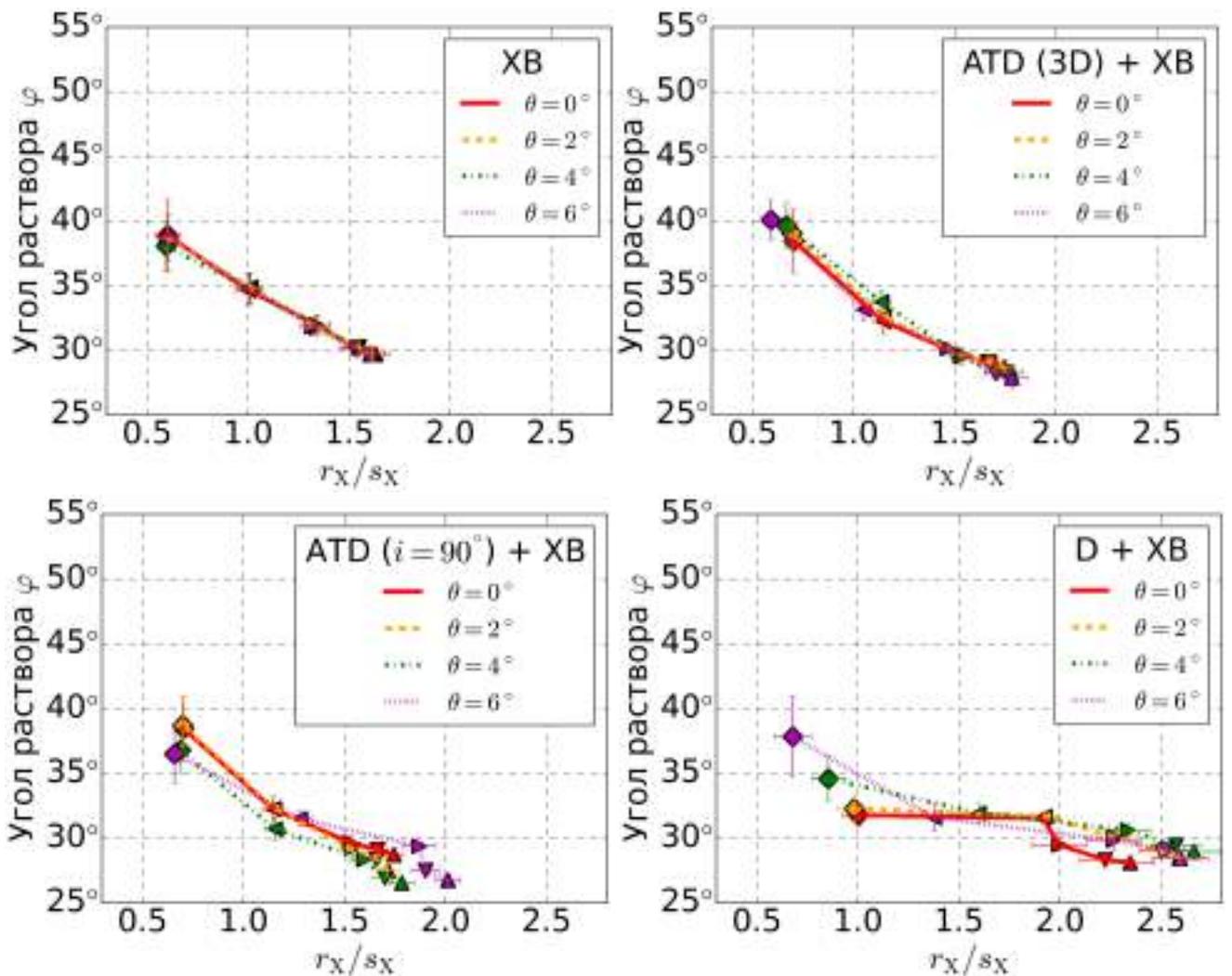


Рис. 4.7 — Влияние различных фотометрических моделей диска и азимутального угла бара (обозначения те же самые, что и на Рис. 4.6) на угол раствора и параметр контрастности  $r_X/s_X$  модели В/PS балджа с X-структурой для различных наклонов плоскости диска. Для обозначения фотометрических компонент в легенде используются следующие сокращения: “D” — обычный экспоненциальный диск, видимый с ребра, “ATD (3D)” — трёхмерный диск, обрезанный внутри со свободным наклоном, “ATD ( $i = 90^\circ$ )” — диск, обрезанный внутри с фиксированным наклоном  $i = 90^\circ$ , “XB” — введённая ранее модель балджа с X-структурой.

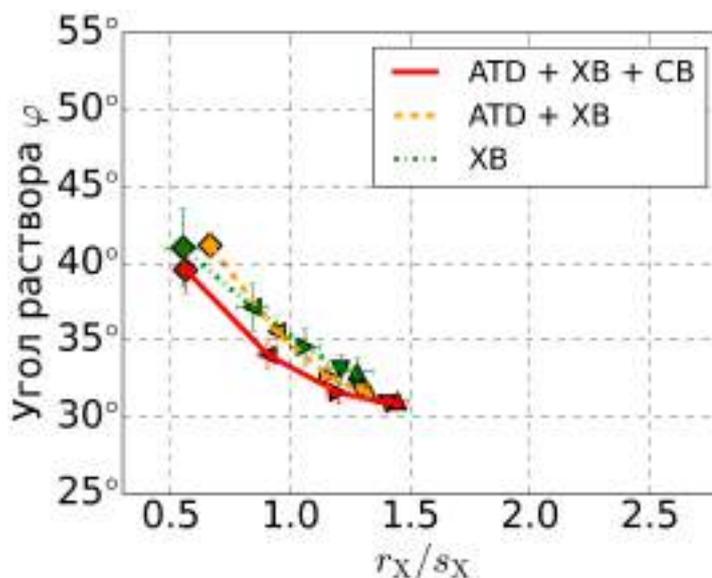


Рис. 4.8 — Зависимость угла раствора  $\varphi$  и параметра контрастности  $r_x/s_x$  модели В/PS балджа с Х-структурой от ориентации бара (обозначения те же самые, что и на Рис. 4.6) для трёх различных комбинаций динамических подсистем (см. текст) для модельной галактики с классическим и В/PS балджами. Для обозначения фотометрических компонент в легенде используются следующие сокращения: “АТД” — диск, обрезанный внутрь и видимый с ребра (см. основной текст), “ХВ” — введённая ранее модель балджа с Х-структурой, “СВ” — классический сёрсиковский балдж.

В/PS балджа, особенно в том случае, когда большая ось бара повернута близко к лучу зрения.

### Другие фотометрические компоненты. Случай сосуществующих балджей

Одной из возможных проблем фотометрической декомпозиции дисковых галактик является то, что различные типы балджей могут сосуществовать в одной галактике. Хорошо известный пример — галактика NGC 4565, где заметны два типа балджей, а именно В/PS балдж и так называемый псевдобалдж (см. [140]). Существование различных типов балджей в одних и тех же галактиках также изучалось в [141], где авторы провели детальный анализ нескольких галактик, где есть и дисковые, и классические балджи. Большинство реальных галактик рассмотренной ниже выборки также, по-видимому, содержат дополнительный центральный компонент, не являющийся частью В/PS балджа. Поэтому необходимо проверить, как определяемые параметры фотометрической модели В/PS балджа зависят от наличия балджа другой физической природы. Для этого будем использовать одну из модельных галактик с балджем, ранее рассмотрен-

ную в Главе 1, модель с  $M_b = 0.2$  из Таблицы 1. Для единообразия для этой модели также было выполнено разделение компонент по динамическим соображениям и был выделен V/PS балдж. Опять рассмотрим несколько случаев: случай V/PS балджа без диска и классического балджа, случай, когда декомпозируемое изображение включает в себя только диск и V/PS балдж, и последний случай, когда изображение включает в себя все компоненты, и диск, и V/PS балдж, и классический балдж. В последнем случае помимо компоненты диска и V/PS балджа также в общую фотометрическую модель включается ещё одна сёрсиковская компонента, описывающая классический балдж. Случай диска и V/PS балджа необходимо рассматривать, поскольку отклонения от идеальных значений (если таковые имеются) могут возникать из-за компоненты диска. Рис. 4.8 показывают, как геометрические параметры V/PS балджа изменяются во всех трёх случаях в зависимости от ориентации бара. Как видно из рисунка, значения углов раствора и параметров контрастности немного различаются в каждом из случаев. Наличие классического балджа ведет к уменьшению углов раствора. Сама большая разница примерно в  $3^\circ$  достигается, в том случае, когда бар повернут примерно на  $45^\circ$ , и это разница меньше для других ориентаций бара. В целом, Рис. 4.8 показывает, что даже в случае наличия в исследуемой галактике классического балджа параметры V/PS балджа, извлекаемые процедурой многокомпонентной декомпозиции, не сильно искажаются за счёт влияния других компонент.

### **Влияние физических параметров галактик на параметры V/PS балджей**

Как уже обсуждалось в Главе 1 и Главе 3 различие в физических параметрах моделей галактик приводит к различию в морфологии V/PS балджей. Один из полученных выводов Главы 1 состоял в том, что самые маленькие углы раствора X-структур должны наблюдаться в галактиках, где тёмная материя имеет значительный вклад в общее гравитационное поле в пределах оптического радиуса диска. В Главе 1 углы раствора измерялись на основе анализа распределений плотности вдоль фотометрических разрезов. Убедимся, что тот же вывод сохраняется, если использовать предложенную в данной Главе фотометрическую модель балджа. Это важно для дальнейшего сравнения модельных и наблюдательных данных. Также дополнительно рассмотрим модель с горячим диском со значе-

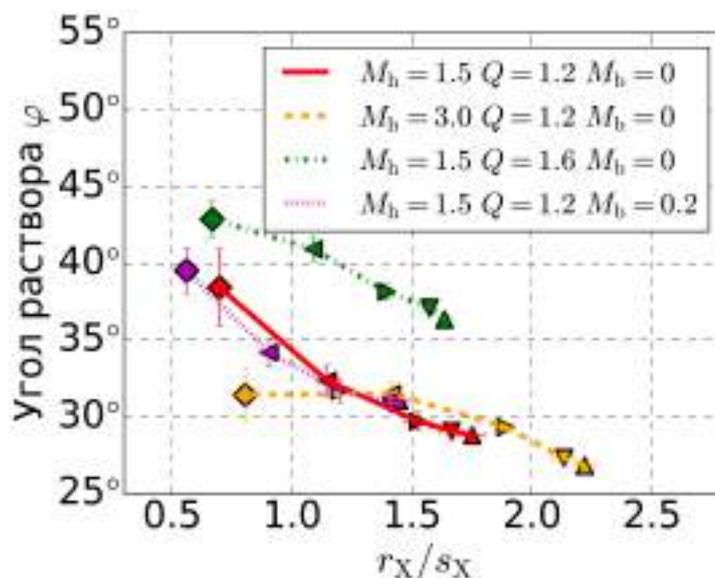


Рис. 4.9 — Зависимость угла раствора  $\varphi$  и параметра контрастности  $r_x/s_x$  модели В/PS балджа с X-структурой от ориентации бара для четырех различных моделей галактик (обозначения те же самые, что и на Рис. 4.6).

нием параметра Тумре  $Q = 1.6$ . Для этой модели в Главе 1 было получено, что угол раствора возникающей X-структуры оказывается больше, чем угол раствора в аналогичной модели, но с более холодным диском. Эту зависимость также интересно проверить для дальнейшего сравнения с наблюдательными данными.

Всего будет рассмотрено, таким образом, четыре модели: реперная модель с  $M_h = 1.5$  и без балджа, модель с большой массой гало  $M_h = 3$ , модель с горячим диском  $Q = 1.6$  и уже рассмотренная модель с классическим балджем (см. Таблицу 1 Главы 1). Для каждой из моделей рассматривается только один момент времени, а именно  $T \approx 6$  млрд. лет для всех моделей с  $M_h = 1.5$  и  $T \approx 7$  млрд. лет для модели с  $M_h = 3$ . Для модели с  $M_h = 3$  рассматривается более поздний момент времени, так как бар в этой модели образуется примерно 1 млрд. лет позже, чем в других моделях. Для каждой из моделей строились изображения для различных ориентаций бара вокруг оси диска и выполнялась процедура фотометрической декомпозиции. Все изображения подгонялись комбинацией “диск + В/PS балдж”. Результаты представлены на Рис. 4.9. Как видно из рисунка, модель с самым тяжелым темным гало ( $M_h = 3$ ) действительно отличается от всех остальных. Для случая бара, повернутого перпендикулярно к лучу зрения, она показывает наименьший угол раствора  $\varphi \approx 26^\circ$  среди всех рассмотренных моделей и ориентаций бара. В то же время В/PS балджи в этих моделях довольно сильно различаются с точки зрения значений параметра контрастности. В модели с тяжелым гало наблюдается более заметный провал между лучами (см. для

сравнения Рис. 4.4). Важно отметить, что переход от  $45^\circ$  до  $60^\circ$  в этой модели кажется довольно неестественным, поскольку значение угла раствора не увеличивается, хотя сам В/PS балдж существенно уменьшается в размерах, что видно по изменению параметра контрастности. Такое поведение, по-видимому, вызвано сложной структурой самого В/PS балджа. Как было показано в Главе 3 лучи X-структуры, как правило, связаны с существованием в баре какого-то конкретного орбитального семейства квазипериодических орбит. Можно предположить, что смесь одинаковых в плане количества орбитальных семейств может давать пики плотности не резкого характера, а в довольно широкой полосе. При этом общая картина также должна зависеть от поворота бара к лучу зрения, поскольку разные семейства, как правило, занимают разные пространственные области. Следовательно, если для бара, видимого в положении “сбоку”, наблюдается луч, создаваемый в основном только одним орбитальным семейством, существует вероятность того, что при повороте бара начнут выделяться и другие орбитальные семейства. Подробный орбитальный анализ модели должен прояснить эту проблему, однако здесь он не делался, поскольку это выходит за рамки настоящей работы.

Модель с  $Q = 1.6$  показывает довольно большие углы раствора для всех ориентаций бара по сравнению с реперной моделью, от около  $36^\circ$  до  $42^\circ$ . Качественно похожая картина наблюдалась в Главе 1, Рис. 1.17. Модель с классическим балджем близка к реперной модели в плане углов раствора, но демонстрирует значительно меньшие значения параметра резкости. В целом Рис. 4.9 демонстрирует, что параметры В/PS балджей, как и ожидалось, зависят как на физических условиях в диске, так и от других физических компонентов. Хотя этот результат уже был получен в Главе 1, здесь важно, что он подтверждается в рамках подхода с использованием предложенной в настоящей Главе 1 фотометрической модели. При этом картина зависимости углов раствора от физических параметров получается той же самой, что и в Главе 1. Также важно заметить, чтобы параметр контрастности во всех случаях оказывается весьма хорошим показателем того, насколько бар повернут к лучу зрения.

### Замечания к анализу моделей

В заключение этого пункта подчеркнём, что здесь не преследовалась цель рассмотреть как можно больше различных физических моделей или особенностей их эволюции. Это уже было сделано в Главе 1. Здесь была поставлена другая задача. Необходимо было проверить, что использование новой фотометрической модели балджа приводит к некоторым разумным результатам, а именно, что:

1. Для различных геометрических конфигураций, возникающих из-за возможного наклона диска и вращения бара вокруг оси диска, процедура фотометрической декомпозиции позволяет получить значения параметров В/PS балджа, не сильно зависящие от фотометрических моделей других компонент;
2. При этом последнее верно даже в том случае, когда галактика обладает сложной структурой в центре (два балджа);
3. Применение фотометрической модели балджа с X-структурой воспроизводит некоторые качественные результаты, полученные ранее в Главе 1.

По сути, то, что было сделано есть тестирование новой модели, необходимое для того, чтобы убедиться, что она работает правильным образом в различных ситуациях.

Также важно отметить, что в ходе проведённого анализа была получена нижняя граница диапазона углов раствора,  $\varphi \approx 26^\circ$ . Это значение было измерено у X-структуры в модели с  $M_h = 3$  для бара, повернутого к лучу зрения перпендикулярно. Можно ожидать, что В/PS балджи реальных галактик должны редко иметь углы раствора X-структур меньше этого значения. Это верно, так как, чтобы измерить такое небольшое значение, необходимо обнаружить бар на поздних этапах его эволюции, повернутый к лучу зрения перпендикулярно, в галактике с довольно тяжёлым тёмным гало. Это возможно, но все равно такое совпадение обстоятельств должен быть относительно редким случаем.

## 4.5 Декомпозиция реальных галактик

### 4.5.1 Наблюдательные данные

В данном пункте процедура фотометрической декомпозиции будет применена к выборке реальных галактик. Рассматриваемая выборка реальных галактик представляет собой объединение выборок из работ [47] и [49]. Конечная выборка содержит в общей сложности тридцать одну галактику, в каждой из которых наблюдается явно заметный B/PS балдж. В Таблице 7 представлены общие параметры галактик выборки, взятые из базы данных HyperLEDA [142] и NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) <sup>1</sup>. Далее опишем, как происходила предварительная подготовка данных для этих галактик.

Оптические изображения в полосе  $r$  были взяты из обзора Слоановского обзора неба<sup>2</sup> (Sloan Digital Sky Survey DR12, SDSS) [143]. Для каждой галактики выполнялись следующие этапы предварительной обработки:

1. Соседние поля из обзора SDSS объединялись в одно изображение с использованием пакета Swarp [144];
2. Фон определялся по областям изображений, свободным от источников, затем аппроксимировался двумерным полиномом и вычитался из исходного изображения;
3. Позиционный угол галактики оценивался с использованием метода из работы [145]. Изображение галактики затем поворачивалось таким образом, чтобы главная ось галактики была выстроена вдоль оси  $x$  всего изображения;
4. Затем по набору изолированных ненасыщенных звёзд на изображении определялась функция рассеяния точки;
5. Все объекты на изображении за исключением галактики маскировались с использованием каталога объектов, получаемого с помощью пакета SExtractor [146].
6. Сигма карты генерировались автоматически с использованием пакета Imfit на основе значений коэффициента усиления (англ. “gain”), шума счи-

<sup>1</sup><http://ipac.caltech.edu/>

<sup>2</sup><https://www.sdss.org/dr12/>

ывания (англ. “read noise”) и интенсивности вычитаемого фона неба. Значения всех этих параметров для соответствующих полей брались из базы данных SDSS. Точное выражение для стандартного отклонения  $i$ -го пикселя следующее:

$$\sigma_i^2 = (I_{d,i} + I_{\text{sky}})/g_{\text{eff}} + N_c \sigma_{\text{rdn}}^2 / g_{\text{eff}}, \quad (4.11)$$

где  $I_{d,i}$  — это интенсивность исходного изображения в данном пикселе,  $I_{\text{sky}}$  — интенсивность вычитенного фона неба,  $\sigma_{\text{rdn}}$  — шум считывания,  $N_c$  — количество объединённых кадров при построении изображения и  $g_{\text{eff}}$  — это эффективный коэффициент усиления (произведение коэффициента усиления и  $N_c$ ).

Отметим, что точно такая же процедура обработки применялся в работе [49] ранее при исследовании галактик с X-структурами.

Изображения галактик, полученные на длине волны 3.6 мкм IRAC (Infrared Array Camera), были взяты из базы данных Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies<sup>3</sup> (S4G, [147]). Эти изображения также были исправлены за фон неба и развернуты так, чтобы главная ось галактики была выстроена вдоль оси  $x$ . Маски и сигма-карты, подготовленные для Spitzer’овских галактик в работе [148], также были взяты из базы данных Spitzer. В качестве функция рассеяния точки использовалась функция, приведенная на сайте миссии<sup>4</sup>. Для всех SDSS и IRAC изображений веса отдельных пикселей  $w_i$  рассчитывались как обратные квадраты соответствующих стандартных отклонений,  $w_i = 1/\sigma_i^2$ .

#### 4.5.2 Результаты фотометрической декомпозиции реальных галактик

Хотя естественно предполагать, что В/PS балджи модельных галактик должны напоминать соответствующие В/PS балджи реальных галактик, физика реальных галактик все же существенно богаче, чем заложенная в моделях, рассмотренных выше. В частности, влияние газовой компоненты, звездообразования и взрывов сверхновых в рассмотренных моделях не учитывалось. Хотя эти факторы напрямую не связаны со свойствами В/PS балджей, они все же определяют

<sup>3</sup><http://irsa.ipac.caltech.edu/data/spaczer/s4g/>

<sup>4</sup><https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irac/calibrationfiles/psfprf/>

Идентификатор	T	$M_r$ mag	$d_{25}$ arcmin
PGC002865	5.8	-20.01	1.78
PGC010019	3.0	-20.96	0.78
PGC021357	3.3	-20.65	1.14
PGC024926	2.0	-19.36	1.70
PGC026482	3.1	-20.66	1.17
PGC028788	0.5	-20.35	0.85
PGC028900	0.9	-21.55	1.00
PGC030221	3.0	-20.44	1.12
PGC032668	0.0	-20.59	1.04
PGC034913	3.0	-20.89	1.91
PGC037949	1.4	-20.82	1.32
PGC039251	-0.9	-20.73	1.69
PGC044422	0.4	-21.13	0.72*
PGC045214	1.0	-21.41	0.89
PGC053812	3.9	-21.51	1.10
PGC055959	2.0	-21.38	1.02
PGC069401	1.0	-21.97	1.10
PGC069739	5.2	-20.92	2.00
ASK361026.0	4.6	-21.77	0.44*
ESO443-042	3.0	-20.90	2.81
NGC128	-2.0	-22.30	3.16
NGC678	3.0	-20.98	3.09
NGC2549	-2.0	-20.07	3.63
NGC2654	2.0	-19.69	4.47
NGC2683	3.0	-19.82	9.55
NGC3628	3.1	-19.49	10.96
NGC4111	-1.3	-19.68	1.78
NGC4469	0.3	-19.07	2.88
NGC4710	-0.9	-20.53	4.37
NGC5529	5.1	-20.71	5.75
NGC7332	-1.9	-19.33	2.95

Таблица 7 — Параметры галактик выборки: идентификатор, тип, абсолютная величина в полосе  $r$  и видимый диаметр.

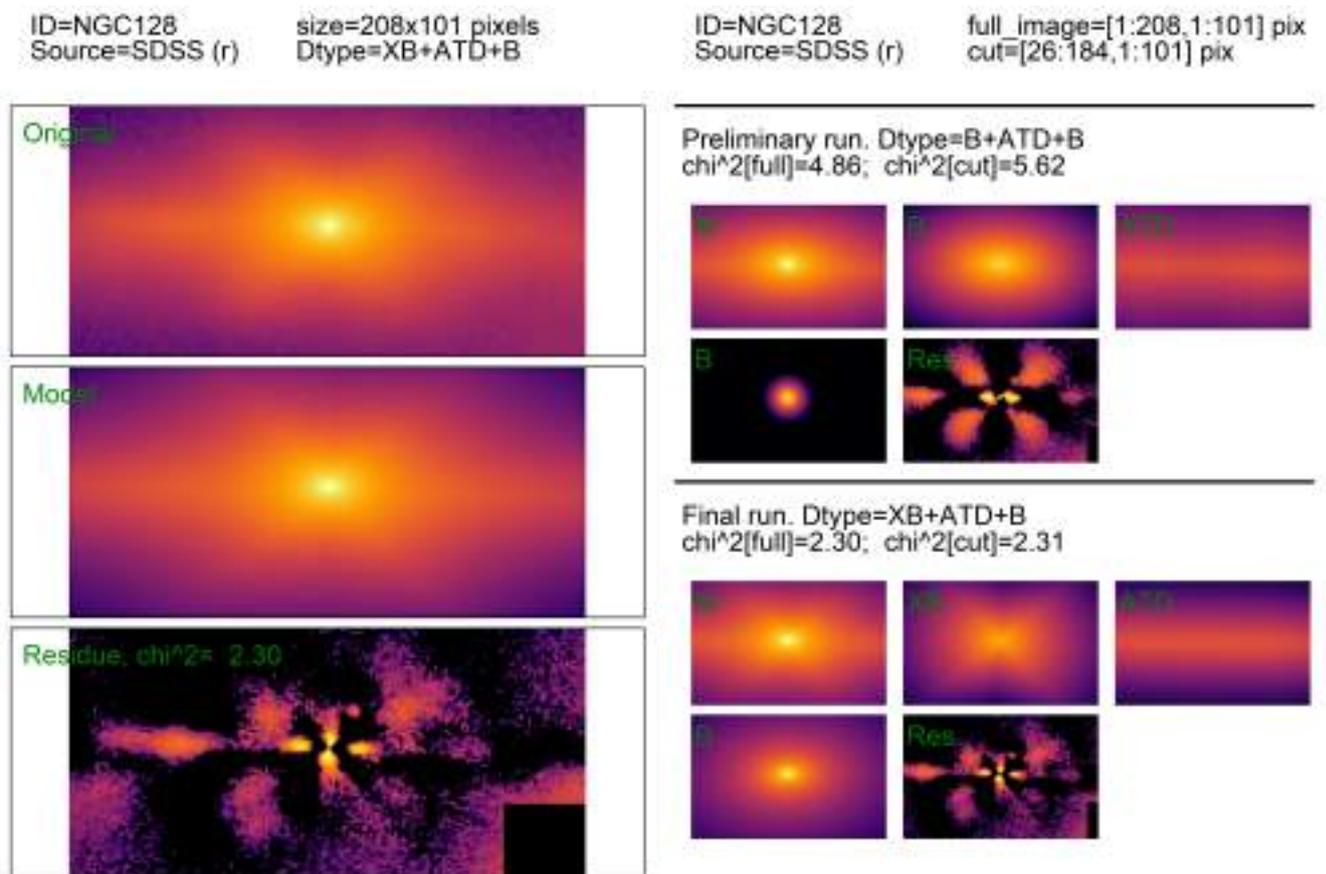


Рис. 4.10 — Фотометрическая декомпозиция галактики NGC 128. *слева*: Исходное изображение галактики (*сверху*), оптимальная фотометрическая модель (*посередине*) и изображение остатка (*снизу*). *Справа*: Изображения отдельных фотометрических компонент и остатка для предварительного прогона с обычным сёрсиковским балджем (*сверху*) и для финального прогона с моделью балджа с X-структурой (4.5) (*снизу*).

свойства бара (скорость узора и размеры) и тем самым косвенно влияют и на В/PS балджи. Поэтому, если какая-то фотометрическая модель хорошо описывает структуру в случае модельных галактик, она не обязательно хорошо представляет соответствующую структуру в реальных галактиках. Чтобы прояснить этот вопрос для введенной в данной Главе фотометрической модели балджа, рассмотрим несколько важных примеров, показывающих, как эта модель работает в случае реальных галактик.

## Галактика NGC 128

Начнём с одной из самых выдающихся галактик с В/PS балджами и Х-структурами, – NGC 128. Исторически именно в ней впервые было указано на существование Х-структур у галактик в принципе [2]. Вместе с NGC 126 (E/SB0), NGC 127 (SA) и NGC 130 (E5) и, возможно, NGC 125 (S0 pec) [149; 150] эта галактика формирует группу галактик [151]. Внешняя область диска NGC 128 сильно искажена гравитационным взаимодействием с NGC 127: от первой ко второй тянется “мост” из газа и звёзд [2]. Анализ кинематики газа показывает, что центральная область ( $\sim 5''$ , примерно четверть размера В/PS балджа) содержит противовращающийся газовый диск [150]. Почти на том же пространственном масштабе (примерно одна пятая часть размера В/PS балджа) авторы работы [47] отождествили так называемый “внутренний” В/PS балдж, существующий внутри обычного большего В/PS балджа. Отметим, что эта галактика представляется собой непростой случай для фотометрической декомпозиции. В основном из-за сложной структуры в центральной области.

Декомпозиция выполнялась таким же образом, как это делалось для модельных галактик ранее. Было два этапа: предварительный этап, на котором находились начальные условия для модели балджа с Х-структурой с использованием обычной функции Сёрсика, и заключительный этап, на котором находилась окончательная оптимальная модель балджа с Х-структурой.

Предварительные прогоны показали, что с внутренним компонентом есть проблема. А именно, если он никак не представлен в модели, то функция, описывающая внешний большой балдж, стремится выродиться и описать внутренний компонент. Чтобы этого избежать в исходную фотометрическую модель закладывались диск и два балджа, один из которых имеет фиксированный индекс Сёрсика  $n = 1$ , а второй имеет свободные параметры, за исключением позиционного угла, который фиксируется, чтобы предотвратить, в свою очередь, вырождение внутреннего компонента в часть В/PS балджа. Позиционный угол затем освобождался в финальном прогоне. Результаты проделанной декомпозиции (оптимальная модель и изображения остатков) а также отдельные изображения всех компонент для предварительного и финального прогонов показаны на Рис. 4.10. Отметим, что внешняя часть диска была замаскирована из-за возмущения, вызванного гравитационным взаимодействием с NGC 127. Оставшаяся часть изображения,

использовавшаяся при подгонке, содержит весь В/PS балдж и ансе. Ансе важно оставить, так как они обычно лежат на концах бара и, следовательно, помогают определить границу, где должен заканчиваться диск во внутренней области (границу дырки).

Значения  $\chi^2$  (см. дополнительный текст над изображениями отдельных компонент) указывают на то, что применение модели балджа с X-структурой вместо обычного серсиковского балджа для данной галактики приводит к значительному улучшению остатка. При этом хорошо видно, что четыре луча, видимые на изображениях остатков в предварительном прогоне, становятся существенно менее интенсивными в финальной модели с балджем с X-структурой. Основным же источником ошибок становится центральный компонент. Также отметим, что получившийся внутренний балдж имеет линейные размеры близкие к линейным размерам В/PS балджа,  $r_x/r_b \approx 1.2$ . В то же время их индексы Сёрсика существенно различаются,  $n_x = 1$  против  $n = 2.6$ .

Поскольку в рассмотренном выше случае, по-видимому, присутствует вырождение (параметры компонент близки друг к другу) для NGC 128 был рассмотрен альтернативный вариант декомпозиции с фиксированной нулевой эллиптичностью внутреннего компонента. В этом случае внутренний компонент имеет строго круговые изофоты. С физической точки зрения такое предположение более согласуется с идеей, что внутренний компонент — это не вложенный внутрь большого балджа В/PS балдж, а, скорее, небольшой классический балдж или псевдобалдж, образующийся из-за спадания газа в центральные области галактики. Для такого варианта декомпозиции с фиксированной эллиптичностью оказалось, что В/PS балдж и внутренний балдж имеют совершенно различные размеры,  $r_x/r_b \approx 6$ , то есть вырождение действительно снимается. Однако соответствующее значение  $\chi^2$  увеличивается с 2.3 до 3.0, то есть модель в целом становится хуже. Хотя при этом такая модель все равно лучше, чем модель, полученная в предварительном прогоне с  $\chi^2 = 5.62$ .

Следует подчеркнуть, что в обоих вариантах декомпозиции (с фиксированной и свободной эллиптичностью) полученные значения углов раствора и линейных размеров В/PS балджей оказываются близки друг к другу:  $\varphi = 44^\circ$  в обоих случаях и  $r_x \approx 3.0$  кпк в случае свободной эллиптичности и  $r_x \approx 2.7$  кпк для варианта с фиксированной эллиптичностью. При этом характерные масштабы спадания плотности выше луча X-структуры существенно различаются:  $s_x \approx 2.7$  кпк против  $s_x \approx 4$  кпк, соответственно. Поэтому параметры контрастности так-

же имеют совершенно различные значения в этих двух случаях,  $r_x/s_x \approx 1.11$  против  $r_x/s_x \approx 0.67$ . Другими словами, степень выраженности наблюдаемой X-структуры в двух полученных моделях сильно различается. Такая ситуация напоминает ситуацию с различными моделями дисков, рассмотренную ранее в пункте 4.4. При применении различных моделей дисков также менялись параметры контрастности, при этом углы раствора оказывались близки друг к другу.

Сделаем несколько важных замечаний относительно структуры внутреннего компонента. Как правило, если из В/PS балджа вычесть обычную сёрсиковскую модель, то в остатках остаются четыре ярко выраженных луча (см. Рис. 4.10, случай предварительного прогона). Если предположить, что внутренний компонент представляет собой внутренний В/PS балдж, тогда разумно также предположить, что в остатках этого балджа должно быть четыре ярких луча. На изображении остатка действительно наблюдаются четыре ярких пятна в центральной области (Рис. 4.10, финальный прогон). Но при этом два из них лежат в плоскости диска, а ещё два расположены на линии, перпендикулярной плоскости диска. То есть, ориентация лучей (если это лучи) в остатке внутренней структуры совсем не такая, как в остатках обычного В/PS балджа. Хотя остаток центральной компоненты получается вычитанием моделей внешнего В/PS балджа и дисковой компоненты, по-видимому, структура этого остатка косвенно указывает на то, что внутренний компонент не является обычным В/PS балджем. В принципе, такая структура остатка может возникать в случае наличия маленького внутреннего (второго) бара, если его большая ось ориентирована близко к лучу зрения, и плоскость диска немного наклонена. Основываясь только на структуре остатков, также нельзя исключить возможность того, что в центральной области NGC 128 существует просто небольшой сплюснутый балдж (либо классический, либо псевдобалдж, сформировавшийся за счёт притока газа и последующего звездообразования)

### ESO 443-042

ESO 443-042 — необычная галактика, где авторы работы [47] определили у В/PS балджа очень небольшое отношение вертикального размера к размеру в плоскости,  $z_{\pi, \max}/r_{\pi, \max} \approx 0.26$  (в обозначениях [47]). Если перевести это значение в угловую меру, то получится весьма маленькое значение угла раствора

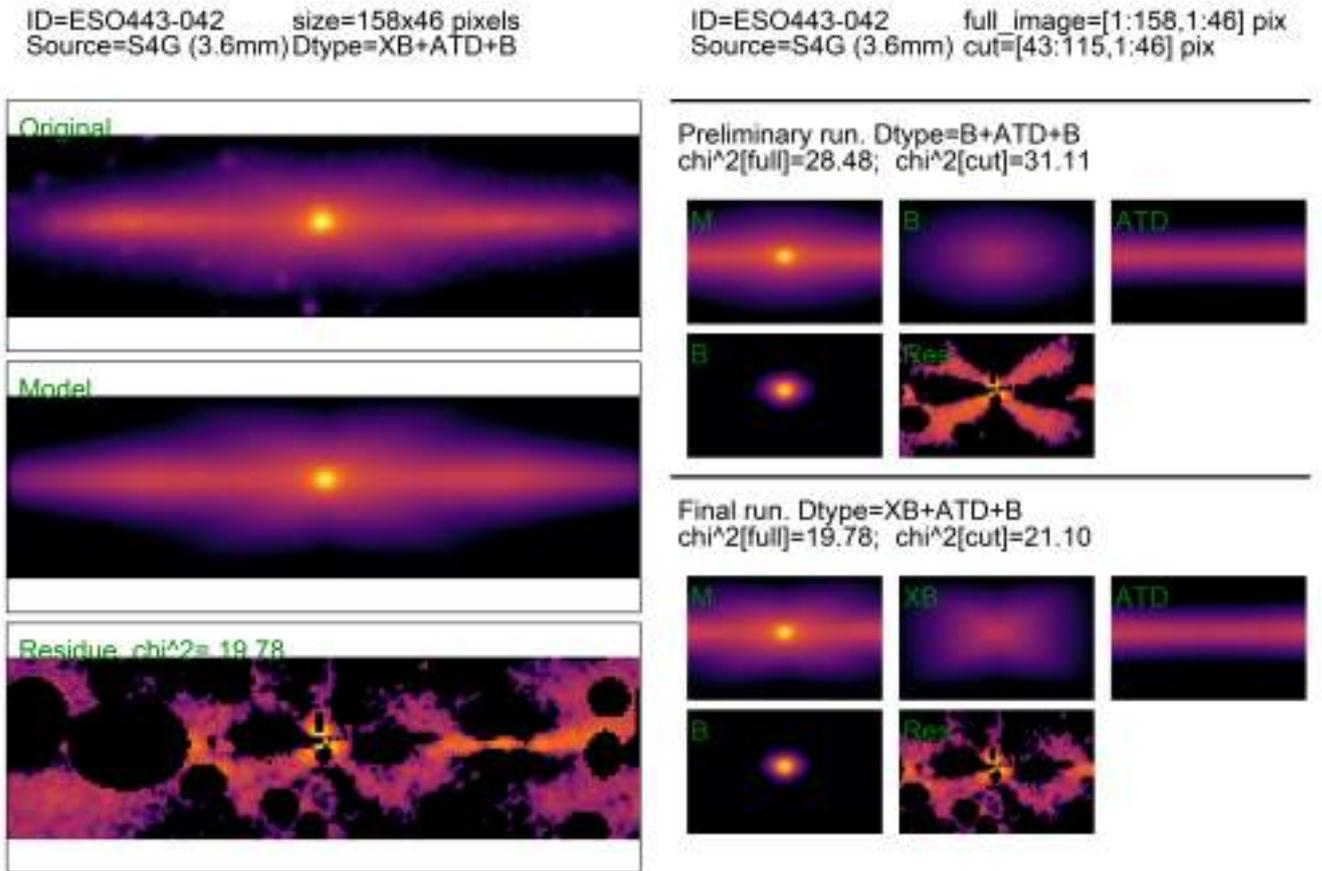


Рис. 4.11 — Фотометрическая декомпозиция галактики ESO 443-042 (см. подпись к Рис. 4.10).

$\psi = \arctan(z_{\pi, \max}/r_{\pi, \max}) \approx 14^\circ$ . Для той же галактики авторы работы [48] нашли размеры B/PS балджа весьма типичными:  $a_x/b_x \approx 0.8$ , что соответствует значению угла раствора  $\varphi \approx 39^\circ$ . Отметим, что в работе [47] использовалось изображение галактики, полученное на длине волны 4.5 мкм, тогда как в работе [48] использовались данные для 3.6 мкм. В настоящей работе также используется изображение, полученное на длине волны 3.6 мкм.

Результаты декомпозиции для ESO 443-042 показаны на Рис. 4.11. Заметим, что в левой части изображения в диске наблюдается яркая особенность. При этом в правой части изображения аналогичная, по-видимому, особенность существенно менее яркая. В предварительном прогоне было найдено, что эта особенность в левой части диска существенно влияет на определяемые параметры диска, и поэтому она была замаскирована. На изображении остатка этой замаскированной области соответствует тёмный кружок в левой части диска. Касательно фотометрических компонент отметим следующее. Также как и в случае NGC 128, в данном случае также приходится включать в фотометрическую модель два типа балджей. Однако по сравнению со случаем NGC 128 здесь эти два балджа существенно раз-

личаются по линейным размерам ( $r_x/r_b \approx 23$ ). Поэтому в данном случае проблем с возможной вырожденностью компонентов нет.

Относительно V/PS балджа в этой модели отметим следующее. В остатках после предварительного прогона наблюдается четыре довольно ярких луча. Применение более точной модели V/PS балджа ведет к тому, что эти лучи становятся существенно менее интенсивными. Значение  $\chi^2$  также существенно уменьшается (примерно в полтора раза). Однако оно по-прежнему остаётся довольно большим,  $\chi^2 \approx 21$ . Означает ли это, что рассматриваемая фотометрическая модель плохо описывает данную галактику? Строго говоря, да, это так. Однако здесь необходимо отметить, что для многих галактик из каталога S4G, такое большое значение  $\chi^2$  при двумерной декомпозиции встречается весьма часто и не является чем-то необычным (см. [148]). В принципе, добавление дополнительных фотометрических компонент могло бы как-то изменить ситуацию в лучшую сторону, однако, в данном конкретно случае это, по-видимому, излишне. Изображение остатка показывает, что расхождение между моделью и данными возникает за счёт двух вещей. А именно, за счёт не совсем точной модели центральной компоненты и особенности в диске в правой его части (тоже частично замаскированной). Как уже упоминалось, линейный размер центральной компоненты весьма мал по сравнению с размерами V/PS балджа и, следовательно, он не должен сильно влиять на измеряемые геометрические параметры V/PS балджа. Яркая особенность в диске явно лежит за пределами V/PS балджа, и по этой причине также не должна существенным образом влиять на модель V/PS балджа. Хотя, всё же отметим, что эта особенность может влиять на модель диска и тем самым косвенно также влиять и на V/PS балдж. В то же время, внутреннее обрезание диска должно ослаблять подобную связь.

Получающиеся геометрические параметры V/PS балджа для этой галактики оказываются довольно типичны. Угол раствора  $\varphi$  имеет значение около  $30^\circ$ , а значение параметра контрастности составляет примерно 1.3. Полученное здесь значение угла раствора не соответствует значениям, полученным как в работе [97], так и в [47]. При этом выделить явную причину, из-за которой V/PS балдж в [47] оказался сильно сплюснутым определить сложно. Возможно, что сильные неоднородности в диске, которые в настоящей работе были замаскированы, могли как-то повлиять на результат измерений в работе [47]. Что касается работы [48], то продемонстрированное авторами изображение галактики, полученное процедурой нерезкого маскирования (по которому собственно и выполнялись измерения в

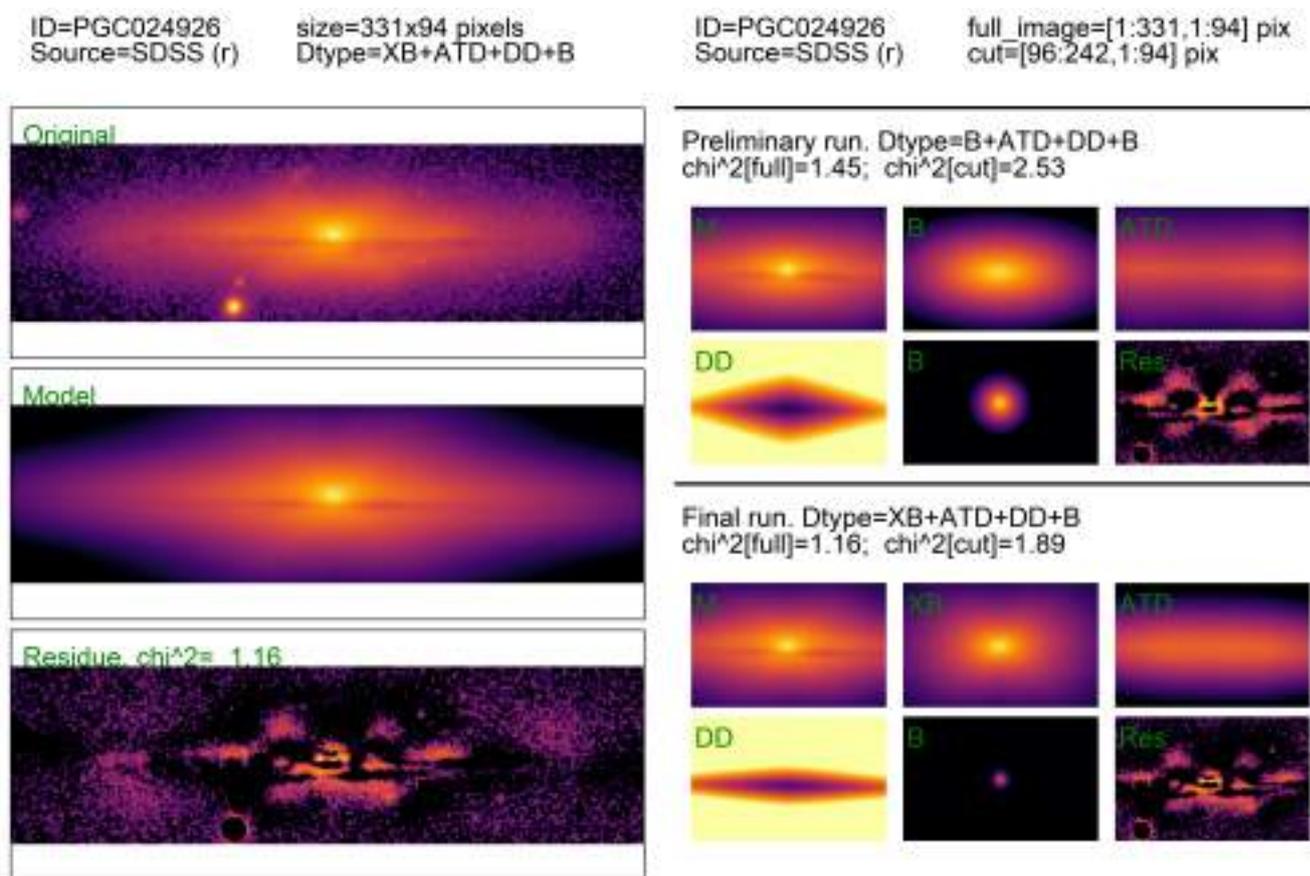


Рис. 4.12 — Фотометрическая декомпозиция галактики PGC 24926 (см. описание к Рис. 4.10)

цитируемой работе) показывает не четыре отдельных луча, как на Рис. 4.11, а два характерных “крыла” бабочки. Возможно, такое различие в исследуемых изображениях, ведёт к наблюдаемой разнице в углах раствора. Причины описанных различий ещё будут обсуждаться более подробно в пункте 4.6 ниже .

## PGC 24926

Следующий весьма иллюстративный пример — галактика PGC 24926. Изображение этой галактики пересечено почти прямой пылевой полосой, смещенной относительно плоскости диска. На примере этой галактики рассмотрим, как работает модель балджа с X-структурой в случае наличия в галактике пылевой полосы. Рис. 4.12 показывает результаты декомпозиции. На изображениях остатков видно, что лучи, заметные в предварительном прогоне, становится менее выраженным в финальном прогоне. Хотя улучшение здесь не такое существенное,

как в случае ранее рассмотренных галактик. Отметим, что второй балдж становится меньше по размерам после модификации фотометрической модели В/PS балджа, а пылевая полоса при этом становится тоньше. Полученный В/PS балдж имеет довольно большой угол раствора X-структур  $\varphi \approx 42^\circ$  с весьма маленьким значением параметра контрастности  $r_x/s_x \approx 0.33$ . Отметим также, что центр пылевого диска оказался слегка смещенным относительно центра звездного диска. Такой эффект вероятно связан с небольшим наклоном плоскости звездного диска к лучу зрения.

### Результаты для всей выборки галактик

В Таблице 8 показаны значения для геометрических параметров X-структур для всех галактик из рассмотренной выборки. Изображения с результатами декомпозиции для всех галактик можно найти по ссылке <https://vo.astro.spbu.ru/node/130>.

Отметим несколько важных деталей относительно всей выборки галактик. Прежде всего, почти для каждой галактики из рассмотренной выборки удалось найти фотометрическую модель с В/PS балдж компонентой, включающей X-структуру (с некоторыми исключениями, упомянутыми ниже). При этом для различных галактик уточнение модели В/PS балджа ведет к разной степени улучшения остатков (см. NGC 7332 в качестве относительно “плохого” примера). Есть также несколько галактик, в которых пришлось вводить дополнительные компоненты такие, как кольцо или небольшой центральный балдж, только после предварительного прогона. В этих случаях кольцо (или другая компонента), как правило, стремится стать частью В/PS балджа, если его включать в предварительный прогон. В таких случаях трудно сказать, улучшается ли значение  $\chi^2$  в основном из-за изменений в модели балджа или из-за добавления дополнительной компоненты (см. PGC 10019 в приложении). Касательно компоненты диска отметим, что во всех случаях использовался диск с дыркой в центре (см. раздел 4.3). Однако для некоторых галактик параметры дырки вырождаются, и диск в центральной области имеет плато, а не провал интенсивности. Аналогичное поведение наблюдалось для численных моделей в случае бара, большая ось которого

Таблица 8 — Геометрические параметры X-структур для всей выборки галактик.

Галактика	$r_X$ (кpc)	$\varphi$ (deg)	$r_X/s_X$	$\varepsilon_X$
PGC002865	$1.38\pm 0.05$	$33.86\pm 0.44$	$1.75\pm 0.08$	-1.00
PGC010019	$2.55\pm 0.04$	$29.96\pm 0.50$	$1.51\pm 0.07$	$-0.71\pm 0.04$
PGC024926	$1.15\pm 0.01$	$41.75\pm 0.38$	$0.33\pm 0.01$	$0.40\pm 0.00$
PGC026482	$1.31\pm 0.03$	$28.45\pm 0.59$	$1.15\pm 0.08$	$-0.67\pm 0.06$
PGC028788	$1.64\pm 0.04$	$39.47\pm 0.82$	$0.85\pm 0.09$	$0.41\pm 0.03$
PGC028900	$2.47\pm 0.06$	$31.76\pm 0.37$	$1.82\pm 0.06$	-1.00
PGC030221	$1.80\pm 0.08$	$30.85\pm 1.19$	$1.31\pm 0.38$	$-0.48\pm 0.44$
PGC032668	$1.52\pm 0.05$	$29.01\pm 0.32$	$1.45\pm 0.13$	$-0.61\pm 0.11$
PGC034913	$1.71\pm 0.02$	$38.14\pm 1.04$	$0.46\pm 0.03$	$0.06\pm 0.04$
PGC037949	$4.53\pm 0.06$	$31.34\pm 0.58$	$0.62\pm 0.03$	$0.37\pm 0.02$
PGC039251	$1.97\pm 0.04$	$35.02\pm 0.26$	$1.47\pm 0.06$	$-0.86\pm 0.02$
PGC044422	$1.85\pm 0.03$	$31.67\pm 0.32$	$1.62\pm 0.04$	$-0.98\pm 0.03$
PGC045214	$2.40\pm 0.03$	$32.18\pm 0.29$	$1.65\pm 0.05$	$-0.89\pm 0.04$
PGC053812	$2.96\pm 0.12$	$32.33\pm 0.40$	$1.30\pm 0.23$	$-0.35\pm 0.27$
PGC055959	$1.57\pm 0.09$	$33.85\pm 0.53$	$1.39\pm 0.11$	$-0.95\pm 0.04$
PGC069401	$2.84\pm 0.03$	$42.11\pm 0.73$	$0.79\pm 0.02$	$0.29\pm 0.02$
PGC069739	$2.14\pm 0.05$	$39.96\pm 1.85$	$0.46\pm 0.04$	$0.25\pm 0.03$
ASK361026.0	$2.24\pm 0.02$	$28.27\pm 0.22$	$1.71\pm 0.03$	-1.00
ESO443-042	$3.77\pm 0.21$	$30.92\pm 1.48$	$1.28\pm 0.15$	$-0.03\pm 0.18$
NGC128	$2.94\pm 0.03$	$43.59\pm 0.36$	$1.11\pm 0.02$	$0.20\pm 0.01$
NGC128*	$2.65\pm 0.02$	$44.24\pm 0.31$	$0.67\pm 0.01$	$0.30\pm 0.00$
NGC2654	$1.52\pm 0.01$	$34.98\pm 0.51$	$0.58\pm 0.02$	$0.35\pm 0.01$
NGC2683	$1.18\pm 0.01$	$31.89\pm 0.17$	$0.90\pm 0.03$	$-0.40\pm 0.03$
NGC4710	$1.23\pm 0.02$	$28.73\pm 0.42$	$1.12\pm 0.04$	$-0.15\pm 0.05$
NGC5529	$2.68\pm 0.08$	$35.59\pm 0.91$	$1.97\pm 0.15$	$-0.30\pm 0.14$
NGC7332	$0.70\pm 0.01$	$38.77\pm 0.66$	$0.43\pm 0.03$	$0.50\pm 0.01$

ориентирована близко к лучу зрения. Поэтому не удивительно, что для некоторых реальных галактик также наблюдается подобная ситуация.

Несколько галактик из исходной выборки также были исключены после предварительного анализа. Это галактики PGC 21357, NGC 678, NGC 2549, NGC 3628, NGC 4111 и NGC 4469. PGC 21357 — галактика с очень сильной пылевой полосой. Полученная фотометрическая модель для В/PS балджа имеет неестественно маленькое значение параметра контрастности ( $r_x/s_x \approx 0.3$ ), определяемое с ошибкой, сравнимой с самим значением параметра. Естественно предположить, что такая неопределенность в параметре контрастности связана с сильной пылевой компонентой, закрывающей центральную часть В/PS балджа. В случае NGC 3628 В/PS балдж с Х-структурой хорошо выделяется, но пыль в этой галактике имеет очень неоднородную структуру, которая мешает надежной оценке параметров диска. В NGC 4469 ситуация та же самая, в ней сильно неоднородная пылевая полоса. В галактиках NGC 678, NGC 2549 и NGC 4111 в остатках, полученных в предварительных прогонах, практически незаметно лучей Х-структуры. Уточненная модель балджа в этих случаях вырождается в часть диска или становится обычным балджем (параметр контрастности вырождается в ноль,  $r_x/s_x \approx 0$ ). Возможно, в этих галактиках большая ось бара выстроена практически вдоль луча зрения, что может объяснять, почему в них наблюдается характерная ящикообразная форма изофот без заметной Х-структуры.

#### 4.6 Сравнение с предыдущими работами

Рис. 4.13 показывает, как значения углов раствора, найденные в настоящей работе, соотносятся со значениями углов раствора, найденными в работах [47—49] для одних и тех же галактик. Общая картина оказывается весьма интересной. В идеальном случае, если получаемые значения не зависят от используемого метода, то значения должны быть одинаковыми. Однако, как видно из рисунка, для большинства рассматриваемых галактик это не так. Скорее, практически все галактики не лежат на линии равных значений углов раствора. Отметим некоторые характерные особенности. Углы раствора, полученные в работе [48], в среднем больше, чем измеренные в настоящей работе. При этом в случае [47]

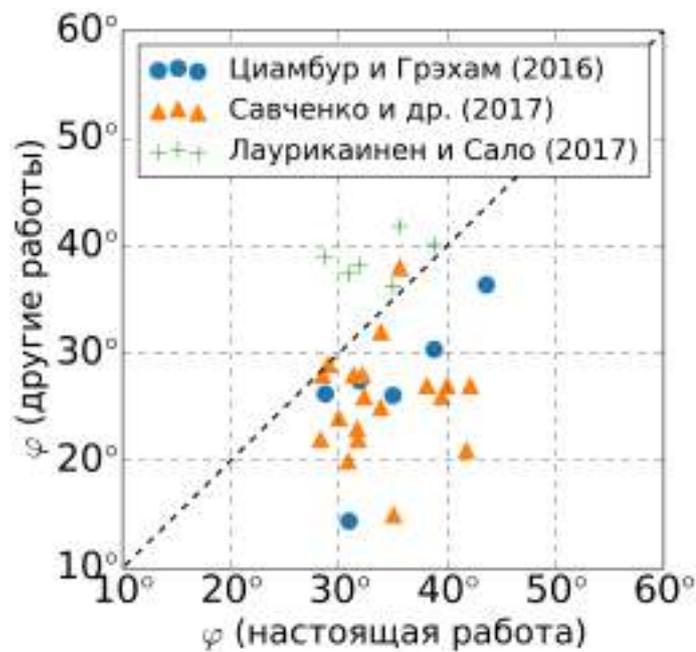


Рис. 4.13 — Сравнение значений углов раствора, полученных в предыдущих работах и в настоящей работе для одних и тех же галактик. Для каждой из работ, с результатами которых сравниваются полученные в настоящей работе результаты, выборка галактик, рассматриваемая в настоящей работе, пересекается с выборкой галактик в соответствующих работах. Отображаемые точки, таким образом, соответствуют галактикам из трёх различных подвыборок рассматриваемой выборки из 31 галактики в настоящей работе, причем эти подвыборки также частично пересекаются друг с другом.

и [49] ситуация прямо противоположная: измеренные этими авторами углы раствора меньше, чем полученные в настоящей работе.

Хотя ситуация, когда разные методы дают разные результаты для одних и тех же галактик не такая уж и необычная, все же попробуем разобраться в том, почему использованные другими авторами методы дают отличающиеся результаты, причём отличающиеся именно таким образом, как отражено на Рис. 4.13. Чтобы ответить на этот вопрос, более подробно рассмотрим, как работают различные методы измерения параметров В/PS балджей на примере уже обсуждавшейся галактики ESO 443-042.

Для сравнения с методом работы [47] выполним анализ изофота, аналогичный тому, что использовался в [47]. Будем исследовать параметры изофот в исходном изображении галактики, в полученной в настоящей работе оптимальной фотометрической модели и изофоты только в выделенной компоненте В/PS балджа. На Рис. 4.14 показаны распределения основных параметров изофот, использовавшиеся авторами [47] для характеристики В/PS балджей — амплитуда шестой Фурье-гармоники  $B_6$  и эллиптичность изофот  $\varepsilon$ . По значениям этих пара-

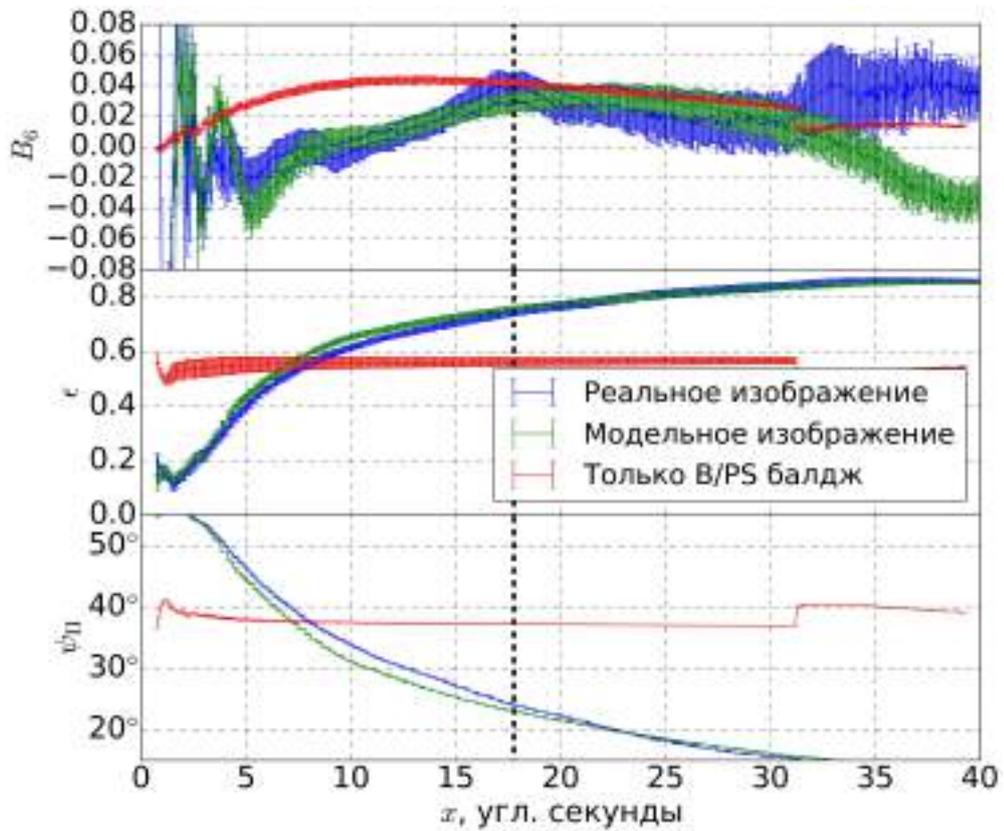


Рис. 4.14 — Сравнение параметров изофот исходного изображения, общей фотометрической модели галактики, полученной в этой работе, и параметров изофот только компоненты балджа для галактики ESO 443-042. *Сверху*: безразмерный профиль амплитуды гармоники  $B_6$ ; *В середине*: эллиптичность изофот  $\epsilon$ ; *Снизу*: Полярный угол, характеризующий лучи X-структуры, рассчитанный по методике из работы [47]. Толстая пунктированная линия отмечает положение максимума  $B_6$  в исходном изображении.

метров угол раствора X-структур можно рассчитать следующим образом:

$$\psi_{II} = -\arctan [(\epsilon_{\max} - 1) \operatorname{tg}(2\pi/6)], \quad (4.12)$$

где  $\epsilon_{\max}$  — это эллиптичность изофоты с максимальным значением амплитуды  $B_6$ . Отметим, что выражение для  $\psi_{II}$ , которое здесь используется, отличается от того, что используется в [47]. Дело в том, что, по-видимому, в выражении авторов [47] для  $\psi_{II}$  есть опечатка, так как угол  $\psi_{II}$  указанный на их рисунке 1, есть не эксцентрическая аномалия, а полярный угол. Эксцентричная аномалия для V/PS балджа в рассматриваемом случае должна быть  $2\pi/6$ , в то время как полярный угол действительно должен зависеть от эллиптичности изофот.

Как видно из Рис. 4.14, для исходного изображения и для общей фотометрической модели как профиль  $B_6$ , так и профиль эллиптичности идут весьма близко друг к другу. Однако параметры изофот для отдельно выделенного V/PS балджа без диска сильно отличаются от соответствующих параметров и исходного

изображения, и фотометрической модели. Для выделенного В/PS балджа эллиптичность изофот в широком диапазоне расстояний примерно постоянна. При этом она значительно больше во внутренней области и намного меньше во внешней области, чем у исходного изображения и фотометрической модели. А максимальное значение  $B_6$  достигается при  $\varepsilon \approx 0.56$ . Если же рассматривать исходное изображение или модель, то максимум достигается при  $\varepsilon \approx 0.77$ . Соответственно, получающиеся значения углов раствора в обоих рассмотренных случаях существенно различаются. В первом случае, когда рассматривается только балдж,  $\psi \approx 38^\circ$ , а во втором, когда рассматривается исходное изображение с диском,  $\psi \approx 21^\circ$ . Ясно, что источником указанных различий является в основном компонента диска. Тем самым, Рис. 4.14 непосредственно показывает, что значение угла раствора, полученное на основании распределения амплитуды  $B_6$ , сильно зависит от вклада диска. С добавлением диска к В/PS балджу изофоты становятся более вытянутыми, эллиптичность уменьшается и, согласно уравнению. (4.12), значение угла раствора также уменьшается. По-видимому, наблюдаемый систематический сдвиг углов [47] в меньшую сторону объясняется как раз именно тем, что авторы исследовали профили изофот для всей галактики целиком, то есть для В/PS балджа и диска вместе взятых.

Что касается сравнения с результатами работы [48], отметим, что строгое сравнение вряд ли возможно, поскольку процедура нерезкого маскирования имеет несколько параметров, которые, собственно, и определяют, каким получится изображение на выходе. Эти параметры обычно выбираются наблюдателем, и, кроме того, могут зависеть от различных факторов. Например, от того, насколько ярко выделяется X-структура изначально. Чтобы более чётко понять, как метод нерезкого маскирования работает для В/PS балджей и их X-структур, рассмотрим маскированные изображения модели балджа, маскированное изображение полной фотометрической модели и маскированное изображение исходной галактики ESO 443-042. Эти изображения представлены на Рис. 4.15. Все изображения подготовлены с использованием одних и тех же параметров фильтра и построены в одинаковом масштабе по интенсивности. Как видно из рисунка, для модели балджа действительно оказывается, что нерезкая маска практически точно подсвечивает местоположения лучей X-структуры. В случае же исходного полного изображения галактики процедура нерезкого маскирования преобразует балдж в два “крыла” бабочки с большим провалом между ними. X-структуры менее заметны в этом случае (особенно два левых луча), хотя они все еще мо-

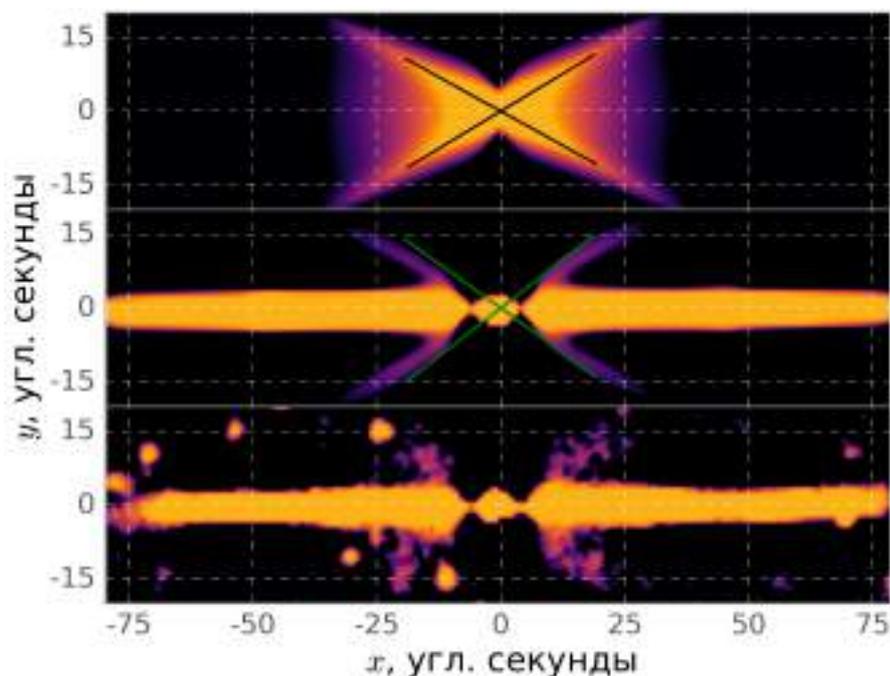


Рис. 4.15 — Маскированные изображения выделенного В/PS балджа в галактике ESO 443-042 (сверху), всей фотометрической модели (в середине) и реальной галактики (снизу), полученные при использовании одинаковых параметров фильтра. Черным крестом отмечено расположение лучей X-структуры. Зеленый крестом показано местоположение лучей X-структуры, если бы у них был угол раствора  $37^\circ$  — значение, полученное Лаурикайнен и Сало [48] для этой галактики.

гут быть идентифицированы. Далее возникает вопрос, как измерять параметры таким образом подсвеченных лучей. По-видимому, авторы работы [48] измеряли их вручную, и это могло приводиться к некоторым ошибками, в том числе к систематическому сдвигу углов раствора в сторону больших значений. Отметим также, что в дополнительных экспериментах с параметрами маски было найдено, что повышение вклада градиента в изображение на выходе помогает более точно определить положение лучей X-структуры.

Перейдем к сравнению используемого в настоящей работе подхода и подхода, использованного в работе [49]. Также будем рассматривать галактику ESO 443-042, хотя исходно в работе [49] она не рассматривалась. Следуя [49], проанализируем распределения плотности вдоль фотометрических разрезов. Одна из интересных особенностей работы [49] заключалась в том, что авторы рассматривали не сам В/PS балдж, а сумму модели балджа и вычета, и для такого суммарного изображения измеряли параметры X-структуры. На Рис. 4.16 показано подобное изображение для ESO 443-042, построенное с использованием полученной в настоящей работе модели В/PS балджа для этой галактики. Для такого изображения проанализируем распределения плотности вдоль эллипсов с различными значениями больших полуосей в диапазоне от 8 до 18 угловых

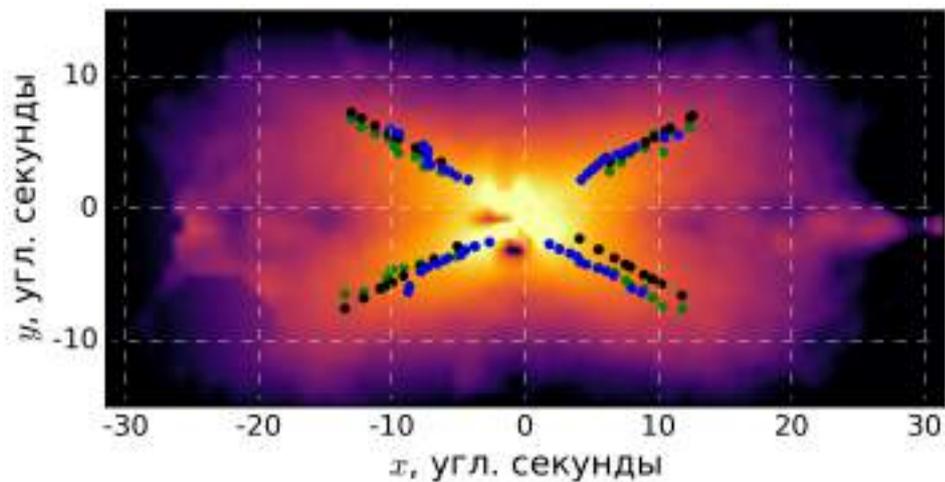


Рис. 4.16 — Сравнение методов измерения углов раствора X-структуры в настоящей работе и в [49] для ESO 443-042. Зелеными и синими точками показаны положения пиков плотности, определенные вдоль эллиптических разрезов с эллиптичностью  $\varepsilon = 0.4$  и  $\varepsilon = 0.6$ , соответственно. Черные точками показано фактическое местоположение лучей X-структуры в фотометрической модели V/PS балджа в настоящей работе.

секунд. Рассматривалось два набора эллипсов, один набор эллипсов с эллиптичностью  $\varepsilon = 0.4$  (зеленые точки), и второй – с  $\varepsilon = 0.6$  (синие точки). Вдоль каждого из эллипсов рассчитывался профиль интенсивности и определялось четыре пика интенсивности, соответствующие точкам, где лучи X-структуры пересекаются с эллипсами. Для сравнения на Рис. 4.16 также добавлены точки, отмечающие положение луча X-структуры в модели V/PS балджа для этой галактики, полученной с помощью фотометрической декомпозиции (черным цветом). Как видно, все определенные пики плотности прочерчивают практически одинаковые лучи, за исключением правого нижнего луча, но и там разница небольшая. Пространственная согласованность определённых пиков плотности говорит о том, что метод, основанный на фотометрических разрезах, должен приводить к результатам, близким к полученным в настоящей работе. Отсюда следует, что причина систематического сдвига углов, наблюдаемого на Рис. 4.13, должна быть какая-то другая, нежели различие в методах. В пункте 4.4, где изучалось влияние различных моделей дисков на определяемые параметры V/PS балджа, было показано, что применение модели обычного экспоненциального диска (без дырки) может приводить к занижению значений углов раствора. Причём эффект должен быть тем сильнее, чем ближе большая ось повёрнута к лучу зрения (см. Рис. 4.6). В работе [49] использовалась как раз модель обычного экспоненциального диска. Следовательно, логично связать наблюдаемый систематический сдвиг с различиями в применяемых здесь и в [49] моделях дисков.

#### 4.7 Сравнение с модельными галактиками

Рис. 4.17 показывает, как распределены углы раствора и параметры контрастности для реальных галактик и для модельных, рассмотренных ранее на Рис. 4.9. Как видно параметры реальных галактики в целом согласуются с модельными данными. С точки зрения углов раствора реальные X-структуры охватывают диапазон значений от около  $27^\circ$  до примерно  $44^\circ$ . Отметим, что тангенс нижней граница значений,  $27^\circ$ , есть примерно 0.51. Это значение хорошо согласуется с нижней границей, найденной в работе [48], для отношений вертикально размера и размер в плоскости V/PS балджей реальных и модельных галактик (см. рисунок 8 цитируемой работы). Также отметим, что для большинства реальных V/PS балджей параметр контрастности находится в диапазоне от  $r_x/s_x \approx 1$  до  $r_x/s_x \approx 2$ . V/PS балджи модельных галактик демонстрируют аналогичные значения параметра контрастности в случае бара, повернутого от около  $45^\circ$  до  $90^\circ$  к лучу зрения. Из Рис. 4.17 также видно, что V/PS балджи некоторых реальных галактик не ложатся на модельные кривые. Например, V/PS балдж NGC 2654 имеет значение угла раствора X-структуры  $\varphi \approx 30^\circ$  и довольно небольшое значение параметра контрастности,  $r_x/s_x \approx 0.6$  (точка, которая на рисунке находится ближе всего к левому углу нижнему углу). А в NGC 5529 X-структура имеет угол раствора  $\varphi \approx 36^\circ$  и значение параметра контрастности  $r_x/s_x \approx 2$  (на рисунке самая правая синяя точка). В дальнейшем интересно проверить, в каких случаях у модельных галактик должны наблюдаться V/PS балджи с малыми параметрами контрастности и маленькими углами раствора как у NGC 2654 и, наоборот, большие углы раствора и большие значения параметра контрастности, как у NGC 5529. Возможно, что такие комбинации параметров должны встречаться на определённых этапах эволюции V/PS балджей. Аккуратное рассмотрение этого вопроса требует дальнейших исследований.

Другое важное наблюдение, которое можно сделать из Рис. 4.17, состоит в следующем. Из рисунка видно, что реальные X-структуры не демонстрируют углы раствора меньше, чем полученные для модельных галактик. Таким образом, проблема с наличием у реальных галактик малых углов раствора, обозначенная в Главе 1, решена. Можно заключить, что расхождение между модельными и реальными данными, которые наблюдалось, связано исключительно с разницей в

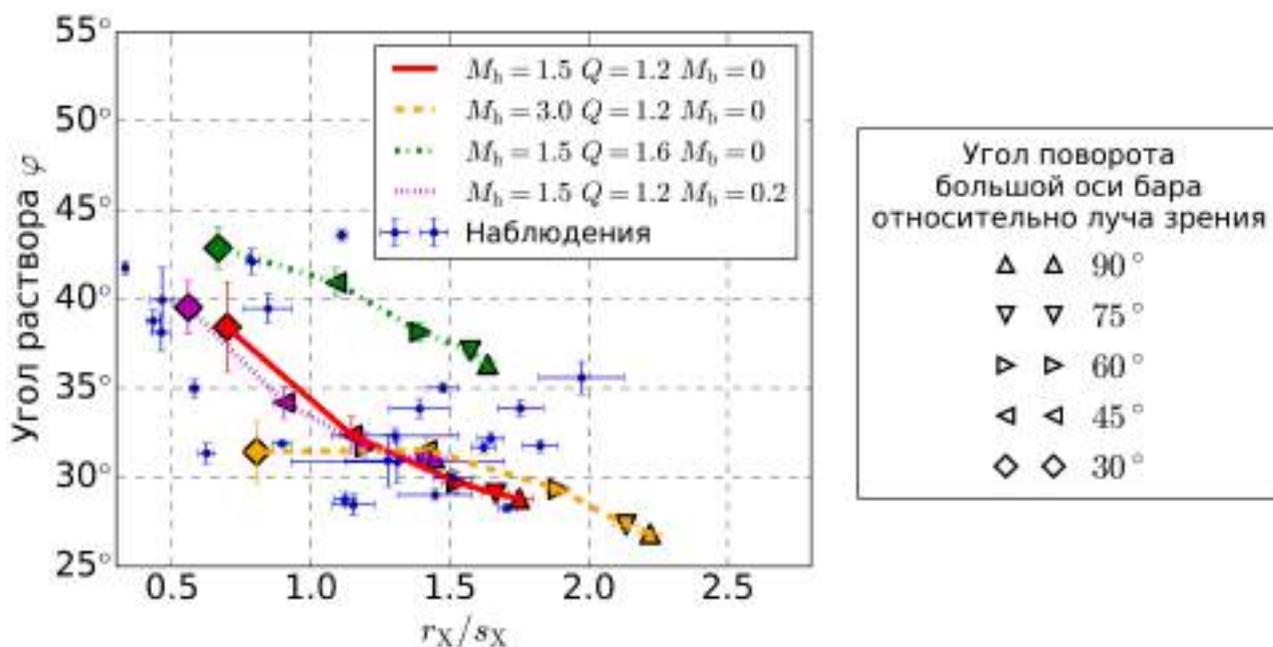


Рис. 4.17 — Сравнение углов раствора и параметров контрастности В/PS балджей с X-структурами реальных (синие точки) и четырёх модельных (треугольники и четырёхугольники) галактик, рассмотренных ранее на Рис. 4.9.

методах измерения, и нет необходимости искать какие-либо физические причины для объяснения этого расхождения.

#### 4.8 Выводы главы

В заключение данной главы отметим следующее. Была предложена фотометрическую модель, в которой одновременно учитывается как весь В/PS балдж, так и его X-структура, которая является частью такого балджа. Предложенная модель, по сути, является модифицированной двумерной функцией Сёрсика с обрезанным профилем интенсивности. Профиль обрезается выше (в верхней полуплоскости) и ниже (в нижней полуплоскости) лучей X-структуры. Модель позволяет измерять геометрические свойства X-структур (угол раствора, линейный размеры) в рамках процедуры фотометрической декомпозиции.

Вид модели был предложен на основе рассмотрения В/PS балджа некоторой конкретной численной модели галактики, где такой балдж естественным образом возникает из-за утолщения бара в вертикальном направлении. Рассмотренный тип численной модели часто используется для изучения вековой эволюции галактик с барами. Важной особенностью проделанного исследования является то,

что V/PS балдж вначале извлекался с использованием некоторых динамических соображений. В частности, модельная галактика делилась на две динамические подсистемы (“бар + диск”) на основе частотных характеристик орбит частиц. Такое разделение позволило не учитывать дисковую компоненту при поиске подходящей фотометрической модели для V/PS балджа.

На основе набора различных модельных галактик, было изучено, как параметры предложенной модели меняются в зависимости от эффектов проекции (наклон диска, поворот бара к лучу зрения), выбранной модели диска (простой экспоненциальный диск и диск с дыркой в центре) и в случае сосуществования двух балджей в одной галактике. Было найдено, что применение модели диска с дыркой приводит к более точному восстановлению параметров балджей по сравнению с моделью простого экспоненциального диска для всех рассмотренных наклонов диска и ориентаций бара. В случае сосуществования двух балджей (V/PS балджа и классического балджа) было найдено, что получаемые параметры V/PS балджа слабо искажаются наличием других компонент.

Предложенная модель V/PS балджа была применена для изучения V/PS балджей некоторых реальных галактик. Всего была рассмотрена тридцать одна галактика. Балджи этих галактик ранее изучались в работах [47; 49] и [48] (в каждой работе некоторая подвыборка рассмотренной здесь выборки) с использованием разных методов. Для трёх из этих галактик (NGC 678, NGC 2549 и NGC 4111) надёжную фотометрическую модель V/PS балджа получить не удалось. Это связано с тем, что в этих галактиках на стадии предварительной обработки не удалось отождествить явной X-структуры. Также не удалось получить надёжную фотометрическую модель для PGC 21357, NGC 3628 и NGC 4469 из-за сложной структуры пылевой компоненты в этих галактиках. Для каждой из оставшихся двадцати пяти галактик была получена оптимальная фотометрическая модель, включающая в себя модель V/PS балджа в качестве отдельной компоненты. Полученные значения углов раствора затем сравнивались с соответствующими значениями углов раствора, полученными в [47; 49] и [48] для тех же галактик. Было найдено, что применение различных методов измерения приводит к систематически различным результатам для одних и тех же галактик. На примере галактики ESO 443-042 было показано, что амплитуда 6-й Фурье-гармоники  $V_6$ , использованная в работе [47] для характеристики V/PS балджей, сильно зависит от вклада диска, и получаемое из её распределения по диску значения угла

раствора в некоторых случаях может не соответствовать реальному значению угла раствора X-структуры.

Было проведено сравнение геометрических параметров В/PS балджей некоторых модельных галактик из Главы 1 с полученными значениями тех же параметров для реальных галактик. Было найдено, что значения охватывают один и тот же диапазон, если их измерять одинаковым образом для модельных и реальных галактик. При этом также было найдено, что реальные X-структуры не показывают углы раствора меньше, чем примерно  $27^\circ$ . Отсюда можно сделать вывод, что несоответствие между модельными и реальными X-структурами, обозначенное в Главе 1, является следствием разницы в подходах к измерению X-структур, а не каких-либо физических причин.

## Заключение

В заключение отметим наиболее важные результаты настоящей работы.

1. Впервые была поставлена и решена задача об исследовании зависимости свойств X-структур от параметров галактик, в которых такие X-структуры наблюдаются. В качестве основного инструмента исследования использовалось численное моделирование. Свойства X-структур анализировались в тринадцати моделях галактик с различными наборами начальных параметров. Численное моделирование выбиралось по той причине, что при анализе X-структур, прежде всего, необходимо рассматривать вековую эволюцию галактики и эволюцию образующегося в ней бара на длительной шкале времени, сравнимой со временем жизни галактики. Каждая из рассмотренных моделей включала в себя звёздный диск, гало типа Наварро-Френка-Вайта и, в некоторых случаях, классический балдж. Для каждой модели подготавливалась численная реализация и решались уравнения движения частиц-звёзд на промежутке времени примерно 8 млрд. лет. В каждой модели измерялись угол раствора и длина лучей X-структур, которые затем сравнивались между собой (в различных моделях) и с полученными другими авторами наблюдательными данными. Были найдены различные характерные зависимости параметров X-структур от параметров галактик, наиболее важной из которых представляется следующая: нижняя граница диапазона углов раствора должна определяться галактиками с большим вкладом тёмной материи в общий потенциал галактики:  $M_h(r < 4R_d)/M_d \approx 3$ , где  $M_h(r < 4R_d)$  – масса тёмного гало в сфере с радиусом равным оптическому радиусу диска и  $M_d$  – масса диска. Этот факт имеет прямое приложение к наблюдательным данным и в дальнейшем может быть использован для дополнительно ограничения параметров наблюдаемых галактик.
2. В 13 различных моделях было тщательно изучено влияние дополнительной центральной концентрации (представляемой классическим балджем) на продолжительный поздний изгиб бара. Было показано, что наличие такой концентрации с типичными параметрами приводит к эффективному подавлению позднего изгиба бара в широком диапазоне

значений начальных параметров галактики. Для модели, в которой эпизод позднего изгиба бара был одним из самых выраженных среди всех рассмотренных моделей, была определена граничная масса балджа, при которой такой изгиб всё же возможен:  $M_b/M_d \lesssim 0.1$ . Полученные значения массы балджа весьма малы по сравнению с типичными наблюдаемыми значениями для реальных галактик. Это означает, что в галактиках ранних типов поздний изгиб бара может эффективно подавляться наличием балджа малой массы, и в дальнейшем изгибающиеся бары следует искать в галактиках без классических балджей и малым вкладом газовой составляющей.

3. На примере двух моделей с различной морфологией В/PS балджей и X-структур была исследована природа X-структур в рассмотренных моделях. Для этого использовались методы так называемой спектральной динамики. В рамках этого подхода орбита каждой частицы характеризуется набором частот, определяемых по пикам в спектрах соответствующих координат. Рассматривались следующие частоты: эпициклическая частота  $f_R$ , частота колебаний вдоль оси  $x$   $f_x$  и частота колебаний по вертикальной оси  $f_z$ . Все частоты рассчитывались в системе отсчёта, вращающейся вместе с баром.

Для рассмотренных моделей оказалось, что и В/PS балджи, и X-структуры формируются из различных типов регулярных трёхмерных орбит, характеризуемых различными отношениями  $f_z/f_x$ . Детальный анализ пространственного распределения орбит с разными отношениями  $f_z/f_x$  показал, что в двух рассматриваемых моделях одни и те же семейства орбит имеют разные пространственные распределения. При этом общая морфология В/PS балджа и X-структур определяется тем, какое из семейств орбит с выделенным отношением  $f_z/f_x$  преобладает в данной конкретной модели. Кроме того, было найдено, что ансамбль каждого типа орбит вносит свой вклад в X-структуру, и X-структуры в рассмотренных моделях образуются не за счёт бананообразных орбит 2:1. Сам феномен X-структур для рассмотренных моделей объясняется тем, что звёзды, движущиеся по орбитам с различными отношениями  $f_z/f_x$ , стремятся проводить больше времени в  $z$ -максимумах соответствующих орбит, а лучи X-структур есть огибающие этих максимумов. При этом аналогично общей морфологии В/PS балджа параметры луча

(протяженность и угол раствора) определяются тем, какое из семейств доминирует в данной конкретной модели.

4. Для исследования вопроса о том, почему в некоторых реальных галактиках углы раствора лучей X-структур имеют очень малые углы раствора, не наблюдаемые в модельных галактиках, была предложена новая фотометрическая модель балджа с X-структурой, где значение угла раствора фигурирует явно. С её помощью было проанализировано, как на получаемые параметры В/PS балджа влияют эффекты проекции, форма фотометрической модели диска и наличие других фотометрических компонент (классического балджа). Затем была выполнена декомпозиция четырёх характерных модельных галактик и тридцати одной реальной галактики с В/PS балджами. Было показано, что значения углов раствора реальных галактик лежат выше нижней границы углов раствора, наблюдаемых в модельных галактиках, если выполнять декомпозицию реальных и модельных галактик с новой фотометрической моделью. Также было показано, что для некоторых галактик метод, основанный на аппроксимации изофот возмущёнными эллипсами, может давать неверные результаты из-за вклада диска.

## Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Наталья Яковлевне Сотниковой за руководство научной работой, поддержку при оформлении диссертации и многочисленные советы и обсуждения в ходе самой работы. Большинство идей и подходов, используемых в данной работе, возникли как результат плодотворного сотрудничества с Натальей Яковлевной Сотниковой.

Автор благодарит своих коллег: Сергея Сергеевича Савченко, Александра Александровича Марчука, Александра Владимировича Мосенкова и Анну Дмитриевну Паруль, с которыми обсуждались различные детали настоящей работы.

Отдельную благодарность автор выражает сотрудникам астрономического отделения СПбГУ и, прежде всего, Петру Александровичу Тараканову за предоставленные возможности для расчётов и своевременную техническую поддержку.

Автор также благодарит коллектив лаборатории динамики Галактики, в том числе Вадима Вадимовича Бобылева и Анису Талгатовну Байкову, за поддержку в ходе работы над диссертацией и обсуждение деталей настоящей работы в рамках проводимых в лаборатории семинаров.

## Список литературы

1. *Lütticke, R.* Box- and peanut-shaped bulges. I. Statistics / R. Lütticke, R.-J. Dettmar, M. Pohlen // *A&AS*. — 2000. — Сент. — Т. 145. — С. 405—414. — eprint: [astro-ph/0006359](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006359).
2. *Burbidge, E. M.* Three Unusual so Galaxies. / E. M. Burbidge, G. R. Burbidge // *ApJ*. — 1959. — Июль. — Т. 130. — С. 20.
3. *Whitmore, B. C.* IC 4767 (the 'X-galaxy') - The missing link for understanding galaxies with peanut-shaped bulges? / B. C. Whitmore, M. Bell // *ApJ*. — 1988. — Янв. — Т. 324. — С. 741—748.
4. *Jarvis, B. J.* A search for box- and peanut-shaped bulges. / B. J. Jarvis // *AJ*. — 1986. — Янв. — Т. 91. — С. 65—69.
5. *Shaw, M. A.* The nature of 'box' and 'peanut' shaped galactic bulges. / M. A. Shaw // *MNRAS*. — 1987. — Дек. — Т. 229. — С. 691—706.
6. *de Souza, R. E.* Box-shaped galaxies : a complete list. / R. E. de Souza, S. Dos Anjos // *A&AS*. — 1987. — Сент. — Т. 70. — С. 465—480.
7. *Erwin, P.* Peanuts at an angle: detecting and measuring the three-dimensional structure of bars in moderately inclined galaxies / P. Erwin, V. P. Debattista // *MNRAS*. — 2013. — Июнь. — Т. 431. — С. 3060—3086. — arXiv: [1301.0638](https://arxiv.org/abs/1301.0638).
8. *Yoshino, A.* Box/peanut and bar structures in edge-on and face-on nearby galaxies in the Sloan Digital Sky Survey - I. Catalogue / A. Yoshino, C. Yamauchi // *MNRAS*. — 2015. — Февр. — Т. 446, № 4. — С. 3749—3767.
9. *Erwin, P.* The frequency and stellar-mass dependence of boxy/peanut-shaped bulges in barred galaxies / P. Erwin, V. P. Debattista // *MNRAS*. — 2017. — Июнь. — Т. 468. — С. 2058—2080. — arXiv: [1703.01602](https://arxiv.org/abs/1703.01602).
10. Revealing the cosmic evolution of boxy/peanut-shaped bulges from HST COSMOS and SDSS / S. J. Kruk [и др.] // *MNRAS*. — 2019. — Дек. — Т. 490, № 4. — С. 4721—4739. — arXiv: [1910.04768](https://arxiv.org/abs/1910.04768) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1910.04768)].
11. *Jarvis, B. J.* The dynamics of galactic bulges : дис. ... канд. / Jarvis Brian J. — Australian National University, Australia, 01.1981.

12. *Hernquist, L.* Formation of Shell Galaxies. I. Spherical Potentials / L. Hernquist, P. J. Quinn // *ApJ*. — 1988. — Август. — Т. 331. — С. 682.
13. *Schweizer, F.* Ripples in Disk Galaxies / F. Schweizer, P. Seitzer // *ApJ*. — 1988. — Май. — Т. 328. — С. 88.
14. *Combes, F.* Formation and properties of persisting stellar bars / F. Combes, R. H. Sanders // *A&A*. — 1981. — Март. — Т. 96. — С. 164—173.
15. The Frequency of Barred Spiral Galaxies in the Near-Infrared / P. B. Eskridge [и др.] // *AJ*. — 2000. — Февр. — Т. 119, № 2. — С. 536—544. — arXiv: [astro-ph/9910479](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910479) [[astro-ph](#)].
16. A Near-Infrared Study of 2MASS Bars in Local Galaxies: An Anchor for High-Redshift Studies / K. Menéndez-Delmestre [и др.] // *ApJ*. — 2007. — Март. — Т. 657, № 2. — С. 790—804. — arXiv: [astro-ph/0611540](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0611540) [[astro-ph](#)].
17. *Marinova, I.* Characterizing Bars at  $z \sim 0$  in the Optical and NIR: Implications for the Evolution of Barred Disks with Redshift / I. Marinova, S. Jogee // *ApJ*. — 2007. — Апрель. — Т. 659, № 2. — С. 1176—1197. — arXiv: [astro-ph/0608039](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608039) [[astro-ph](#)].
18. Photometric Decomposition of Barred Galaxies / A. S. Reese [и др.] // *AJ*. — 2007. — Июнь. — Т. 133, № 6. — С. 2846—2858. — arXiv: [astro-ph/0702720](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0702720) [[astro-ph](#)].
19. Galaxy Zoo: bars in disc galaxies / K. L. Masters [и др.] // *MNRAS*. — 2011. — Март. — Т. 411, № 3. — С. 2026—2034. — arXiv: [1003.0449](https://arxiv.org/abs/1003.0449) [[astro-ph.CO](#)].
20. Box and peanut shapes generated by stellar bars / F. Combes [и др.] // *A&A*. — 1990. — Июль. — Т. 233. — С. 82—95.
21. *Friedli, D.* Thick bars as box- or peanut shaped bulges / D. Friedli, D. Pfenniger // European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings. Т. 35 / под ред. В. J. Jarvis, D. M. Terndrup. — 1990. — С. 265—268. — (European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings).
22. A dynamical instability of bars in disk galaxies / N. Raha [и др.] // *Nature*. — 1991. — Август. — Т. 352. — С. 411.
23. *Pfenniger, D.* Structure and dynamics of 3D N-body barred galaxies / D. Pfenniger, D. Friedli // *A&A*. — 1991. — Дек. — Т. 252. — С. 75—93.

24. *Bertola, F.* Dynamics of early-type galaxies. II. The rotation curve of the S0 galaxy NGC 128. / F. Bertola, M. Capaccioli // *ApJ*. — 1977. — Февр. — Т. 211. — С. 697—706.
25. *Kormendy, J.* Rotation of the bulge components of disk galaxies. / J. Kormendy, G. Illingworth // *ApJ*. — 1982. — Май. — Т. 256. — С. 460.
26. *Kuijken, K.* Establishing the Connection between Peanut-shaped Bulges and Galactic Bars / K. Kuijken, M. R. Merrifield // *ApJ*. — 1995. — Апр. — Т. 443. — С. L13. — arXiv: [astro-ph/9501114](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9501114) [[astro-ph](#)].
27. *Bureau, M.* The Nature of Boxy/Peanut-Shaped Bulges in Spiral Galaxies / M. Bureau, K. C. Freeman // *AJ*. — 1999. — Июль. — Т. 118, № 1. — С. 126—138. — arXiv: [astro-ph/9904015](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9904015) [[astro-ph](#)].
28. *Merrifield, M. R.* Hidden bars and boxy bulges / M. R. Merrifield, K. Kuijken // *A&A*. — 1999. — Май. — Т. 345. — С. L47—L50. — arXiv: [astro-ph/9904158](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9904158) [[astro-ph](#)].
29. *Veilleux, S.* A Kinematic Link Between Boxy Bulges, Stellar Bars, and Nuclear Activity in NGC 3079 and NGC 4388 / S. Veilleux, J. Bland-Hawthorn, G. Cecil // *AJ*. — 1999. — Ноябрь. — Т. 118, № 5. — С. 2108—2122. — arXiv: [astro-ph/9907444](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9907444) [[astro-ph](#)].
30. *Chung, A.* Stellar Kinematics of Boxy Bulges: Large-Scale Bars and Inner Disks / A. Chung, M. Bureau // *AJ*. — 2004. — Июнь. — Т. 127, № 6. — С. 3192—3212. — arXiv: [astro-ph/0403232](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0403232) [[astro-ph](#)].
31. *Quillen, A. C.* Growth of a Peanut-shaped Bulge via Resonant Trapping of Stellar Orbits in the Vertical Inner Lindblad Resonances / A. C. Quillen // *AJ*. — 2002. — Авг. — Т. 124. — С. 722—732. — eprint: [astro-ph/0203170](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0203170).
32. A vertical resonance heating model for X- or peanut-shaped galactic bulges / A. C. Quillen [и др.] // *MNRAS*. — 2014. — Янв. — Т. 437. — С. 1284—1307. — arXiv: [1307.8441](https://arxiv.org/abs/1307.8441).
33. *Athanassoula, E.* On the nature of bulges in general and of box/peanut bulges in particular: input from N-body simulations / E. Athanassoula // *MNRAS*. — 2005. — Апр. — Т. 358. — С. 1477—1488. — eprint: [astro-ph/0502316](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0502316).
34. *Toomre, A.* A Kelvin-Helmholtz Instability / A. Toomre // *Notes from Geophysical Fluid Dynamics Summer Program*. — 1966. — С. 111—114. — (Astrophysics and Space Science Library).

35. *Poliachenko, V. L.* Evaluation of the maximum anisotropy of the stellar velocity distribution in galaxies / V. L. Poliachenko, I. G. Shukhman // Soviet Astronomy Letters. — 1977. — ИЮНЬ. — Т. 3. — С. 134—136.
36. *Araki, S.* A Theoretical Study of the Stability of Disk Galaxies and Planetary Rings. : дис. ... канд. / Araki S. — Massachusetts Institute of Technology., 1985.
37. *Merritt, D.* Bending instabilities in stellar systems / D. Merritt, J. A. Sellwood // ApJ. — 1994. — Апр. — Т. 425. — С. 551—567.
38. *Sellwood, J. A.* Three mechanisms for bar thickening / J. A. Sellwood, O. Gerhard // MNRAS. — 2020. — Май. — Т. 495, № 3. — С. 3175—3191. — arXiv: [2005.05184 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/2005.05184).
39. *Athanassoula, E.* Boxy/Peanut/X Bulges, Barlenses and the Thick Part of Galactic Bars: What Are They and How Did They Form? / E. Athanassoula // Galactic Bulges. Т. 418 / под ред. E. Laurikainen, R. Peletier, D. Gadotti. — 2016. — С. 391. — (Astrophysics and Space Science Library). — arXiv: [1503.04804](https://arxiv.org/abs/1503.04804).
40. *Pfenniger, D.* The 3D dynamics of barred galaxies / D. Pfenniger // A&A. — 1984. — Май. — Т. 134, № 2. — С. 373—386.
41. *Skokos, C.* Orbital dynamics of three-dimensional bars - I. The backbone of three-dimensional bars. A fiducial case / C. Skokos, P. A. Patsis, E. Athanassoula // MNRAS. — 2002. — Июль. — Т. 333, № 4. — С. 847—860. — arXiv: [astro-ph/0204077 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0204077).
42. *Patsis, P. A.* Orbital dynamics of three-dimensional bars - III. Boxy/peanut edge-on profiles / P. A. Patsis, C. Skokos, E. Athanassoula // MNRAS. — 2002. — Дек. — Т. 337. — С. 578—596.
43. *Patsis, P. A.* The phase space of boxy-peanut and X-shaped bulges in galaxies - I. Properties of non-periodic orbits / P. A. Patsis, M. Katsanikas // MNRAS. — 2014. — Дек. — Т. 445. — С. 3525—3545. — arXiv: [1410.4921 \[nlin.CD\]](https://arxiv.org/abs/1410.4921).
44. *Patsis, P. A.* The phase space of boxy-peanut and X-shaped bulges in galaxies - II. The relation between face-on and edge-on boxiness / P. A. Patsis, M. Katsanikas // MNRAS. — 2014. — Дек. — Т. 445, № 4. — С. 3546—3556. — arXiv: [1410.4923 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1410.4923).

45. *Patsis, P. A.* Building CX peanut-shaped disk galaxy profiles. The relative importance of the 3D families of periodic orbits bifurcating at the vertical 2:1 resonance / P. A. Patsis, M. Harsoula // *A&A.* — 2018. — Май. — Т. 612. — A114. — arXiv: [1804.06199](https://arxiv.org/abs/1804.06199).
46. *Patsis, P. A.* The orbital content of bars: the origin of ‘non-x1-tree’, bar-supporting orbits / P. A. Patsis, E. Athanassoula // *MNRAS.* — 2019. — Дек. — Т. 490, № 2. — С. 2740—2759. — arXiv: [2002.06231](https://arxiv.org/abs/2002.06231) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
47. *Ciambur, B. C.* Quantifying the (X/peanut)-shaped structure in edge-on disc galaxies: length, strength, and nested peanuts / B. C. Ciambur, A. W. Graham // *MNRAS.* — 2016. — ИЮНЬ. — Т. 459. — С. 1276—1292. — arXiv: [1603.00019](https://arxiv.org/abs/1603.00019).
48. *Laurikainen, E.* Barlenses and X-shaped features compared: two manifestations of boxy/peanut bulges / E. Laurikainen, H. Salo // *A&A.* — 2017. — Февр. — Т. 598. — A10. — arXiv: [1609.01936](https://arxiv.org/abs/1609.01936).
49. Measuring the X-shaped structures in edge-on galaxies / S. S. Savchenko [и др.] // *MNRAS.* — 2017. — Нояб. — Т. 471. — С. 3261—3272. — arXiv: [1707.04700](https://arxiv.org/abs/1707.04700).
50. *Portail, M.* Peanuts, brezels and bananas: food for thought on the orbital structure of the Galactic bulge / M. Portail, C. Wegg, O. Gerhard // *MNRAS.* — 2015. — ИЮНЬ. — Т. 450. — С. L66—L70. — arXiv: [1503.07203](https://arxiv.org/abs/1503.07203).
51. A Unified Framework for the Orbital Structure of Bars and Triaxial Ellipsoids / M. Valluri [и др.] // *ApJ.* — 2016. — Февр. — Т. 818, № 2. — С. 141. — arXiv: [1512.03467](https://arxiv.org/abs/1512.03467) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
52. On the orbits that generate the X-shape in the Milky Way bulge / C. G. Abbott [и др.] // *MNRAS.* — 2017. — Сент. — Т. 470. — С. 1526—1541. — arXiv: [1703.07366](https://arxiv.org/abs/1703.07366).
53. Gas-driven evolution of stellar orbits in barred galaxies / I. Berentzen [и др.] // *MNRAS.* — 1998. — Окт. — Т. 300. — С. 49—63. — eprint: [astro-ph/9806138](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9806138).
54. *O’Neill, J. K.* Detailed comparison of the structures and kinematics of simulated and observed barred galaxies / J. K. O’Neill, J. Dubinski // *MNRAS.* — 2003. — Нояб. — Т. 346. — С. 251—264. — eprint: [astro-ph/0305169](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305169).
55. *Martinez-Valpuesta, I.* Why Buckling Stellar Bars Weaken in Disk Galaxies / I. Martinez-Valpuesta, I. Shlosman // *ApJ.* — 2004. — Сент. — Т. 613. — С. L29—L32. — eprint: [astro-ph/0408241](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0408241).

56. The Secular Evolution of Disk Structural Parameters / V. P. Debattista [и др.] // *ApJ*. — 2006. — Июль. — Т. 645. — С. 209—227. — eprint: [astro-ph/0509310](#).
57. *Martinez-Valpuesta, I.* Evolution of Stellar Bars in Live Axisymmetric Halos: Recurrent Buckling and Secular Growth / I. Martinez-Valpuesta, I. Shlosman, C. Heller // *ApJ*. — 2006. — Янв. — Т. 637. — С. 214—226. — eprint: [astro-ph/0507219](#).
58. *Saha, K.* Meridional Tilt of the Stellar Velocity Ellipsoid during Bar Buckling Instability / K. Saha, D. Pfenniger, R. E. Taam // *ApJ*. — 2013. — Февр. — Т. 764. — С. 123. — arXiv: [1211.1120](#).
59. *Sotnikova, N. Y.* Mechanisms of the Vertical Secular Heating of a Stellar Disk / N. Y. Sotnikova, S. A. Rodionov // *Astronomy Letters*. — 2003. — Май. — Т. 29. — С. 321—335. — eprint: [astro-ph/0304215](#).
60. *Patsis, P. A.* The phase space of boxy-peanut and X-shaped bulges in galaxies - I. Properties of non-periodic orbits / P. A. Patsis, M. Katsanikas // *MNRAS*. — 2014. — Дек. — Т. 445. — С. 3525—3545. — arXiv: [1410.4921 \[nlin.CD\]](#).
61. *Erwin, P.* Caught in the Act: Direct Detection of Galactic Bars in the Buckling Phase / P. Erwin, V. P. Debattista // *ApJ*. — 2016. — Июль. — Т. 825. — С. L30. — arXiv: [1607.01290](#).
62. *Li, Z.-Y.* The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. V. Statistical Study of Bars and Buckled Bars / Z.-Y. Li, L. C. Ho, A. J. Barth // *ApJ*. — 2017. — Авг. — Т. 845. — С. 87. — arXiv: [1707.03570](#).
63. *Sellwood, J. A.* Three mechanisms for bar thickening / J. A. Sellwood, O. Gerhard // *MNRAS*. — 2020. — Июль. — Т. 495, № 3. — С. 3175—3191. — arXiv: [2005.05184 \[astro-ph.GA\]](#).
64. Structural and photometric properties of barred galaxies from the Auriga cosmological simulations / G. Blázquez-Calero [и др.] // *MNRAS*. — 2020. — Янв. — Т. 491, № 2. — С. 1800—1819. — arXiv: [1911.01964 \[astro-ph.GA\]](#).
65. *Smirnov, A. A.* What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? / A. A. Smirnov, N. Y. Sotnikova // *MNRAS*. — 2018. — Дек. — Т. 481, № 3. — С. 4058—4076. — arXiv: [1809.06167 \[astro-ph.GA\]](#).
66. *Toomre, A.* On the gravitational stability of a disk of stars / A. Toomre // *ApJ*. — 1964. — Vol. 139. — P. 1217—1238.

67. *Athanassoula, E.* Morphology, photometry and kinematics of N -body bars - I. Three models with different halo central concentrations / E. Athanassoula, A. Misiriotis // MNRAS. — 2002. — Февр. — Т. 330. — С. 35—52. — eprint: [astro-ph/0111449](#).
68. *Zasov, A. V.* Thickness of Thin Stellar Disks and the Mass of the Dark Halo / A. V. Zasov, D. I. Makarov, E. A. Mikhailova // Soviet Astronomy Letters. — 1991. — Апр. — Т. 17. — С. 374.
69. Relationship between the Thickness of Stellar Disks and the Relative Mass of a DarkGalactic Halo / A. V. Zasov [и др.] // Astronomy Letters. — 2002. — Авг. — Т. 28. — С. 527—535. — eprint: [astro-ph/0208124](#).
70. *Sotnikova, N. Y.* Estimating the dark halo mass from the relative thickness of stellar disks / N. Y. Sotnikova, S. A. Rodionov // Astronomy Letters. — 2006. — Окт. — Т. 32. — С. 649—660. — eprint: [astro-ph/0609163](#).
71. *Rodionov, S. A.* Bending instability in galactic discs: advocacy of the linear theory / S. A. Rodionov, N. Y. Sotnikova // MNRAS. — 2013. — Vol. 434. — P. 2373—2379.
72. *Salo, H.* Boxy/Peanut/X-Shaped Bulges: Steep Inner Rotation Curve Leads to Barlens Face-on Morphology / H. Salo, E. Laurikainen // ApJ. — 2017. — Февр. — Т. 835. — С. 252. — arXiv: [1611.03212](#).
73. *Sotnikova, N. Y.* Bending Instability of Stellar Disks: The Stabilizing Effect of a Compact Bulge / N. Y. Sotnikova, S. A. Rodionov // Astronomy Letters. — 2005. — ЯНВ. — Т. 31. — С. 15—29. — eprint: [astro-ph/0412063](#).
74. *Sellwood, J. A.* Relaxation in N-body Simulations of Disk Galaxies / J. A. Sellwood // ApJ. — 2013. — ИЮНЬ. — Т. 769. — С. L24. — arXiv: [1303.4919](#).
75. *Navarro, J. F.* The Structure of Cold Dark Matter Halos / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White // ApJ. — 1996. — Май. — Т. 462. — С. 563. — eprint: [astro-ph/9508025](#).
76. *Hernquist, L.* An analytical model for spherical galaxies and bulges / L. Hernquist // ApJ. — 1990. — ИЮНЬ. — Т. 356. — С. 359—364.
77. *de Blok, W. J. G.* The dark and visible matter content of low surface brightness disc galaxies / W. J. G. de Blok, S. S. McGaugh // MNRAS. — 1997. — СЕНТ. — Т. 290. — С. 533—552. — eprint: [astro-ph/9704274](#).

78. *Khoperskov, A. V.* The Halo-to-Disk Mass Ratio in Late-Type Galaxies / A. V. Khoperskov // *Astronomy Letters*. — 2002. — Окт. — Т. 28. — С. 651—655.
79. Dark Matter and Stellar Mass in the Luminous Regions of Disk Galaxies / J. Pizagno [и др.] // *ApJ*. — 2005. — Ноябрь. — Т. 633. — С. 844—856. — eprint: [astro-ph/0504581](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504581).
80. *Bizyaev, D.* Structural Parameters of Stellar Disks from two Micron All Sky Survey Images of Edge-on Galaxies / D. Bizyaev, S. Mitronova // *ApJ*. — 2009. — Сент. — Т. 702. — С. 1567—1574. — arXiv: [0907.3472](https://arxiv.org/abs/0907.3472).
81. *Binney, J.* Galactic Dynamics: Second Edition / J. Binney, S. Tremaine. — Princeton University Press, 2008.
82. Constraining the Galaxy's dark halo with RAVE stars / T. Piffl [и др.] // *MNRAS*. — 2014. — Дек. — Т. 445. — С. 3133—3151. — arXiv: [1406.4130](https://arxiv.org/abs/1406.4130).
83. *McMillan, P. J.* Initial conditions for disc galaxies / P. J. McMillan, W. Dehnen // *MNRAS*. — 2007. — Июнь. — Т. 378. — С. 541—550. — eprint: [astro-ph/0703534](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0703534).
84. *Teuben, P.* The Stellar Dynamics Toolbox NEMO / P. Teuben // *Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*. Т. 77 / под ред. R. A. Shaw, H. E. Payne, J. J. E. Hayes. — 1995. — С. 398. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
85. *Hernquist, L.* A Self-consistent Field Method for Galactic Dynamics / L. Hernquist, J. P. Ostriker // *ApJ*. — 1992. — Февр. — Т. 386. — С. 375.
86. *Clutton-Brock, M.* The Gravitational Field of Three Dimensional Galaxies / M. Clutton-Brock // *Ap&SS*. — 1973. — Июль. — Т. 23, № 1. — С. 55—69.
87. *Zhao, H.* Analytical models for galactic nuclei / H. Zhao // *MNRAS*. — 1996. — Янв. — Т. 278, № 2. — С. 488—496. — arXiv: [astro-ph/9509122](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9509122) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
88. *Eddington, A. S.* The distribution of stars in globular clusters / A. S. Eddington // *MNRAS*. — 1916. — Май. — Т. 76. — С. 572—585.
89. *Dehnen, W.* Simple Distribution Functions for Stellar Disks / W. Dehnen // *AJ*. — 1999. — Сент. — Т. 118. — С. 1201—1208. — eprint: [astro-ph/9906082](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9906082).
90. *Dehnen, W.* A Hierarchical  $O(N^2)$  Force Calculation Algorithm / W. Dehnen // *Journal of Computational Physics*. — 2002. — Июнь. — Т. 179. — С. 27—42. — eprint: [astro-ph/0202512](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0202512).

91. *Weinberg, M. D.* Secular Evolution of Barred Galaxies. : дис. ... канд. / Weinberg Martin Drew. — MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY., 01.1984.
92. *Debattista, V. P.* Dynamical Friction and the Distribution of Dark Matter in Barred Galaxies / V. P. Debattista, J. A. Sellwood // *ApJ*. — 1998. — ЯНВ. — Т. 493. — С. L5—L8. — arXiv: [astro-ph/9710039](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710039) [[astro-ph](#)].
93. *Athanassoula, E.* What determines the strength and the slowdown rate of bars? / E. Athanassoula // *MNRAS*. — 2003. — ИЮНЬ. — Т. 341. — С. 1179—1198. — eprint: [astro-ph/0302519](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302519).
94. *Valenzuela, O.* Secular bar formation in galaxies with a significant amount of dark matter / O. Valenzuela, A. Klypin // *MNRAS*. — 2003. — Окт. — Т. 345. — С. 406—422. — eprint: [astro-ph/0204028](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0204028).
95. *Savitzky, A.* Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M. J. E. Golay // *Analytical Chemistry*. — 1964. — Т. 36. — С. 1627—1639.
96. K-band observations of boxy bulges - I. Morphology and surface brightness profiles / M. Bureau [и др.] // *MNRAS*. — 2006. — АВГ. — Т. 370. — С. 753—772. — eprint: [astro-ph/0606056](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0606056).
97. *Laurikainen, E.* Observed Properties of Boxy/Peanut/Bartens Bulges / E. Laurikainen, H. Salo // *Galactic Bulges*. Т. 418 / под ред. E. Laurikainen, R. Peletier, D. Gadotti. — 2016. — С. 77. — (Astrophysics and Space Science Library). — arXiv: [1505.00590](https://arxiv.org/abs/1505.00590).
98. *Sellwood, J. A.* Secular evolution in disk galaxies / J. A. Sellwood // *Reviews of Modern Physics*. — 2014. — ЯНВ. — Т. 86, № 1. — С. 1—46. — arXiv: [1310.0403](https://arxiv.org/abs/1310.0403) [[astro-ph.GA](#)].
99. Separation of stellar populations by an evolving bar: implications for the bulge of the Milky Way / V. P. Debattista [и др.] // *MNRAS*. — 2017. — АВГ. — Т. 469. — С. 1587—1611. — arXiv: [1611.09023](https://arxiv.org/abs/1611.09023).
100. *Lokas, E. L.* Anatomy of a buckling galactic bar / E. L. Lokas // arXiv e-prints. — 2019. — ИЮНЬ. — arXiv:1906.03916. — arXiv: [1906.03916](https://arxiv.org/abs/1906.03916) [[astro-ph.GA](#)].
101. *Smirnov, A. A.* Is the late buckling stage inevitable in the bar life? / A. A. Smirnov, N. Y. Sotnikova // *MNRAS*. — 2019. — Май. — Т. 485, № 2. — С. 1900—1905. — arXiv: [1902.08485](https://arxiv.org/abs/1902.08485) [[astro-ph.GA](#)].

102. *Athanassoula, E.* Formation and Dynamical Evolution of Galaxies and of their Components / E. Athanassoula // Planetary Nebulae as Astronomical Tools. T. 804 / под ред. R. Szczerba, G. Stasińska, S. K. Gorny. — 11.2005. — С. 333—340. — (American Institute of Physics Conference Series). — eprint: [astro-ph/0510808](#).
103. Gas Feedback on Stellar Bar Evolution / I. Berentzen [и др.] // ApJ. — 2007. — Сент. — Т. 666. — С. 189—200. — eprint: [astro-ph/0703028](#).
104. *Sellwood, J. A.* Axisymmetric Bending Oscillations of Stellar Disks / J. A. Sellwood // ApJ. — 1996. — Дек. — Т. 473. — С. 733. — eprint: [astro-ph/9604123](#).
105. *Mosenkov, A. V.* 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results / A. V. Mosenkov, N. Y. Sotnikova, V. P. Reshetnikov // MNRAS. — 2010. — Янв. — Т. 401. — С. 559—576. — arXiv: [0909.1263 \[astro-ph.CO\]](#).
106. *Kataria, S. K.* A study of the effect of bulges on bar formation in disc galaxies / S. K. Kataria, M. Das // MNRAS. — 2018. — Апр. — Т. 475. — С. 1653—1664.
107. *Saha, K.* Why Are Some Galaxies Not Barred? / K. Saha, B. Elmegreen // ApJ. — 2018. — Май. — Т. 858. — С. 24.
108. *Martinez-Valpuesta, I.* Boxy/peanut bulges, vertical buckling and galactic bars / I. Martinez-Valpuesta, E. Athanassoula // Formation and Evolution of Galaxy Bulges. T. 245 / под ред. M. Bureau, E. Athanassoula, B. Barbuy. — 07.2008. — С. 103—106. — (IAU Symposium). — arXiv: [0710.4054](#).
109. The Kinematic Signature of Face-On Peanut-shaped Bulges / V. P. Debattista [и др.] // ApJ. — 2005. — Авг. — Т. 628. — С. 678—694. — eprint: [astro-ph/0504530](#).
110. Accretion-Inhibited Star Formation in the Warm Molecular Disk of the Greenvalley Elliptical Galaxy NGC 3226? / P. N. Appleton [и др.] // ApJ. — 2014. — Дек. — Т. 797. — С. 117. — arXiv: [1410.7347](#).
111. *Vaghmare, K.* A Spitzer Study of Pseudobulges in S0 Galaxies: Secular Evolution of Disks / K. Vaghmare, S. Barway, A. Kembhavi // ApJ. — 2013. — Апр. — Т. 767. — С. L33. — arXiv: [1303.6144 \[astro-ph.CO\]](#).
112. A SALT spectral study of S0s hosting pseudobulges / K. Vaghmare [и др.] // MNRAS. — 2018. — Ноябрь. — Т. 480. — С. 4931—4947.

113. Composite bulges: the coexistence of classical bulges and discy pseudo-bulges in S0 and spiral galaxies / P. Erwin [и др.] // MNRAS. — 2015. — Февр. — Т. 446. — С. 4039—4077. — arXiv: [1411.2599 \[astro-ph.GA\]](#).
114. Inner bars also buckle. The MUSE TIMER view of the double-barred galaxy NGC 1291. / J. Méndez-Abreu [и др.] // MNRAS. — 2018. — Окт. — С. L195.
115. *Parul, H. D.* Orbital Ingredients for Cooking X-structures in Edge-on Galaxies / H. D. Parul, A. A. Smirnov, N. Y. Sotnikova // ApJ. — 2020. — Май. — Т. 895, № 1. — С. 12. — arXiv: [2002.06627 \[astro-ph.GA\]](#).
116. *Contopoulos, G.* Orbits in weak and strong bars / G. Contopoulos, T. Papayannopoulos // A&A. — 1980. — Дек. — Т. 92, № 1/2. — С. 33—46.
117. *Patsis, P. A.* Orbital dynamics of three-dimensional bars - III. Boxy/peanut edge-on profiles / P. A. Patsis, C. Skokos, E. Athanassoula // MNRAS. — 2002. — Дек. — Т. 337. — С. 578—596.
118. *Portail, M.* Peanuts, brezels and bananas: food for thought on the orbital structure of the Galactic bulge / M. Portail, C. Wegg, O. Gerhard // MNRAS. — 2015. — ИЮНЬ. — Т. 450. — С. L66—L70. — arXiv: [1503.07203](#).
119. *Wozniak, H.* Formation of young boxy/peanut bulges in ringed barred galaxies / H. Wozniak, L. Michel-Dansac // A&A. — 2009. — ЯНВ. — Т. 494, № 1. — С. 11—20. — arXiv: [0902.0795 \[astro-ph.GA\]](#).
120. *Gajda, G.* The Orbital Structure of a Tidally Induced Bar / G. Gajda, E. L. Lokas, E. Athanassoula // ApJ. — 2016. — Окт. — Т. 830. — С. 108. — arXiv: [1606.00322](#).
121. *Miyamoto, M.* Three-dimensional models for the distribution of mass in galaxies. / M. Miyamoto, R. Nagai // PASJ. — 1975. — ЯНВ. — Т. 27. — С. 533—543.
122. *Ceverino, D.* Resonances in barred galaxies / D. Ceverino, A. Klypin // MNRAS. — 2007. — АВГ. — Т. 379. — С. 1155—1168. — eprint: [astro-ph/0703544](#).
123. *Wang, Y.* Orbital classification in an N-body bar / Y. Wang, E. Athanassoula, S. Mao // MNRAS. — 2016. — Дек. — Т. 463. — С. 3499—3512. — arXiv: [1609.02632](#).

124. *Binney, J.* Spectral stellar dynamics / J. Binney, D. Spergel // *ApJ*. — 1982. — ЯНВ. — Т. 252. — С. 308—321.
125. *Gasior, M.* Improving FFT Frequency Measurement Resolution by Parabolic and Gaussian Spectrum Interpolation / M. Gasior, J. L. Gonzalez // *American Institute of Physics Conference Series*. Т. 732 / под ред. Т. Shea, I. Silbey R. Coles. — 11.2004. — С. 276—285.
126. *Lyons, R. G.* Understanding Digital Signal Processing, 3rd Edition / R. G. Lyons. — 3-е изд. — Pearson Education Canada, 2010.
127. *Machado, R. E. G.* Chaotic motion and the evolution of morphological components in a time-dependent model of a barred galaxy within a dark matter halo / R. E. G. Machado, T. Manos // *MNRAS*. — 2016. — ИЮНЬ. — Т. 458, № 4. — С. 3578—3591. — arXiv: [1603.02294 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1603.02294).
128. *Contopoulos, G.* Order and chaos in dynamical astronomy / G. Contopoulos. — 2002.
129. Made-to-measure models of the Galactic box/peanut bulge: stellar and total mass in the bulge region / М. Portail [и др.] // *MNRAS*. — 2015. — Март. — Т. 448, № 1. — С. 713—731. — arXiv: [1502.00633 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1502.00633).
130. *Smirnov, A. A.* Face-on structure of barlenses and boxy bars: an insight from spectral dynamics / A. A. Smirnov, I. S. Tikhonenko, N. Y. Sotnikova // *MNRAS*. — 2021. — Апр. — Т. 502, № 4. — С. 4689—4707. — arXiv: [2007.09090 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/2007.09090).
131. *Harsoula, M.* Orbital structure in N-body models of barred-spiral galaxies / M. Harsoula, C. Kalapotharakos // *MNRAS*. — 2009. — Апр. — Т. 394, № 3. — С. 1605—1619. — arXiv: [1008.0493 \[astro-ph.IM\]](https://arxiv.org/abs/1008.0493).
132. *Voglis, N.* Orbital structure in barred galaxies / N. Voglis, M. Harsoula, G. Contopoulos // *MNRAS*. — 2007. — Окт. — Т. 381, № 2. — С. 757—770.
133. Boxy Orbital Structures in Rotating Bar Models / L. Chaves-Velasquez [и др.] // *ApJ*. — 2017. — Дек. — Т. 850, № 2. — С. 145. — arXiv: [1710.11163 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/1710.11163).
134. *Smirnov, A. A.* New X-shaped bulge photometric model as a tool for measuring B/PS bulges and their X-structures in photometric studies / A. A. Smirnov, S. S. Savchenko // *MNRAS*. — 2020. — Нояб. — Т. 499, № 1. — С. 462—481. — arXiv: [2007.12121 \[astro-ph.GA\]](https://arxiv.org/abs/2007.12121).

135. *Sersic, L. J.* Atlas de Galaxias Australes / L. J. Sersic. — Observatorio Astronomico, Cordoba, 1968.
136. *Caon, N.* On the shape of the light profiles of early-type galaxies. / N. Caon, M. Capaccioli, M. D’Onofrio // MNRAS. — 1993. — Дек. — Т. 265. — С. 1013—1021. — arXiv: [astro-ph/9309013](#) [[astro-ph](#)].
137. *Ferrers, N. M.* / N. M. Ferrers // Quart. J. Pure Appl. Math. — 1877. — Т. 14, № 1.
138. *Erwin, P.* IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting / P. Erwin // ApJ. — 2015. — Февр. — Т. 799, № 2. — С. 226. — arXiv: [1408.1097](#) [[astro-ph.IM](#)].
139. Unveiling the Structure of Barred Galaxies at 3.6  $\mu\text{m}$  with the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G). I. Disk Breaks / T. Kim [и др.] // ApJ. — 2014. — Февр. — Т. 782, № 2. — С. 64. — arXiv: [1312.3384](#) [[astro-ph.GA](#)].
140. *Kormendy, J.* Detection of a Pseudobulge Hidden Inside the “Box-shaped Bulge” of NGC 4565 / J. Kormendy, J. C. Barentine // ApJ. — 2010. — ИЮНЬ. — Т. 715, № 2. — С. L176—L179. — arXiv: [1005.1647](#) [[astro-ph.GA](#)].
141. Composite bulges: the coexistence of classical bulges and discy pseudo-bulges in S0 and spiral galaxies / P. Erwin [и др.] // MNRAS. — 2015. — Февр. — Т. 446, № 4. — С. 4039—4077. — arXiv: [1411.2599](#) [[astro-ph.GA](#)].
142. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances / D. Makarov [и др.] // A&A. — 2014. — Окт. — Т. 570. — A13. — arXiv: [1408.3476](#).
143. SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems / D. J. Eisenstein [и др.] // AJ. — 2011. — Сент. — Т. 142, № 3. — С. 72. — arXiv: [1101.1529](#) [[astro-ph.IM](#)].
144. The TERAPIX Pipeline / E. Bertin [и др.] // Astronomical Data Analysis Software and Systems XI. Т. 281 / под ред. D. A. Bohlender, D. Durand, T. H. Handley. — 01.2002. — С. 228. — (Astronomical Society of the Pacific Conference Series).
145. A unified picture of breaks and truncations in spiral galaxies from SDSS and S<sup>4</sup>G imaging / I. Martín-Navarro [и др.] // MNRAS. — 2012. — Дек. — Т. 427, № 2. — С. 1102—1134. — arXiv: [1208.2893](#) [[astro-ph.CO](#)].

146. *Bertin, E.* SExtractor: Software for source extraction. / E. Bertin, S. Arnouts // *A&AS*. — 1996. — Июнь. — Т. 117. — С. 393—404.
147. The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G) / K. Sheth [и др.] // *PASP*. — 2010. — Дек. — Т. 122, № 898. — С. 1397. — arXiv: [1010.1592](https://arxiv.org/abs/1010.1592) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
148. The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G): Multi-component Decomposition Strategies and Data Release / H. Salo [и др.] // *ApJS*. — 2015. — Июль. — Т. 219, № 1. — С. 4. — arXiv: [1503.06550](https://arxiv.org/abs/1503.06550) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
149. *Zwicky, F.* “Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies”, Vol. V / F. Zwicky, M. Karpowicz, C. T. Kowal. — 1965.
150. Structure and kinematics of the peculiar galaxy NGC 128 / M. D’Onofrio [и др.] // *A&AS*. — 1999. — Февр. — Т. 134. — С. 437—451. — arXiv: [astro-ph/9809213](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9809213) [[astro-ph](https://arxiv.org/archive/astro-ph)].
151. *Peterson, S. D.* Double galaxies. I. Observational data on a well-defined sample. / S. D. Peterson // *ApJS*. — 1979. — Июль. — Т. 40. — С. 527—575.