

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Чудакова Екатерина Михайловна
Исследование толщины дисков линзовидных галактик
в различном окружении

01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в отделе физики эмиссионных звезд и галактик Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Научный
руководитель**

— Сильченко Ольга Касьяновна,
доктор физико-математических наук,

**Официальные
оппоненты**

— Засов Анатолий Владимирович,
*доктор физико-математических наук, профессор, МГУ,
профессор кафедры астрофизики и звездной астрономии
физического факультета; ГАИШ МГУ, заведующий
отделом Внегалактической астрономии*

*Макаров Дмитрий Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор РАН,
Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
заведующий лабораторией внегалактической астрофизики
и космологии*

*Решетников Владимир Петрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
С-Петербургский государственный университет,
профессор кафедры астрофизики математико-
механического факультета*

Защита диссертации состоится «23» сентября 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: artenik@gmail.com

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/381070769/>.

Автореферат разослан «26» июля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Данная работа посвящена инновационной методике определения индивидуальной толщины диска линзовидных галактик, использующей только фотометрическое изображение для галактик, расположенных под произвольным углом к лучу зрения (положение не с ребра и не плашмя).

В работе представлено теоретическое обоснование предлагаемой методики, описание пошаговой работы программного кода, реализующего предложенный метод, проверка достоверности результатов расчетов с использованием программного кода на примере большой выборки модельных изображений, и последующей калибровкой вычисляемых относительных толщин дисков с помощью той же модельной выборки.

Описанный и разработанный в виде программного кода метод применен к двум представительным и достаточно полным выборкам линзовидных галактик Южного неба, находящимся в разреженном и плотном окружении. Изображения объектов были получены по нашей программе на роботизированной сети телескопов Las Cumbres Observatory в 2013 – 2018 годах. В результате работы были рассчитаны индивидуальные толщины 27 чисто экспоненциальных звездных дисков, а также 37 внутренних дисков галактик с кусочно-экспоненциальным профилем поверхностной яркости.

Полученная статистика толщин дисков хорошо согласуется с описанными в литературе средними значениями толщины всех галактических дисков ближней Вселенной, полученными статистическими методами по большим обзорам (в частности, по SDSS), а также с работами по изучению толщин дисков галактик, видимых строго с ребра. Обнаруженное в ходе работы влияние плотности окружения линзовидных галактик на их распределение по типу радиального профиля поверхностной яркости так же согласуется с литературой и подтверждает представительность выборки.

В результате нашего исследования мы обнаружили значимую связь толщины звездного диска у линзовидных галактик с плотностью их окружения, что позволяет выдвигать эволюционные гипотезы,

связывающие формирование дисков линзовидных галактик с внешним динамическим воздействием.

Актуальность работы

До последнего времени считалось, что определить индивидуальную толщину звездного диска галактики в произвольной ориентации невозможно. Существуют статистические оценки, позволяющие оценить среднюю толщину звездных дисков всех галактик ближней Вселенной, базируясь на наблюдаемом распределении видимой эллиптичности изофот представительной выборки галактик и в предположении о равновероятном распределении направлений осей симметрии всех галактик в пространстве. Впервые такие оценки делал Хаббл, его результаты постоянно уточняются на все больших и больших выборках галактик, но в результате средняя относительная толщина звездных дисков снова и снова получается не слишком удаленной от значения 0,2. Это дает возможность повсеместно использовать предположение бесконечно тонкого диска при анализе радиальной структуры изображений галактик.

Несмотря на то, что основная масса звездных дисков действительно являются достаточно тонкими, выборки галактик, расположенных строго ребром (начиная с нашей Галактики), снова и снова показывают, что некоторая часть галактик содержит относительно толстые диски. И поскольку толстые и тонкие диски имеют различные динамические механизмы формирования, то отсутствие информации о толщине диска существенно искажает результаты анализа эволюции индивидуальных галактик в общем случае произвольной ориентации в пространстве: всегда сохраняется небольшая, но вероятность, что звездный диск любой галактики на самом деле сравнительно толстый, и тогда эволюционные гипотезы требуют существенной корректировки.

Кроме того, построению полноценных моделей трехмерной структуры существенно мешает принципиальная невозможность наблюдать у каждой конкретной галактики достаточно точные радиальные и вертикальные профили из-за эффектов проекции. У галактик с произвольным наклоном диска мы можем детально изучать

радиальный профиль поверхностной яркости, но вынуждены довольствоваться предположением о бесконечно тонком диске, а у галактик, видимых с ребра, мы можем достаточно подробно изучать вертикальную структуру диска, но данные о радиальном профиле и особенностях структуры (спиральных рукавах, кольцах и др.) очень скудны и недостаточно точны.

Возможность измерить толщину звездного диска у галактик в произвольной ориентации открывает широчайшие возможности для дальнейших исследований. Во-первых, возможность выявления псевдобалджей – сфероидальных звездных структур с экспоненциальными радиальными профилями яркости - позволяет уточнять классификацию дисковых галактик по типу профиля: иногда кусочно-экспоненциальные по результату анализа фотометрии звездные диски могут оказаться на самом деле чисто экспоненциальными, а чисто экспоненциальные диски иногда оказываются в действительности эллиптическими галактиками.

Во-вторых, данные о толщинах звездных дисков с хорошо наблюдаемой морфологией (структурой в плоскости вращения галактики) предоставляют практически безграничные возможности исследования толщины звездных дисков в зависимости от типа профиля, наличия любых структур в диске (бары, кольца, спирали), окружения – чего угодно.

Таким образом, метод, описанный в данной работе, представляет широчайшие возможности для уточнения и улучшения индивидуальных эволюционных сценариев для дисковых галактик.

Цели и задачи работы

Объект и предмет исследования данной работы - звездные диски галактик ранних типов. Основная цель работы состоит в разработке, проверке и применении к наблюдательным данным предложенного метода определения относительной толщины звездного диска линзовидной галактики, используя его двумерное фотометрическое изображение.

Научной задачей данной работы является изучение влияния плотности окружения на эволюционные механизмы линзовидных галактик.

Для этого решаются следующие задачи:

- Теоретическое обоснование предложенной методики определения истинного угла наклона звездного диска линзовидной галактики к лучу зрения. Разработка методики вычисления толщины звездного диска, используя истинный угол наклона.
- Создание и отладка программного кода, реализующего описанную методику применительно к реальным наблюдательным данным.
- Проверка результата определения истинного угла наклона галактики путем применения разработанного кода к выборке изображений 1000 модельных галактик.
- Калибровка вычисляемой относительной толщины диска линзовидной галактики для выбранного закона вертикального распределения объемной яркости.
- Составление и фотометрическое наблюдение двух выборок линзовидных галактик Южного неба в различном окружении.
- Применение откалиброванного программного кода к полученным изображениям линзовидных галактик в разном окружении.
- Анализ полученных результатов, подтверждение известных ранее закономерностей, выявление новых эволюционных гипотез на базе полученных новых данных.

Методология и методы исследования

Теоретико-методологической базой диссертации являются работы зарубежных и российских авторов, посвященные исследованию морфологии галактик ранних типов, а также построению эволюционных гипотез по результатам анализа морфологических особенностей.

Для решения поставленных задач были использованы общенаучные (анализ, формализация, идеализация, индукция, дедукция) и специальные (программирование в среде Matlab, методы математического анализа, методы математической статистики) методы. Ряд методов был реализован в виде программного кода на языке Matlab.

Научная новизна

Следующие научные результаты получены впервые:

- Предложен авторский способ определения истинного угла наклона звездного диска к лучу зрения по двумерному фотометрическому изображению. Преимущество метода по сравнению с классическим анализом эллиптичности изофот состоит в том, что он лишен систематической ошибки, связанной со «скруглением» видимых изофот в случае звездных дисков, обладающих толщиной, которую нельзя считать пренебрежимо малой.
- Теоретически обоснован, реализован в виде программного кода и откалиброван с помощью выборки модельных изображений метод определения толщины дисковой галактики, расположенной в пространстве произвольно.
- Впервые определены индивидуальные толщины дисков 64 линзовидных галактик Южного неба. Ранее это считалось принципиально невозможным.
- Для ряда линзовидных галактик была обнаружена ошибка классификации по типу радиального профиля поверхностной яркости, связанная с экспоненциальным псевдобалджем.
- Выявлены первые закономерности связи распределения дисков линзовидных галактик по толщине в зависимости от типа профиля и плотности окружения.
- На основе полученных статистик по толщине звездных дисков линзовидных галактик было выдвинуто предположение о наличии динамического эволюционного механизма, приводящего к утолщению дисков, который действует для галактик в изоляции и не релевантен для галактик, находящихся в плотном окружении.

Достоверность научных результатов

Результаты работы являются обоснованными и достоверными, были опубликованы в рецензируемых журналах, а также докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Методика определения истинного угла наклона подтвердила свою состоятельность на большой выборке модельных изображений. С помощью этой же модельной выборки был подтвержден и откалиброван предложенный метод определения толщины звездного диска.

Полноту и показательность выборки подтверждает согласование распределения линзовидных галактик по типу радиального профиля поверхностной яркости с результатами, описанными в литературе.

Статистика полученных индивидуальных толщин дисков линзовидных галактик сходится с многократно подтвержденными в литературе средними значениями толщины дисковых галактик в ближней Вселенной. Распределение линзовидных галактик по толщине схоже со статистиками, полученными для выборок галактик, расположенных строго ребром к лучу зрения.

Теоретическая и практическая ценность

Научная ценность работы состоит в следующем:

- Предложенный метод определения истинного угла наклона дисковой галактики к картинной плоскости позволяет избежать систематических ошибок классического метода.
- Метод определения толщины звездного диска галактики дает возможность определить важнейший параметр звездного диска галактик, для которых ранее это считалось принципиально невозможным.
- С помощью описанных методов возможно в дальнейшем избежать ошибок классификации звездных дисков по типу профиля поверхностной яркости.
- Получены первые эволюционные гипотезы, базирующиеся на статистике распределения линзовидных галактик по толщине в зависимости от плотности окружения.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

- Азимутальное распределение экспоненциальной шкалы звездного диска галактики раннего типа определяется только углом наклона диска и не зависит от толщины диска и конкретного вида зависимости распределения яркости по вертикали. Предложенный подход к определению истинного угла наклона по распределению шкалы по азимуту лишен систематической ошибки для дисков не нулевой толщины.

- Метод, основанный на сопоставлении эллиптичностей изофоты и азимутального распределения экспоненциальной шкалы, позволяет определить толщину диска галактики, наблюдаемой не строго плашмя и не строго с ребра.
- В плотном окружении чисто экспоненциальные диски галактик с профилем I типа имеют среднюю относительную толщину $\langle q \rangle = 0,31 \pm 0,02$, внутренние диски кусочно-экспоненциальных галактик III типа имеют среднюю толщину $\langle q \rangle = 0,25 \pm 0,02$ (статистика рассчитана по результатам анализа 60 изображений линзовидных галактик Южного неба).
- Диски линзовидных галактик в изоляции в среднем толще, чем диски линзовидных галактик в скоплениях, что свидетельствует о существовании динамического механизма, приводящего к утолщению дисков галактик в изоляции, и не работающего в скоплениях.

Апробация работы

Приведем список всероссийских и международных конференций, на которых результаты работы были представлены в виде устных и стендовых докладов:

1. Толщина звёздных дисков в дисковых галактиках ранних типов. **Чудакова Е.М.**, Конференция "Галактики", г. Ессентуки, Россия, 2014 (устный)
2. The thickness of inner and outer stellar disks in early-type galaxies. **Ekaterina M. Chudakova**, The Periphery of Disks, г. Сидней, Австралия, 2014 (стендовый)
3. 3D-structure of galactic disks. **Ekaterina M. Chudakova**, Galaxies in 3D across the Universe, г. Вена, Австрия, 2014 (стендовый)
4. Толщина звёздных дисков в галактиках ранних типов. **Чудакова Е.М.**, XII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество» и приуроченная к нему научная конференция «Астрономия от ближнего космоса до космологических далей» (25 -30 мая 2015, ГАИШ, МГУ, Москва) (устный)

5. The Thickness Of Inner And Outer Stellar Disks In Early-Type Galaxies. **Ekaterina M. Chudakova**, EWASS 2015, European Week of Astronomy and Space Science, La Laguna, Tenerife, Canary Island, Испания, 22-26 июня 2015 (устный)
6. Толщина звёздных дисков в галактиках ранних типов. **Чудакова Е.М.**, Физика Космоса. 44международная студенческая научная конференция (2015г), Коуровская обсерватория УрФУ, 2015 (устный)
7. Толщина экспоненциальных дисков галактик: оценка истинного наклона к лучу зрения. **Чудакова Е.М.**, Физика Космоса. 45 международная студенческая научная конференция (2016г), Екатеринбург, Россия, 1-5 февраля 2016 (устный)
8. Features of disk structure of lenticular galaxies in clusters. **Ekaterina M. Chudakova**, EWASS-2016, Symposium 5 "How galaxies live and die", Афины, Греция, 4-8 июля 2016 (стендовый)
9. Толщины дисков линзовидных галактик скоплений южного неба. **Чудакова Е.М.**, Физика Космоса (Коуровка), Коуровская обсерватория, Екатеринбург, Россия, 30 января - 3 февраля 2017 (устный)
10. Структура линзовидных галактик в скоплениях. **Чудакова Е.М.**, Князев А.Ю., Сильченко О.К. Современная звездная астрономия-2017, Екатеринбург, Россия, 14-16 июня 2017 (устный)
11. Структура звездных дисков изолированных линзовидных галактик. Сильченко О.К., **Чудакова Е.М.**, Князев А.Ю. XIII съезд Международной общественной организации «Астрономическое общество» и приуроченная к нему Научная конференция "Астрономия - 2018", ГАИШ МГУ, Россия, 22-26 октября 2018 (устный)
12. Pseudobulges in the central part of piecewise exponential anti-truncated disks. **Ekaterina M. Chudakova**, EWASS 2019, Lyon, Франция, 24-28 июня 2019 (устный)

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных изданиях, 5 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus,

рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. **Чудакова Е.М.**, Сильченко О.К. «Толщина звездных дисков в галактиках ранних типов», *Астрономический журнал*, том 91, №5, стр. 343-352, 2014 (импакт-фактор: 1.164 по WoS)
2. Сильченко О.К., Князев А.Ю., **Чудакова Е.М.** «Структура звездных дисков южных S0-галактик в разреженном окружении», *Астрономический журнал*, том 93, № 1, стр. 81-95, 2016 (импакт-фактор: 1.164 по WoS)
3. Sil'chenko, Olga K.; Kniazev, Alexei Yu.; **Chudakova, Ekaterina M.** «The Structure of Large-scale Stellar Disks in Cluster Lenticular Galaxies», *The Astronomical Journal*, Volume 156, Number 3, p. 118-131, 2018 (импакт-фактор: 5.838 по WoS)
4. **Чудакова Е.М.** «Индивидуальные толщины звездных дисков галактик, видимых под произвольным углом», *Астрономический журнал*, том 96, №5 стр. 355–366, 2019 (импакт-фактор: 1.164 по WoS)
5. Sil'chenko, Olga K.; Kniazev, Alexei Yu.; **Chudakova, Ekaterina M.** «The Structure of Stellar Disks in Isolated Lenticular Galaxies», *The Astronomical Journal*, Volume 160, Number 2, p. 95-106, 2020 (импакт-фактор: 5.838 по WoS)

Личный вклад

Автором была предложена ключевая идея разбиения галактики на сектора, то есть построения профиля поверхностной яркости в зависимости от азимута. Предложенные методики были разработаны совместно на базе этой идеи. Программный код, реализующий предложенные методики был разработан и отлажен автором самостоятельно. Модельная выборка во избежание недостоверности проверки точности алгоритма была передана автору в виде «черного ящика». В работах 2, 3 и 5 автором производилась обработка наблюдательного материала, интерпретация проводилась совместно.

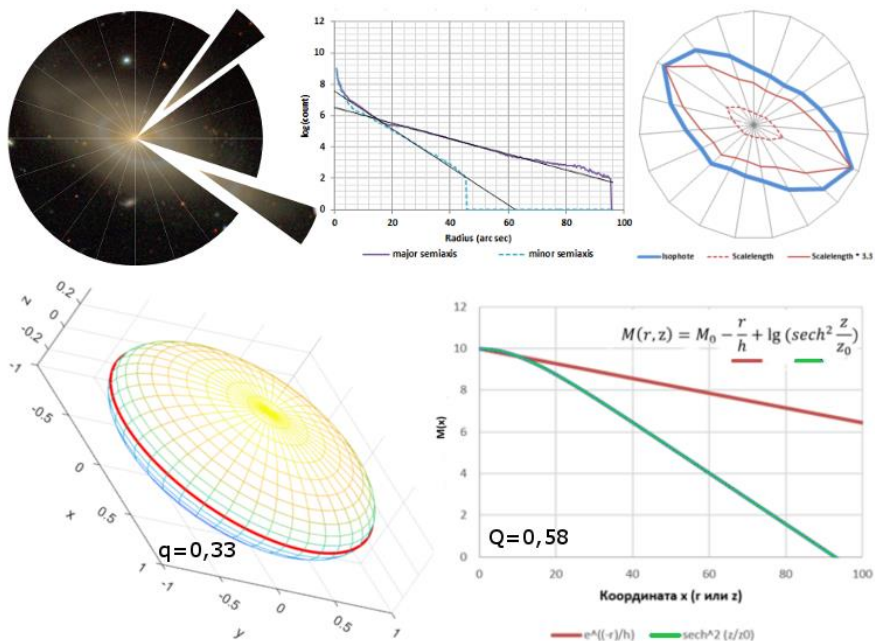


Рис. 1: Пошаговое применение алгоритма на примере изображения галактики NGC 5750, взятого из обзора SDSS. Сверху слева: изображение галактики, разделенное на 20 секторов. Сверху по центру: индивидуальные профили яркости выделенных секторов, соответствующих большой и малой полуоси с вписанными в них экспонентами. Сверху справа: приближение изофоты (синий цвет) и распределения шкалы по азимута (красный) по 20 дискретным точкам. Очевидно «скругление» изофоты относительно шкалы, свидетельствующее о ненулевой толщине диска. Снизу: иллюстрации к определенным толщинам диска. Снизу слева: толщина «по Хаббл» $q=0,33$ в смысле отношения полуосей эллипсоида. Красным отмечена экваториальная линия эллипсоида, которая соответствует идеально тонкому диску, наблюдаемому под тем же углом. Снизу справа: иллюстрация откалиброванной относительной толщины диска в смысле отношения шкал законов экспоненты по радиусу (красный цвет) и секанса квадратного по вертикали (зеленый цвет).

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (89 наименований) и приложения. Общий объем диссертации составляет 129 страницы, включая 26 рисунков и 11 таблиц.

Во **Введении** представлена актуальность темы, степень ее разработанности, цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В **Главе 1** представлен краткий обзор исследований, касающихся вертикальной структуры звездных дисков галактик за последние почти 100 лет, приведший научное сообщество к современному представлению о данной области знания.

В **Главе 2** детально разбирается теоретическое обоснование предложенных методик определения угла наклона экспоненциального диска галактики к лучу зрения и измерения его толщины по фотометрическому изображению; представлен пошаговый разбор схемы работы алгоритма обработки фотометрических изображений. Описана проверка и калибровка написанного программного кода с помощью большой выборки модельных изображений, благодаря которым результаты расчетов являются достоверными и сравнимыми с аналогичными результатами известными в литературе.

В **Главе 3** описывается выборка 60 линзовидных галактик скоплений Южного неба, изображения которых были получены с помощью сети телескопов LCO в 2015-2016 гг. Для 39 галактик выборки удалось определить относительную толщину диска. Диски чисто экспоненциальных галактик с профилем I типа по классификации Похлена и др. [1] продемонстрировали достаточно компактное распределение по толщине со средним значением $\langle q \rangle = 0,31 \pm 0,02$. Среди внутренних дисков III типа по классификации Похлена и др. [1] было выявлено 7 псевдобалджей – сфероидов с относительной толщиной по Хабблу [2], то есть отношением осей сфероида, в диапазоне от 0,5 до 0,7. Экспоненциальный профиль таких псевдобалджей приводит к ошибочной классификации галактики как двухъярусной III типа, хотя в действительности она

обладает только одним диском и на самом деле относится к чисто экспоненциальному I-му типу. Истинные внутренние диски III типа имеют среднюю толщину $\langle q \rangle = 0,25 \pm 0,02$, то есть несколько тоньше чисто экспоненциальных дисков, что повторяет наши результаты 2014 года.

В Главе 4 описывается выборка 46 изолированных галактик Южного неба, изображения для которых так же были получены на телескопах роботизированной сети LCO. Сравнивается распределение дисков галактик по типу профиля поверхностной яркости между выборками линзовидных галактик в окружении разной плоскости, а также со значениями из литературы. Обрезанные профили II типа практически отсутствуют в скоплениях, доля двухярусных профилей III типа составляет 50% вне зависимости от плотности окружения. Это полностью согласуется с данными литературы [3]. Распределение дисков изолированных галактик I типа по толщине выглядит несколько шире, чем для галактик скоплений, но размер выборки делает этот результат статистически незначимым. Внутренние диски галактик III типа не имеют настолько яркой бимодальной структуры распределения по толщине, как это получалось для галактик скоплений. Несмотря на появление вторичного пика распределения на уровне средней толщины истинных дисков III типа у линзовидных галактик в скоплениях, распределение толщин внутренних дисков IIIго типа у изолированных линзовидных галактик сильно смещено в сторону толстых дисков, основной пик распределения приходится на относительную толщину 0,5. Отсюда мы делаем вывод о наличии динамического механизма, приводящего к утолщению дисков изолированных галактик, который не действует в отношении галактик скоплений.

Основные выводы

Работа предлагает новый метод определения толщины звездного диска галактик ранних типов по двумерному фотометрическому изображению галактики, расположенной произвольно к лучу зрения (то есть не строго с ребра и не строго плашмя). Методика базируется на определении истинного угла наклона экспоненциального диска галактики по распределению шкалы экспоненциального закона по

азимуту, что дает ряд преимуществ относительно классического определения угла наклона диска из эллиптичности изофот. С одной стороны, методика не имеет систематической ошибки, связанной с занижением угла наклона для дисков не нулевой толщины, связанной с эффектом проекции. С другой стороны, сопоставление истинного угла наклона галактики, определенного нашим методом, с эллиптичностью изофот позволяет восстановить индивидуальную толщину диска галактики, наблюдаемой под произвольным углом, что ранее считалось невозможным.

Определение относительной толщины экспоненциального диска базируется на простейших геометрических рассуждениях Хаббла (1926) [2] о том, как расположенные произвольным образом эллипсоиды в среднем выглядят круглее в картинной плоскости, чем являются на самом деле благодаря эффекту проекции. Подстановка в простейшие геометрические формулы, характеризующие эффект проекции на картинную плоскость, угла наклона, определяемого описанным выше способом по распределению экспоненциальной шкалы по азимуту, позволяет нам определить относительную толщину для экспоненциального диска «в терминах Хаббла». То есть как меру сплюснутости эллипсоида.

Наш метод работает для любого плоскопараллельного экспоненциального диска и не зависит от конкретного закона распределения яркости по вертикальной оси диска, достаточно того, чтобы это распределение не зависело от радиуса. И позволяет определить меру сплюснутости эллипсоида для плоскопараллельного диска. Авторы отдают себе отчет в некоторой парадоксальности такого подхода, и устраняют эту точку вероятного недопонимания последующей калибровкой методики.

Методика определения угла наклона галактики была проверена, а восстановление относительной толщины откалибровано с помощью большой выборки изображений модельных галактик, которые были сгенерированы с произвольным углом наклона и отношением шкал в законах распределения яркости по вертикали и радиусу. Для генерации модельных изображений нам пришлось выбрать конкретный вид закона распределения пространственной яркости в диске вдоль вертикальной оси. Для этого для модельных изображений был выбран закон sech^2 , который теоретически предсказывается в

предположении изотермического диска, и неплохо подтверждается наблюдениями дисков, расположенных строго ребром. По радиусу при моделировании закладывался экспоненциальный закон.

Применение методики к 1000 изображений смоделированных галактик с произвольным распределением по относительной толщине (в смысле соотношения шкал законов, заложенных по вертикали и радиусу) и углу наклона плоскости диска позволило нам сделать две вещи. Во-первых, мы подтвердили работоспособность и преимущество нашей методики определения угла наклона плоскости диска галактики, а также ее неоспоримое преимущество относительно классических фотометрических методик. Во-вторых, с помощью калибровочной поверхности, объединяющей точки (Q, q, incl), где Q – заложенная в модель относительная толщина диска галактики в смысле соотношения шкал закона sech^2 по вертикали и Exp по радиусу, q – относительная толщина эллипсоида по Хабблу (то есть соотношение осей проецируемого на картинную плоскость эллипсоида), изначально получаемая нашим методом в предположении универсального плоскопараллельного диска, мы смогли прокалибровать наш метод, а также определить модельные ограничения. Итак, для галактик, наблюдаемых в интервале углов от 10° до 75° , а так же с толщиной в q смысле эллиптичности диска более 0,01, и относительной толщиной диска в смысле соотношения шкал менее 0,7 – наш метод с добавлением калибровки позволяет нам определить истинный угол наклона диска к лучу зрения, а так же две толщины – Хаббловскую, означающую меру сплюснутости эллипсоида, объединяющего все точки равной пространственной яркости в пространстве галактики, и относительную толщину с точки зрения изотермического закона sech^2 . Выбор изотермического закона распределения пространственной яркости вдоль оси симметрии галактики и калибровка на относительную толщину именно в смысле отношения шкал sech^2 и exp позволяет нам сравнивать наши результаты со статистиками толщин дисков, наблюдаемых строго с ребра.

Откалиброванная методика применялась к выборкам линзовидных галактик Южного неба в различной плотности окружения. Выбор линзовидных галактик обусловлен отсутствием в них пыли. Изображения галактик были получены с помощью роботизированной

сети телескопов LCO. После применения нашего метода к 105 изображениям линзовидных галактик нам удалось определить индивидуальные толщины 39 линзовидных галактик скоплений и 25 изолированной галактики, что позволило разбивать их на подвыборки по типу радиального профиля.

Для галактик скоплений чисто экспоненциальные диски I типа показали компактное распределение по толщине со средним значением толщины $\langle q \rangle = 0,31 \pm 0,02$. Вычисленная нами толщина в Хаббловском понимании означает меру сплюснутости эллипсоида, и хорошо согласуется со статистикой по ближней Вселенной [4], и с моделью тонкого диска. Среди внутренних дисков III типа галактик скоплений распределение дисков по толщинам оказалось бимодальным. Первый пик распределения расположен на толщинах даже чуть меньших, чем толщины чисто экспоненциальных дисков. Второй же пик расположен на уровне $q=0,6$, что в Хаббловском понимании говорит уже не о диске, а об эллипсоиде E6. Мы утверждаем, что этот второй пик составляют 7 галактик, у которых визуальный анализ дает ошибку классификации: «диски» с толщиной $q=0,6$ – на самом деле это экспоненциальные псевдобалжи – эллипсоиды, которые из-за экспоненциального профиля вводят нас в заблуждение и заставляют чисто экспоненциальные диски с большим и экспоненциальным псевдобалжем ошибочно классифицировать как двухъярусные кусочно-экспоненциальные диски III типа. При исключении этих псевдобалжей из выборки мы получаем среднюю Хаббловскую толщину для внутренних дисков двухъярусных кусочно-экспоненциальных дисков III типа $\langle q \rangle = 0,25 \pm 0,02$, то есть даже немного тоньше, чем для чисто экспоненциальных дисков I типа.

Таким образом, еще одним преимуществом методики является возможность выявлять среди галактик, классифицированных кусочно-экспоненциальными II и III типа экспоненциальные объемные псевдобалжи, маскирующие чисто экспоненциальные диски I типа, распознанные неверно из-за дополнительного сфероида в структуре.

Выборка изолированных галактик сама по себе была меньше, а еще среди галактик из разреженного окружения оказалось существенно больше объектов с признаками недавнего взаимодействия типа малого мерджинга, которые усложняют применимость нашего метода, делая структуру диска менее однородной. Тем не менее, распределение

галактик в выборках в зависимости от окружения по типам хорошо согласуется с данными литературы [3] и подтверждает достаточную представительность наших выборок. Доля двухъярусных кусочно-экспоненциальных дисков III типа оказалась $50\% \pm 6\%$ в плотном окружении и $55\% \pm 8\%$ в изоляции, что согласуется с известными данными, что доля дисков III типа составляет примерно половину всего населения, и не зависит от плотности окружения. Доля галактик с единственным экспоненциальным диском же значительно зависит от окружения: в наших выборках она составила $28\% \pm 7\%$ для галактик в разреженном окружении, и $45\% \pm 6\%$ для плотного окружения. Этот факт также хорошо согласуется с литературой. Всю «нехватку» чисто экспоненциальных профилей среди изолированных галактик восполняют обрезанные диски II типа, практически отсутствующие в скоплениях.

Недостаточность выборок изолированных галактик, к которым удалось применить нашу методику делает невозможным сравнение толщин дисков разных типов в различном окружении. Вид распределений позволяет предположить, что изолированные диски вне зависимости от типа профиля должны иметь тенденцию к утолщению, но оценить степень утолщения пока невозможно. В целом этот результат хорошо согласуется с представлением о наличии в разреженном окружении динамических механизмов – малых мерджингов, поглощения спутников, которые разогревают диски изолированных галактик, и гравитационных приливов от близких пролетов спутников, которые приводят к увеличению доли барных галактик.

Список литературы

1. Pohlen M., Trujillo I., *Astron. Astrophys. Vol. 454, № 3. P. 759–772. (2006).*
2. Hubble E.P., *Astrophys. J. Vol. 64. P. 321. (1926).*
3. Erwin P., Gutiérrez L., Beckman J.E., *Astrophys. J. Lett. Vol. 744, № 1. P. 4–9. (2011).*
4. Rodríguez S., Padilla N.D., *Mon. Not. R. Astron. Soc. Vol. 434, № 3. P. 2153–2166. (2013).*