

УДК 524.7-33

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ТОЛЩИНЫ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ ГАЛАКТИК, ВИДИМЫХ ПОД ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛОМ

© 2019 г. Е. М. Чудакова\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 23.09.2018 г.; после доработки 13.12.2018 г.; принята к публикации 17.12.2018 г.

В работе предложен и обоснован метод определения толщины звездного диска галактики по фотометрическому изображению в картинной плоскости. Метод применим для определения толщин плоскопараллельных экспоненциальных дисков с произвольным, но не зависимым от радиуса законом распределения светимости перпендикулярно плоскости диска  $J(r, z) = \exp(-r/h)f(z)$ . Особенностью и преимуществом метода является то, что он позволяет находить толщины дисков, видимых под произвольными углами к картинной плоскости (но не строго с ребра и не строго плашмя). Ключевая идея метода такова: для галактик, видимых под произвольным углом, мы предлагаем находить истинное значение угла наклона между осью симметрии и углом зрения не по изофотам, а по распределению экспоненциального параметра  $h$  по азимуту. Различие угла наклона, определенного традиционно по изофотам, и истинного угла дает нам возможность оценить толщину диска. Работоспособность методики определения угла наклона для плоскопараллельных дисков подтверждена на выборке модельных изотермических дисков галактик:  $I(r, z) = I_0 \exp(-r/h) \operatorname{sech}^2(z/z_0)$ . Углы наклона плоскости модельных галактик к лучу зрения и относительная толщина в модельной выборке варьируются произвольно и позволяют определить границы применимости метода:  $z_0/h < 0.7$ ;  $10^\circ < i < 75^\circ$ . Для иллюстрации применения методики к наблюдательным данным используется выборка 44 кусочно-экспоненциальных дисков галактик скоплений южного неба. Сравнивая распределение объектов по наклонениям, вычисленных нашим методом и традиционно по изофотам, мы видим, что наш метод, как и ожидалось, дает более равномерное распределение галактик выборки по углу наклона к картинной плоскости. Полученные средние значения толщин и распределение дисков по толщинам согласуются со статистическими оценками и наблюдательными данными из литературы для выборок галактик, видимых с ребра.

DOI: 10.1134/S0004629919050025

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Структура звездных дисков галактик — одна из самых интересных и давно решаемых проблем внегалактической астрономии. В первом приближении можно считать диски плоскими, то есть имеющими только два измерения; однако такой подход с самого начала выглядел слишком грубым. Диски действительно отличаются от сфероидов — балджей и эллиптических галактик — тем, что их толщина намного меньше радиуса. Тем не менее эта толщина вполне конечна, измеряема и во многих случаях по порядку величины сравнима с радиусом.

Существуют различные физические механизмы разогрева звездного диска, как внешние — пролеты (flyby) [1], малые мерджинги [2], — так и внутренние — разогрев на гигантских молекулярных облаках [3], барах и спиральных [4]. Разогрев диска

неминуемо приводит к утолщению диска. Поэтому исследование толщин звездных дисков (не только видимых с ребра) несомненно является важным компонентом в построении динамически самосогласованной картины эволюции дисковых галактик.

Ситуация осложняется тем, что мы наблюдаем галактики только в проекции на небесную сферу, причем наблюдаем распределение поверхностной яркости, которая есть интеграл объемной плотности потока вдоль луча зрения. Восстановление объемной структуры диска галактики — сложная некорректная математическая задача, в общем случае нерешаемая; для подхода к ее решению необходимы априорные предположения, обоснованные физически и/или наблюдательно. В данной работе мы предлагаем метод определения толщин таких звездных дисков, в которых радиальное распределение поверхностной яркости подчиняется экспоненциальному закону. Об универсальности

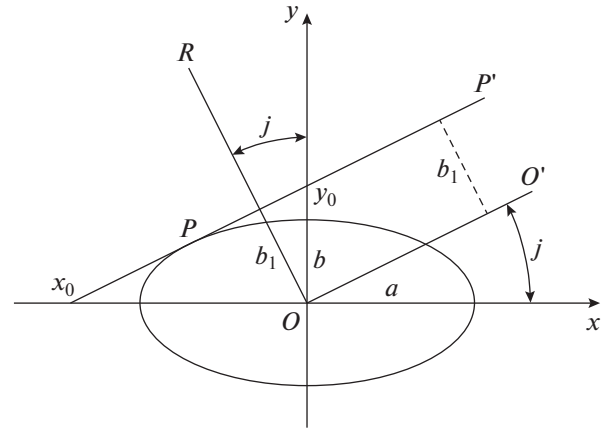
\*E-mail: artenik@gmail.com

экспоненциального закона распределения поверхностной яркости в дисковых галактиках впервые сообщил Фриман [5]; позднее, с повышением точности и глубины поверхностной фотометрии галактик, выяснилось, что диски спиральных и линзовидных галактик чаще всего содержат два экспоненциальных участка с разными радиальными шкалами, то есть в общем случае диски галактик кусочно-экспоненциальны [6, 7]. Тем не менее в фиксированных пределах по радиусу в распределение поверхностной яркости диска всегда можно вписать радиальный экспоненциальный закон с фиксированной шкалой, и этот наблюдательный факт мы используем при обосновании нашего метода. Наш метод может быть применен к индивидуальным объектам с углом наклона плоскости диска к лучу зрения в пределах  $10^\circ < i < 75^\circ$  (кроме строго плашмя и строго с ребра), в отличие от всех предыдущих подходов к этой задаче. Ранее либо рассматривались диски, видимые строго с ребра, что позволяло напрямую измерять их толщину, но лишало возможности анализировать распределение яркости по азимуту в плоскости диска. Либо, при варьировании угла наклона дисков к лучу зрения, для оценки их средней толщины применялся статистический подход к большим выборкам галактик в предположении их случайной ориентации в пространстве.

## 2. ПОДХОДЫ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОЛЩИНЫ ЗВЕЗДНЫХ ДИСКОВ

### 2.1. Анализ проекций эллипсоидов Эдвином Хабблом

Хаббл [8] рассматривал сплюснутый сфероид с осями  $a - b - a$  ( $b < a$ ), причем ось  $Y$ , вдоль которой сфероид сплюснут, наклонена на угол  $i$  по отношению к картинной плоскости. Как будет выглядеть изображение такого сфероида в картинной плоскости в зависимости от сплюснутости  $\frac{b}{a}$  при фиксированном угле  $i$ ? Понятно, что для бесконечно тонкого диска ( $\frac{b}{a} \rightarrow 0$ ) изображением диска в картинной плоскости будет эллипс с отношением осей изображения  $\sin j = \cos i$  (Хаббл работает с углом между лучом зрения и плоскостью диска, то есть  $j = \frac{\pi}{2} - i$ ). По рис. 1 видно, что при увеличении толщины  $\frac{b}{a}$  при фиксированном  $i$  наблюдаемая малая ось изображения будет расти (и в другом крайнем случае при  $\frac{b}{a} \rightarrow 1$  изображение будет просто круглым и не будет зависеть от угла наклона оси).



**Рис. 1.** Иллюстрация из статьи Хаббла 1926 г.: эллипсоид с осями  $a - b - a$  ( $b < a$ ),  $OO'$  — луч зрения,  $i$  — угол между осью  $OY$  (вдоль которой сплюснут эллипсоид) и картинной плоскостью. Луч  $PP'$  параллелен лучу зрения  $OO'$  и касается эллипсоида. Расстояние между лучами  $OO'$  и  $PP'$  —  $b_1$  — это малая ось изображения эллипса в картинной плоскости.

Хаббл из чисто геометрических соображений нашел следующее соотношение между косинусом угла наклона оси  $Y$  (оси вращения галактики) к плоскости неба, большой полуосью эллипсоида  $a$ , малой полуосью  $b$  и проекцией малой полуоси на картинную плоскость  $b_1$ :

$$\cos^2 j = \sin^2 i = \frac{1 - (1 - e_1)^2}{1 - (1 - e)^2}, \quad (1)$$

$$\text{где } e = 1 - \frac{b}{a}, \quad e_1 = 1 - \frac{b_1}{a}.$$

Данные рассуждения объясняют, почему наблюдаемая статистика распределения изображений эллиптических галактик по типам оказывается смещена в сторону более круглых изображений. В выборке Хаббла в статье 1926 г. [8] распределение эллиптических галактик по типам имело плавный характер, и галактик Е0 было почти в 4 раза больше, чем Е7. Рассуждения о влиянии угла зрения на видимую сплюснутость изображения показывают, что реальное распределение эллипсоидов по степени сплюснутости может иметь существенно другой вид.

### 2.2. Диски

Если вернуться к дисковым галактикам, то ненулевая толщина круглого в плоскости диска очень трудно поддается исследованию, хотя и вносит ощутимый вклад в эллиптичности спроецированного на картинную плоскость изображения диска. Прямые наблюдения толщин дисков возможны только для дисков, видимых строго с ребра. Для произвольно ориентированных дисков

так же, как для E-типа у Хаббла, ненулевые толщину дают аналогичное смещение наблюдаемых эллиптичностей изображений дисков в сторону их округления. Современные исследования толщин дисков делятся на два основных типа: на статистический анализ средней сплюснутости большой выборки наблюдаемых изображений [9, 10] и на прямые наблюдения толщин индивидуальных дисков, видимых с ребра [11, 12].

**2.2.1. Статистический подход.** После Хаббла, используя все большие и большие выборки объектов, снова и снова предпринимаются попытки восстановить настоящее распределение эллиптических галактик по их формам, а также дисковых по толщинам, из предположения равномерного распределения галактик по углам наклона к углу зрения с учетом эффектов проекции, описанных Хабблом. Особенно удобно проводить такие исследования на базе все более подробных обзоров, которые помогают собрать равномерно полную выборку галактик поля.

Так, например, на каталоге Reference Catalogue of Bright Galaxies [13] базируется работа [14], показывающая на примере выборки из 254 спиральных галактик, что средняя относительная толщина дисков спиральных галактик равна 0.25 (под относительной толщиной понимается отношение толщины диска к его радиусу) в терминах Хаббла.

Из более поздних исследований следует отметить работы [9] и [10]. Они базируются на данных SDSS, поэтому выборки содержат десятки тысяч галактик. В этих работах авторы моделируют трехосные эллипсоиды, углы наклона осей которых произвольно направлены по отношению к картинной плоскости, проецируют их на картинную плоскость и восстанавливают распределение параметров эллипсоидов по наблюдаемым распределениям осей изображений из выборки. Большое внимание в модели уделяется учету пыли. В обеих статьях полная выборка делится на эллиптические и спиральные галактики — универсальность модели позволяет успешно применять метод и для дисков, и для эллипсоидов. Огромные выборки позволяют применять метод к различным подвыборкам с разнообразными параметрами. В итоге ключевое значение  $b/a$  (отношение наименьшей полуоси трехосного эллипсоида к наибольшей) для спиральных галактик в этом методе для различных срезов оказывается  $b/a = 0.2–0.38$ .

Основной недостаток статистического подхода исследования трехмерной структуры галактик состоит в том, что он не дает индивидуальных результатов. Средняя толщина дисков около 0.2 почти всегда позволяет при детальном индивидуальном изучении морфологии использовать модели бесконечно тонких дисков. Тем не менее для заметной доли дисков модель бесконечного тонкого диска

подходит недостаточно хорошо, и статистические исследования никак не могут помочь определить такие толстые диски у отдельных галактик.

Еще один существенный недостаток статистических методов в том, что сегодня они применяются и работают для огромных выборок галактик, поэтому подвыборки для сравнения могут подбираться только по параметрам, легко определяемым автоматически: яркости, цвету. Даже для деления на эллиптические и спиральные галактики приходится использовать ручную разметку Galaxy Zoo, потому что автоматические методы определения морфологического типа оказываются недостаточно точными. Поэтому невозможно, например, сравнивать таким способом толщины дисков разных типов: пока нет 100 000 размеченных выборок дисков разных типов, статистические методы ничем не могут помочь в такой задаче.

**2.2.2. Наблюдения галактик, видимых с ребра.** Вопрос о вертикальной структуре диска перпендикулярно экваториальной плоскости встал сразу после того, как появилось понимание структуры дисковых галактик в плоскости диска. Вокулер в 1958 г. [15] предложил использовать для моделирования балджей в центре спиральных галактик закон Вокулера ( $R^{1/4}$ ), предложенный им на 10 лет раньше для эллиптических галактик [16]. В 1968 г. Серсик обобщил закон Вокулера и предложил закон Серсика ( $R^{1/n}$ ) [17], который еще лучше подходит для балджей. Следом за ним Фриман в 1970 г. [14] продемонстрировал экспоненциальный профиль поверхностной яркости диска. Все три закона были предложены чисто эмпирически, без однозначного обоснования физической природы этих распределений. Тем не менее экспоненциальный диск с балджем по Серсику — сейчас общепринятая, работающая уже 40 лет базовая модель для дисковой галактики.

Почти сразу начались попытки дополнить эту модель и таким образом обосновать наблюдаемые отличия наблюдательных данных от модели. В 1981 г. Ван дер Круит [18] предложил учесть вертикальную структуру диска для объяснения небольших, но заметных отклонений изображений от экспоненциально-вокулеровской модели. На базе нескольких изображений галактик, видимых наблюдателю строго с ребра, Ван дер Круит нашел, что характерная толщина звездного диска не меняется вдоль радиуса и предложил изотермическую по  $z$  модель, основанную на предположении о гидростатическом равновесии звезд в поле собственной гравитации и сохраняющую экспоненциальный закон в зависимости от радиуса. В этом предположении получается следующий закон распределения поверхностной яркости диска:  $I(r, z) = I_0 e^{-\frac{r}{h}} \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)$ . Проверялся этот закон на

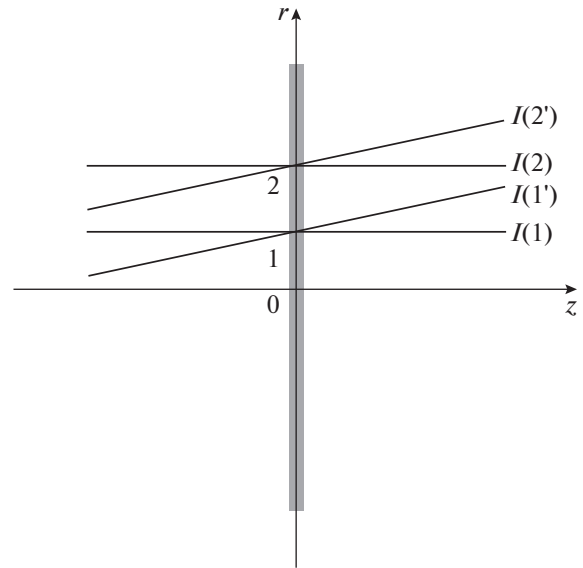
дисках, видимых с ребра. Для этого поверхностную плотность необходимо проинтегрировать по лучу зрения, идущему вдоль плоскости диска:  $I(r, z) = \frac{r}{h} K_1\left(\frac{r}{h}\right) \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)$ , где  $K_1$  — функция Бесселя первого порядка. Такое распределение действительно хорошо моделирует изображения дисков, видимых с ребра, а основными преимуществами этой модели являются ее изотермическое физическое обоснование и независимость распределения по оси  $z$  от координаты  $r$ .

Примером более поздней работы по исследованию дисков с ребра может служить работа Мосенкова, Сотниковой и Решетникова [11]. В ней исследовалась структура 175 галактик, видимых строго с ребра, изображения которых в трех фильтрах брались из обзора 2MASS. Декомпозиция изображений на балдж и диск производилась с помощью программы BUDDA (Bulge/Disc Decomposition Analysis), в которую заложены балдж по Серсику и экспоненциальный диск с толщиной  $\operatorname{sech}^2$  по Ван дер Круиту. Статистика по почти 200 галактикам позволяет авторам изучать различия морфологии галактик в зависимости от индекса Серсика, находить корреляции между, например, радиусом балджа и шкалой экспоненциального диска. Но для нас интереснее всего их результат, что средняя толщина дисков  $z_0/h = 0.29-0.31$  в зависимости от полосы пропускания (JHK). В следующей работе Мосенкова и др. [12] на большей выборке было показано, что средняя толщина диска не зависит от морфологического типа спиральной галактики.

### 2.3. Наш метод

Мы предлагаем новый метод, позволяющий определить индивидуальную толщину диска галактики, расположенной под произвольным углом к картинной плоскости, используя только двумерное оптическое изображение галактики. Метод имеет ряд модельных ограничений и не работает для галактик, видимых строго с ребра и строго плашмя, тем не менее, даже для кусочно-экспоненциальных дисков он позволяет определять толщины каждого сегмента.

Модельные ограничения на объемную светимость накладываются самые минимальные. Зависимость светимости от радиуса в плоскости диска должна быть экспоненциальной (по Фриману [5]). Относительно зависимости светимости от координаты  $z$  вдоль оси вращения мы используем результат Ван дер Круита о том, что эта зависимость постоянна и не зависит от радиуса. Мы хотим сделать наш метод максимально универсальным, поэтому большую часть вычислений проводим в общем случае, не задавая явно вид зависимости



**Рис. 2.** Модель плоско-параллельного диска в изображении с ребра. Ось  $z$  совпадает с осью вращения диска. Сравниваются яркости изображений точек 1 и 2 для различных углов зрения:  $I(1)$  и  $I(2)$  — яркости точек при наблюдении вдоль оси вращения, а  $I(1')$  и  $I(2')$  — при наблюдении под углом к оси вращения.

от  $z$ . На финальном этапе мы калибруем результаты, используя заданную функцию зависимости от  $z$ . В данной работе используется предложенный Ван дер Круитом изотермический закон  $\operatorname{sech}^2$ , но в принципе по необходимости можно реализовать метод с любой другой зависимостью от  $z$ .

Ключевая идея метода состоит в том, чтобы определять угол наклона диска галактики к картинной плоскости не по эллиптичности изофоты, а по распределению экспоненциальной шкалы по азимуту. Ненулевая толщина диска делает изофоту более круглой и делает определение угла наклона галактики по изофотам неточным. Анализ азимутального распределения экспоненциальной шкалы, используемой как стандартная линейка, позволяет точнее определить угол наклона диска, а сопоставление с эллиптичностью наблюдаемой изофоты позволяет оценить толщину диска галактики.

В данной работе мы представляем детальный разбор методики с выводом и обоснованием ключевой формулы и для наглядности показываем механизм метода на примере галактики NGC5750 из обзора SDSS.

**2.3.1. Модельные предположения и угол наклона.** Рассмотрим плоско-параллельный осесимметричный диск конечной толщины с экспоненциальным (или кусочно-экспоненциальным) профилем яркости (рис. 2). Пусть толщина диска и зависимость объемной яркости от координаты  $z$  постоянны на всем протяжении диска. Иными словами, объемная яркость в каждой точке диска есть

произведение функции, зависящей от радиуса, и функции, зависящей от  $z$ :

$$J(r, z) = f_1(r) f_2(z) = J_0 e^{-\frac{r}{h}} f_2(z),$$

где функция  $f_2(z)$  — произвольная функция, не зависящая от радиуса и азимута ( $r$  и  $\varphi$ ).

Теперь рассмотрим две произвольные точки 1 и 2 в плоскости диска, лежащие на одной прямой с центром. Сравним яркости точек 1 и 2, видимые наблюдателю, который видит диск строго плашмя, то есть вдоль оси вращения диска, а также под произвольным углом зрения. Яркость точки 1 для наблюдателя — это интеграл функции объемной яркости  $J(r, z)$  по отрезку луча зрения внутри диска. Рассмотрим точки этих отрезков на равном расстоянии от плоскости диска. Для всех четырех точек яркость  $J(r, z_0) = J_0 e^{-\frac{r}{h}} f(z_0)$  имеет одинаковый множитель, зависящий от  $z$ . Множитель, зависящий от радиуса, будет отличаться, но отношение яркостей точки 1 и точки 2 в силу экспоненциальной зависимости от радиуса окажется постоянным и зависящим только от расстояния между точками:

$$\frac{J(1)}{J(2)} = e^{-\frac{r_{12}}{h}} = \frac{J(1')}{J(2')}.$$

Поскольку такое соотношение между яркостями будет сохраняться на всем отрезке интегрирования, то интегральные яркости точек  $I(1)$  и  $I(2)$  также будут строго пропорциональны с коэффициентом пропорциональности  $\frac{I(1)}{I(2)} = e^{-\frac{r_{12}}{h}}$ , причем независимо от угла зрения.

Именно это становится ключевой отправной точкой нашего метода: для плоско-параллельного экспоненциального диска отношение яркостей точек зависит только от разности расстояния до центра и не зависит ни от толщины, ни от угла наклона плоскости диска к картинной плоскости. От угла наклона зависит проекция расстояния между точками, поэтому мы предлагаем определять угол наклона диска к картинной плоскости именно по распределению наблюдаемой экспоненциальной шкалы по азимуту.

**2.3.2. Толщина по Хаббл.** Для бесконечно тонкого диска яркость точки не зависит от угла зрения, поэтому эллиптичность изофоты зависит только от наклона диска к картинной плоскости. Таким образом, для бесконечно тонкого диска угол наклона, вычисленный обычным способом по изофоте и нашим методом по шкале, будут совпадать. Поэтому следующий интересующий нас вопрос: как изменится форма изофоты для диска ненулевой толщины? Для ответа на этот вопрос мы возвращаемся к эллипсоидам из статьи Хаббла [8].

Как уже говорилось в разделе 2.1 и как можно видеть на рис. 1, в этой работе Хаббл рассматривал проекцию эллипсоида с полуосями  $a$  и  $b$  на картинную плоскость под произвольным углом  $i$ .

Из чисто геометрических соображений находится формула (1), выражающая связь между косинусом угла наклона оси вращения галактики к плоскости неба, большой полуосью эллипсоида, малой полуосью и проекцией малой полуоси на картинную плоскость. Если подставить в эту формулу угол наклона, определенный с помощью распределения экспоненциальной шкалы, и наблюдаемую эллиптичность изофот галактики, то можно узнать соотношение осей модельного эллипсоида  $b/a$ , которое в случае дисковых галактик можно считать модельной относительной толщиной диска  $q$ :

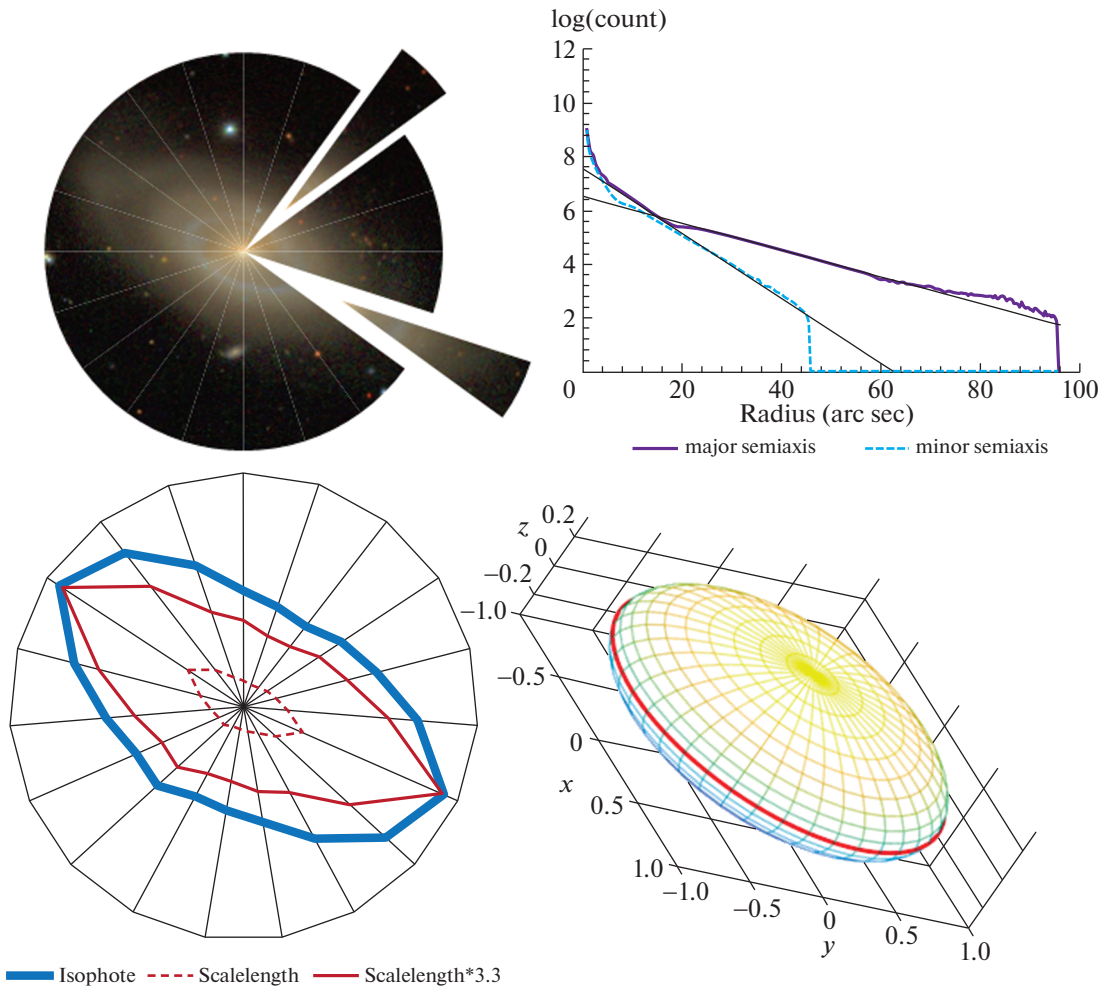
$$q = \sqrt{1 - \frac{2e_i - e_h^2}{2e_h - e_h^2}}, \quad (2)$$

где  $e_i$  — наблюдаемая эллиптичность изофоты, а  $e_h$  — эллиптичность распределения шкалы по азимуту, которая из-за эффекта проекции должна быть эллипсом с соотношением осей  $\cos i$ .

Важно отметить, что в построении этой формулы используются два конфликтующих предположения. Угол наклона мы восстанавливаем в предположении плоско-параллельного экспоненциального диска, а изначальная формула Хаббла строится для проекций эллипсоида с одинаковым типом закона распределения яркости по всем осям. Тем не менее мы считаем вполне корректным совмещать два подхода. Во-первых, для совсем тонких дисков оба предположения применимы в равной степени. Во-вторых, в плоско-параллельной модели никак не фиксирована конкретная зависимость пространственной светимости от  $z$ . Например, в случае экспоненциального закона по  $z$  вид диска будет и при большой толщине очень близок к эллипсоиду. В-третьих, специально для разрешения этого противоречия мы перед применением метода к реальным выборкам галактик откалибруем его на модельной сгенерированной выборке.

**2.3.3. NGC 5750.** Прежде чем переходить к описанию калибровки, покажем наглядно и поэтапно работу метода на примере изображения галактики NGC5750 из архива SDSS (рис. 3). Для реализации нашего метода мы пользуемся следующей последовательностью шагов обработки изображения галактики. Самый важный элемент обработки состоит в том, что мы разбиваем изображение галактики на сектора и строим индивидуальный профиль яркости для каждого сектора.

Мы берем изображение галактики, на котором маскированы детали, мешающие анализу диска: яркие звезды, кольца, спирали, дефекты. Разбиваем изображение на  $N$  равных секторов с центром в



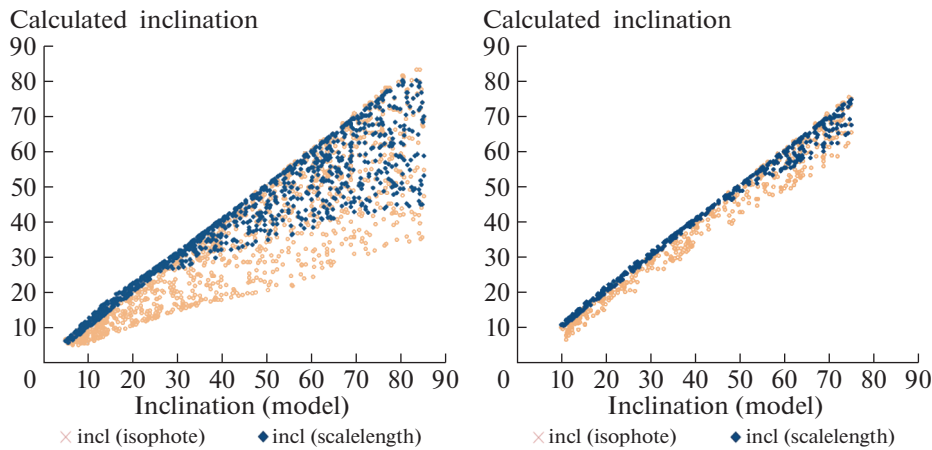
**Рис. 3.** Иллюстрация работы метода на примере NGC 5750 (угол наклона, определенный по изофотам тонкого диска  $57.5^\circ$ ; угол наклона, определенный по экспоненциальной шкале  $65^\circ$ ; толщина по Хаббл  $0.34$ ). Слева сверху: разделение изображения галактики на 20 секторов. Справа сверху: построение индивидуальных профилей яркости и вписывание экспоненты в каждый сектор на примере большой и малой полуосей. Слева снизу: приближение изофоты с помощью 20 точек, построение распределения экспоненциальной шкалы по азимуту по 20 точкам. Видно, что распределение изофот более округлое, чем распределение шкалы. Справа снизу: модель диска галактики в виде эллипсоида с полуосями  $(1, 1, 0.34)$ . Красной линией обозначена линия экватора эллипсоида. Можно видеть, как ненулевая толщина “округляет” изображение относительно изображения бесконечно тонкого диска, видимого под таким же углом.

центре галактики. Внутри каждого сектора находим среднюю яркость изображения вдоль дуг на разных расстояниях от центра галактики. Таким образом, мы получаем  $N$  профилей поверхностной яркости на разных азимутальных углах. Если задать некоторый уровень яркости  $I_0$  и в каждом профиле найти, на каком расстоянии от центра  $r_i$  средняя яркость равна  $I_0$  ( $I_i(r_i) = I_0$ , набор точек  $(r_i, \varphi_i)$  будет приближать изофоту на уровне  $I_0$ .

В нашей реализации мы фиксировали число секторов  $N = 20$ . Чем больше число секторов, тем больше точек для прослеживания эллипса азимутального распределения экспоненциальных масштабов получится. Но при этом чем меньше сектор, тем меньше пикселей исходного изображения попадает в каждый из них, и падает точность изме-

рения радиальных профилей яркости для каждого сектора. Таким образом, выбор числа секторов зависит от разрешения изображений и размеров дисков в пикселях. Мы используем в основном данные SDSS и LCOGT [19] с дискретизацией 0.4 секунды на пиксель; для этих обзоров деление изображений на 20 секторов дает хороший результат.

На примере NGC 5750 наглядно видно, как работает наш метод. Классическое определение угла наклона галактики по эллиптичности изофот релевантно для бесконечно тонких дисков. Красная экваториальная линия модельного эллипса показывает, каково бы было изображение данного диска, будь он действительно бесконечно тонким и как именно ненулевая толщина “округляет” наблюдаемое изображение.



**Рис. 4.** Модельная выборка: углы наклона, вычисленные разными способами: по форме изофот (светлые полые точки) и определенные предложенным способом по распределению шкалы (темные сплошные точки) в зависимости от заложенного в модель угла наклона. Слева: полная выборка, справа: только модельные галактики, не выходящие за границы применимости метода.

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА НА МОДЕЛЬНОЙ ВЫБОРКЕ

Итак, прежде чем применять новый метод к выборкам наблюдательных данных, мы создаем выборку модельных изображений галактик и применяем к ней наш метод, преследуя три основных цели: во-первых, подтвердить экспериментально работоспособность нашего метода определения угла наклона диска к картинной плоскости, во-вторых, найти границы применимости методики, в-третьих, сравнить заложенную в модель толщину диска, являющуюся вертикальной шкалой закона  $\text{sech}^2$ , с нашей “оценкой толщины по Хабблу”, то есть в предположении эллипсоида.

#### 3.1. Изотермический закон $\text{sech}^2(z)$

Теперь впервые нам нужно определиться с конкретным видом зависимости объемной яркости от вертикальной координаты,  $f(z)$ . В данной статье мы работаем с изотермическим законом  $\text{sech}^2(z)$ . Во-первых, он физически обоснован — это равновесное распределение звезд в поле собственной гравитации диска. Во-вторых, он широко применяется для анализа изображений дисков, видимых строго с ребра. Поэтому работа с ним позволяет сравнивать наши результаты с прямыми литературными данными по фотометрическим наблюдениям дисковых галактик, видимых с ребра. В принципе, при необходимости описанную ниже калибровку можно проделать с любым другим заданным видом функции  $f(z)$ .

Итак, мы зафиксировали закон распределения объемной яркости:

$$J(r, z_0) = J_0 e^{-\frac{r}{h}} \text{sech}^2 \frac{z}{z_0}.$$

Тогда относительной толщиной диска станет отношение масштабных коэффициентов в законе секанса квадратного по оси  $z$  и в экспоненциальном законе по радиусу:  $Q = z_0/h$ .

Следующим шагом мы создали выборку из 1000 изображений модельных галактик, объемная светимость звездного диска которых подчиняется закону  $J(r, z) = J_0 e^{-\frac{r}{h}} \text{sech}^2 \frac{z}{z_0}$  с постоянной (для простоты) для всей выборки экспоненциальной шкалой  $h$  и случайно выбранным для каждого объекта отношением  $0 < z_0/h < 1.2$ . Угол наклона диска к картинной плоскости по выборке изменяется от  $5^\circ$  до  $85^\circ$  (чтобы избежать предельных положений плашмя и с ребра, к которым методика в принципе не применима). К модельным изображениям мы применили наш метод для последующего сравнения заложенных в модель и вычисленных углов наклона и сопоставления относительных толщин.

#### 3.2. Углы, границы применимости

Для начала проверим качество алгоритма определения угла наклона галактики к картинной плоскости. Для этого сравним угол, заложенный при моделировании изображения, угол, определенный нашим методом, а также угол, определенный классическим способом по форме изофоты, нанеся их на одну координатную сетку, взяв за абсциссу значение угла, заложенное в моделировании. На рис. 4 на левой картинке видно, что углы наклона, вычисленные классическим методом по изофоте (и отмеченные желтым цветом), систематически оказываются меньше реальных углов наклона. Угол, рассчитанный по изофоте при нашем диапазоне относительных толщин, часто оказывается вдвое

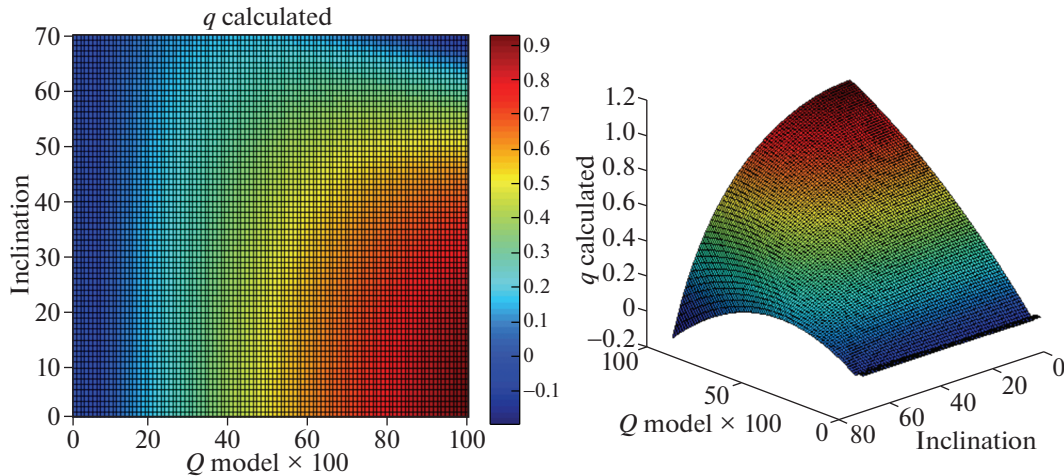


Рис. 5. Калибровочная поверхность, натянутая по множеству точек ( $Q * 100, i, q$ ).  $Q$  — заложенная в модель толщина,  $i$  — угол наклона галактики,  $q$  — вычисленная нашим методом эллиптическая толщина “по Хабблу”.

меньше реального угла. В то же время углы, вычисленные нашим методом по азимутальному распределению экспоненциальной шкалы (и нанесенные на график синими точками), гораздо ближе к истинным значениям углов наклона. При малых углах ( $i < 30^\circ$ ) отклонения синих точек от биссектрисы ничтожны, при увеличении угла возможная погрешность растет, хотя и остается заметно меньше погрешности традиционного метода.

Неравномерный разброс синих точек ниже биссектрисы позволяет нам искать границы применимости предложенного метода определения угла наклона. Подбирая различные условия на  $q$  и  $i$ , с учетом опыта работы на зашумленных наблюдательных данных, мы получаем границы применимости нашего метода:  $10^\circ < i < 75^\circ, q < 0.7$ .

Итак, сравнение вычисленных разными способами углов наклона с данными, заложенными изначально в модель, подтверждает нашу гипотезу о систематическом занижении угла наклона, вычисленного классическим способом для дисков ненулевой толщины, а также позволяет ограничить область применимости метода.

### 3.3. Толщины — калибровка

Сопоставление характерного вертикального масштаба секанса, заложенного в модель, и относительных толщин  $q$ , вычисленных нашим методом, не дает такого однозначного соответствия, как у углов наклона к картинной плоскости. Наша “толщина по Хабблу” не имеет никакой привязки к конкретному виду функции вертикального распределения объемной яркости, поэтому толщины модельной выборки служат не для проверки, а для построения калибровки в качестве надстройки к нашему методу.

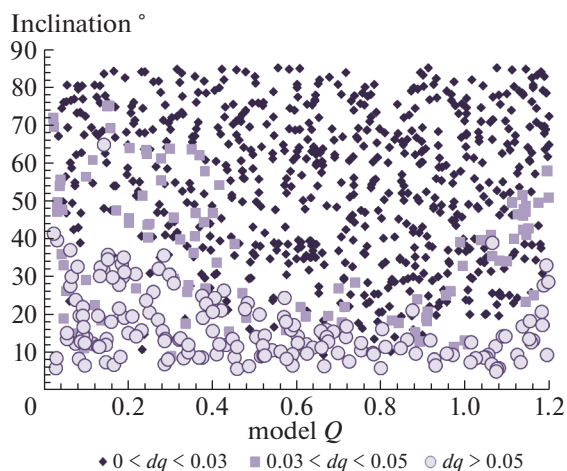
Для построения калибровочной функции сопоставим получившиеся на модельной выборке значения  $Q$  (относительный вертикальный масштаб  $\text{sech}^2$ , заложенный в модельные изображения),  $q$  (относительная толщина Хаббловского эллипсоида, полученная нашим методом) и  $i$  (угол наклона диска галактики к картинной плоскости). В силу предыдущего параграфа будем считать в пределах погрешности примерно одинаковыми угол наклона, заложенный при моделировании изображения, и угол наклона, полученный в ходе вычислений. Для упрощения при построении калибровочной поверхности будем использовать вычисленный  $i$  (полученный из эллиптичности экспоненциальной шкалы  $e_h$ , связанной с углом наклона соотношением  $\cos i = 1 - e_h$ ).

Итак, построим множество точек  $(Q, i, q)$ . Из рис. 5 видно, что множество точек располагается вдоль плавной поверхности. Определение формы поверхности  $q(Q, i)$  позволяет построить функцию  $Q(q, i)$ , которая в рабочем интервале параметров позволяет по рассчитанным  $q$  и  $i$  восстанавливать относительный вертикальный масштаб секанса квадратного.

Нам удалось достаточно точно фитировать поверхность  $q(Q, i)$ . Представим формулу поверхности, для удобства подставив вместо угла наклона  $i$  эллиптичность шкалы  $e_h$ :

$$\begin{aligned}
 qf &= a_1 + a_2 Q + a_3 e_h + a_4 \frac{Q}{1 - e_h} + \quad (3) \\
 &+ a_5 \left( \frac{Q}{1 - e_h} \right)^2 + a_6 \frac{Q^2}{1 - e_h} + a_7 Q (1 - e_h). \\
 a_1 &= -0.10611753; \quad a_2 = 1.03677072; \\
 a_3 &= 0.07558454; \quad a_4 = -0.10724209; \\
 a_5 &= 0.02140207; \quad a_6 = -0.44125365; \\
 a_7 &= 0.52485742.
 \end{aligned}$$





**Рис. 6.** Точность фитирующей формулы. По оси абсцисс — заложенное в модель изотермическое  $Q$ , по оси ординат — угол наклона галактики в градусах. Темные точки — модельные галактики с отличием вычисленной  $q$  от фитированной  $qf$  меньше 0.03, светлые точки — в пределах от 0.03 до 0.05, кружочки — больше 0.05.

Для демонстрации точности фитирования на рис. 6 мы отобразили его погрешность: разбили точки ( $Q_{model}, i$ ), соответствующие модельным галактикам, на группы в зависимости от отклонения точек от предложенного калибровочного соотношения  $dq = |q - qf|$  — модуля разности толщины, вычисленной нашим методом и по формуле.

Гладкость поверхности и точность фитирования этой поверхности позволяют нам использовать ее как калибровочную. Легко видеть, что явный вид фитирующей функции  $qf$  оказался квадратичным относительно  $Q$ , поэтому обратить ее и использовать для оценки изотермической “секансовой” толщины  $Q$  не составляет большого труда.

#### 4. РЕАЛЬНАЯ ВЫБОРКА

Итак, после обоснования метода, его проверки и калибровки на модельных галактиках, можно переходить к обработке наблюдательных данных. В данной работе мы будем рассматривать выборку кусочно-экспоненциальных дисков линзовидных галактик скоплений южного неба, описанную в статье Сильченко и др. [19]. Это выборка S0 галактик, диски которых отсняты в фотометрических полосах  $g$  и  $r$  с помощью сети телескопов LCOGT [20]. Полные критерии отбора объектов, а также полный перечень детализированных результатов можно найти в цитируемой работе. В данной статье некоторые результаты обработки этой выборки приводятся для наглядности и иллюстрации работы метода. Для нас важно, что в

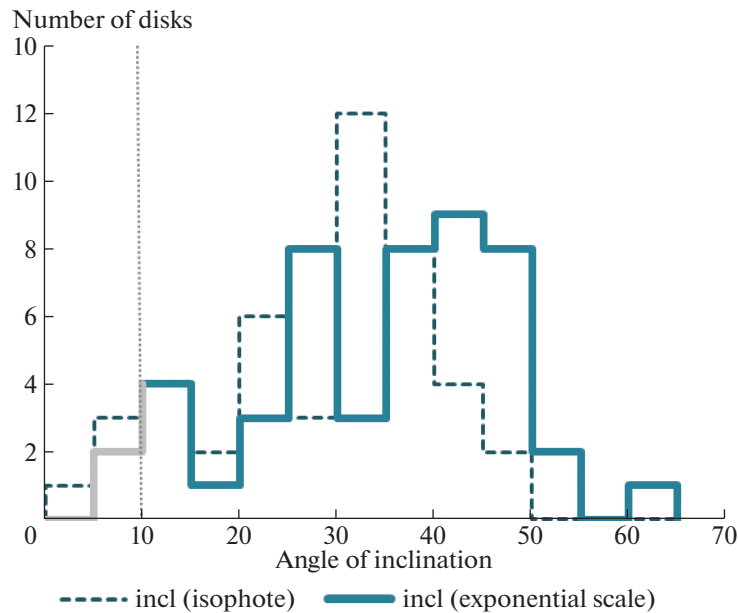
фильтре  $r$  получилось применить наш метод к 44 галактикам с радиальными профилями поверхностной яркости, классифицированными как кусочно-экспоненциальные. Ключевым модельным предположением метода является экспоненциальный закон распределения светимости по радиусу, поэтому метод срабатывает не только на дисках, но и на других экспоненциальных структурах, таких как линзы и псевдобалджи. В ряде конкретных случаев у линзовидных галактик с радиальными профилями поверхностной яркости III типа по Эрвину [6] (то есть шкала внешнего диска больше шкалы внутреннего) внутренний диск оказался псевдобалджем, с относительной толщиной  $q \approx 0.6$ . Также у ряда галактик II типа метод срабатывал не на диске, а на линзе, поэтому итоговая репрезентативная выборка дисков составляет 33 объекта и может быть разбита на диски галактик I типа и внутренние диски галактик III типа. На этих подвыборках мы будем иллюстрировать и проверять работу нашего метода.

##### 4.1. Распределение по углам

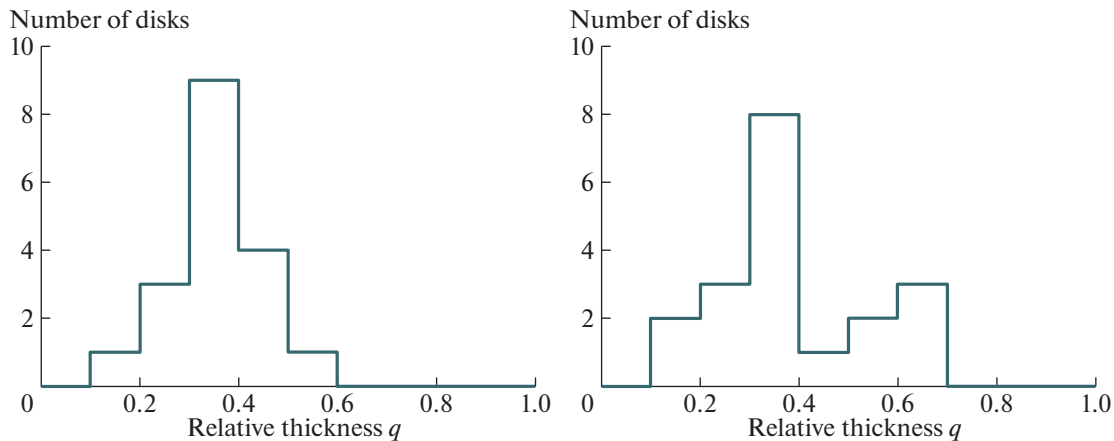
На примере нашей выборки рассмотрим статистику распределения галактик по углу наклона. Наша выборка не претендует на полноту (мы не рассматриваем галактики, близкие к положениям строго с ребра и плашмя), тем не менее, в некотором диапазоне наблюдаемых эллиптичности 44 объекта, составляющие выборку, выбраны достаточно произвольно, поэтому можно надеяться, что распределение углов наклона объектов должно быть сравнительно равномерным.

В наших вычислениях для каждого объекта мы находим эллиптичность распределения экспоненциальной шкалы по азимуту и эллиптичность изофоты. Для наглядности мы пересчитали эллиптичности в угол наклона в градусах и построили распределение числа галактик по углам наклона.

Можно видеть, что при определении угла наклона стандартным способом из формы изофоты (в предположении бесконечно тонкого диска) распределение галактик по углам наклона достаточно широкое в диапазоне от  $5^\circ$  до  $50^\circ$ , с выраженным сильным пиком около  $30^\circ$  (медиана распределения  $32^\circ$ ). Если вычислять угол наклона нашим методом, то видно, что, во-первых, в среднем углы наклона заметно увеличились (медиана  $38^\circ$ ) — это подтверждает наш тезис о том, что ненулевые толщины дисков заставляют выглядеть круглее и занижают кажущийся угол наклона галактики. Во-вторых, распределение даже для нашей сравнительно небольшой выборки в целом шире (от  $5^\circ$  до  $65^\circ$ ) и в пределах интервала оказывается более равномерным, не имеет одного выраженного пика, имеет более сглаженный характер, что гораздо



**Рис. 7.** Распределение числа галактик по углу наклона к лучу зрения на выборке из 44 дисков галактик в 8 скоплениях Южного неба. Пунктиром показано распределение для вычисления угла наклона в предположении бесконечно тонкого диска, то есть только по эллиптичности изофоты. Сплошной линией показано распределение угла наклона, вычисленного по азимутальному распределению шкалы. Серым помечены объекты, выходящие за границы применимости метода определения толщин по углу наклона.



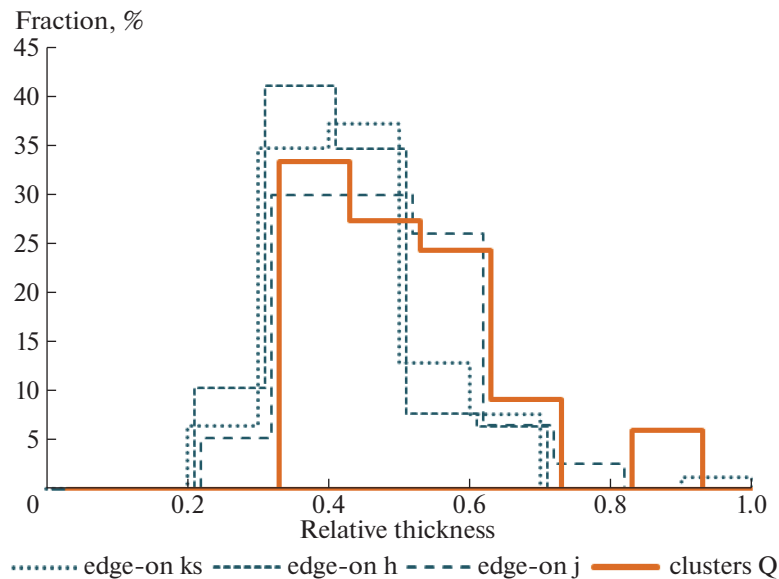
**Рис. 8.** Распределение относительных толщин дисков в подвыборках. Слева — экспоненциальные диски I типа. Справа — внутренние диски кусочно-экспоненциальных дисков III типа.

ближе к гипотезе о равномерном распределении углов наклона галактик во Вселенной.

#### 4.2. Толщины — сравнение со средним

Анализ толщин дисков уже нельзя рассматривать в целом по всей выборке. Предыдущие результаты [21] говорят о том, что толщины дисков с различными типами радиальных профилей поверхностной яркости могут значительно различаться. Поэтому на рис. 8 показано распределение

галактик по относительной хаббловской толщине  $q$  для 18 экспоненциальных дисков I типа (слева) и 19 внутренних дисков кусочно-экспоненциальных дисков III типа. Для I типа распределение выглядит нормальным и достаточно узким. Распределение для III диска очевидно бимодальное, с двумя выраженными максимумами на  $q = 0.3$  и  $q = 0.6$ . Скорее всего, это связано с тем, что часть структур, классифицированных по форме радиального профиля поверхностной яркости как внутренние



**Рис. 9.** Статистика распределения дисков ранних типов по толщинам. (Рассматриваются изотермические диски с экспоненциальным законом по радиусу и  $\text{sech}^2$  вдоль  $z$ ). Пунктир и штриховые линии — результаты анализа наблюдений дисков галактик ранних типов, видимых строго с ребра в фильтрах Ks, H и J в работе [11]. Сплошная линия — результаты применения нашего калиброванного метода к выборке галактик, видимых под произвольным углом.

диски галактик III типа, на самом деле являются псевдобалджами: сфероидальные подсистемы могут иметь экспоненциальный профиль, но в нашем анализе окажутся гораздо толще дисков.

Если в первом приближении считать все внутренние диски III типа с толщиной  $q > 0.5$  псевдобалджами, то средние значения толщины получаются  $q > 0.31 \pm 0.02$  для дисков I типа и  $q > 0.25 \pm 0.02$  для внутренних дисков III типа, что в целом хорошо согласуется со всеми приведенными статистическими оценками средних толщин [9, 10].

#### 4.3. Сравнение со статистикой толщин дисков галактик, видимых с ребра

Представленные выше рассмотрения статистики толщин касались толщины эллипсоида “по Хабблу”  $q$ , для которой явный вид зависимости от  $z$  не задан. Применение калибровочной поверхности, переводящей “толщины по Хабблу” в вертикальные масштабы закона секанс квадратный, позволяет нам сравнивать распределения наших результатов не только со статистическими средними значениями оценок толщин дисков по большим выборкам галактик [9], но и с распределениями толщин индивидуальных дисков галактик, наблюдаемых с ребра.

Для этого мы взяли данные из работы Мосенкова, Сотниковой и Решетникова [11], где исследовалась выборка 175 галактик поля, наблюдаемых строго с ребра. Изображения галактик в фильтрах

Ks, H и J брались из обзора 2MASS. Для сравнения с нашими результатами мы из выборки Мосенкова отобрали галактики ранних морфологических типов, посчитали для каждой относительную толщину в виде отношения масштабного коэффициента в законе  $\text{Sech}^2$  к экспоненциальной шкале и приводим диаграмму распределения галактик по относительным толщинам дисков.

На рис. 9 видно, что распределения дисков с ребра по толщинам в трех фильтрах очень похожие и достаточно узкие (в зависимости от фильтра средняя толщина варьируется от 0.31 до 0.36, а медиана от 0.29 до 0.35). Для сравнения мы берем из нашей выборки диски I типа и внутренние диски III типа, исключая из рассмотрения линзы галактик II типа и экспоненциальные псевдобалджи, похожие на внутренние диски III типа (поскольку такие структуры легко отбрасываются при визуальном рассмотрении дисков в выборке с ребра). Используя калибровочную поверхность, мы преобразуем хаббловскую толщину  $q$  в относительный масштабный фактор закона  $\text{sech}^2 - Q$ . Можно видеть, что распределение числа дисков по относительным толщинам  $Q$  в нашей выборке галактик, видимых под произвольным углом, очень близко к аналогичным распределениям для выборки галактик раннего типа, видимых с ребра. Наши среднее значение 0.37 и медиана 0.34, посчитанные по фотометрическим изображениям, попадают в интервал средних значений выборки [11] в трех инфракрасных фильтрах несмотря на то, что выборка с ребра содержит вдвое больше

объектов (78 галактик с ребра против 33 дисков в нашей подвыборке). Хорошее соответствие нашего распределения с распределением для галактик, наблюдаемых с ребра, подтверждает работоспособность и адекватность результатов нашего метода.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный нами метод позволяет по спроецированному на картинную плоскость изображению галактики определять толщину диска в случаях, когда толщину диска до сих пор не могли измерить из прямых фотометрических наблюдений — то есть для галактик, видимых под произвольным углом. Метод базируется на авторском подходе к определению истинного угла наклона галактики к лучу зрения. Методика определения угла позволяет исключить систематические ошибки определения угла наклона по форме изофот, связанные со структурой галактики перпендикулярно ее плоскости. Статистика применения метода к выборке изображений S0 галактик 8 скоплений южного неба подтверждает более равномерное распределение углов наклона осей вращения к лучу зрения, чем при традиционном методе определения угла наклона. Полученные нами оценки толщин дисков для небольших выборок галактик ранних типов в среднем хорошо согласуются со статистическими оценками толщин дисков в поле, базирующимися на предположении равновероятного распределения галактик по наклонению. Большая выборка модельных изображений галактик с заданным в модель законом распределения объемной яркости перпендикулярно плоскости  $\text{sech}^2$  позволяет, во-первых, еще раз подтвердить корректность методики определения угла наклона, а во-вторых, откалибровать вычисленные толщины дисков и сделать их сравнимыми с литературными результатами прямых измерений толщин дисков, наблюдаемых строго с ребра. Хорошее согласие статистики толщин, полученных применением нашего калиброванного метода к S0 [19] галактикам из южных скоплений, со статистикой галактик, видимых строго с ребра [12], подтверждает действенность метода и позволяет в дальнейшем применять метод для индивидуальных оценок толщин дисков

галактик, видимых под произвольным углом для уточнения их структур и проверки эволюционных моделей дисковых галактик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Noguchi, *Astron. and Astrophys.* **201**, 37 (1988).
2. J. A. Sellwood, R. W. Nelson, and S. Tremaine, *Astrophys. J.* **506**, 590 (1998).
3. J. Hämmen, Flynn C., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **337**, 731 (2002).
4. K. Saha, Y. H. Tseng, and R. E. Taam, *Astrophys. J.* **721**, 1878 (2010).
5. K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **160**, 811 (1970).
6. P. Erwin, J. E. Beckman, and M. Pohlen, *Astrophys. J. Lett.* **626**, L81 (2005).
7. M. Pohlen and I. Trujillo, *Astron. and Astrophys.* **454**, 759 (2006).
8. E. P. Hubble, *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
9. N. D. Padilla and M. A. Strauss, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **388**, 1321 (2008).
10. S. Rodríguez and N. D. Padilla, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **434**, 2153 (2013).
11. A. V. Mosenkov, N. Y. Sotnikova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **401**, 559 (2010).
12. A. V. Mosenkov, N. Y. Sotnikova, V. P. Reshetnikov, D. V. Bizyaev, and S. J. Kautsch, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **451**, 2376 (2015).
13. G. H. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, and H. Shapley, *Univ. Texas Monogr. Astron. Austin Univ. Texas Press* (1964).
14. A. Sandage, K. C. Freeman, and N. R. Stokes, *Astrophys. J.* **160**, 831 (1970).
15. G. de Vaucouleurs, *Astrophys. J.* **128**, 465 (1958).
16. G. de Vaucouleurs, *Ann. d'Astrophysique.* **11**, 247 (1948).
17. J. L. Sersic, *Atlas de galaxias australes* (Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968).
18. P. C. van der Kruit and L. Searle, *Astron. and Astrophys.* **95**, 116 (1981).
19. O. K. Sil'chenko, A. Y. Kniazev, and E. M. Chudakova, *Astron. J.* **156**, 118 (2018).
20. T. M. Brown, N. Baliber, F. B. Bianco, M. Bowman, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **125**, 1031 (2013).
21. E. M. Chudakova, O. K. Sil'chenko, *Astronomy Reports* **58**, 281 (2014).