doi:10.31725/0367-7966-2025-237-33-50
Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, № 237

Оценка вклада темного гало на разных расстояниях в диске галактики, видимой с ребра

А.А. Марчук[1,2], М.Д. Козлов[2]

[1] ГАО РАН, [2]СПбГУ

Поступила в редакцию 17 июня 2025 / Принята к публикации 17 июля 2025

Аннотация

Галактики, видимые с ребра или почти с ребра, позволяют непосредственно измерить толщину их дисков. Известно, что отношение радиального и вертикального масштабов диска может быть напрямую связано с массовой долей темного вещества в пределах диска через параметр Тумре и квадрат отношения дисперсий звезд в радиальном и вертикальном направлениях. Таким образом, для галактик, видимых с ребра, можно независимо оценить массу темного гало, однако для этого необходимо знать коэффициент пропорциональности. В этой работе показано, как потенциально с помощью только лишь одного изображения галактики в ИК полосе (чтобы можно было найти массу) и дополнительных условий (зависимость Талли-Фишера, равновесие диска в вертикальном направлении) можно уточнить исследуемую оценку. Более того, зависимость коэффициента пропорциональности от расстояния R следует ожидаемому из теории (в работе используется NFW-профиль) и дает возможность восстановить параметры самого темного гало. Продемонстрированы предварительные результаты применения метода для выборки далеких галактик (вплоть до $z \sim 3$), полученных из наблюдений JWST. Показано, что для этих галактик масса темного гало получается больше, причем она и другие параметры хорошо согласуются с литературой. Найдено, что доля массы темного гало по отношению к массе диска в пределах пяти экспоненциальных масштабов растет к современной эпохе, что может быть признаком ожидаемого адиабатического поджатия темного гало к центру.

ключевые слова: галактики, видимые с ребра; наблюдения JWST; темное гало; диски галактик

Введение

Галактические диски являются сложными структурными компонентами, и включают в себя основную часть звездной массы в большинстве спиральных галактик. Их массы и внутренняя структура являются важнейшими факторами, определяющими все крупномасштабные активные процессы в галактиках, такие как крупномасштабное звездообразование, распространение волн плотности, перенос углового момента и многие другие. Как правило, поверхностная плотность дисков на больших галактоцентрических расстояниях R уменьшается по экспоненциальному закону с радиальной шкалой порядка нескольких килопарсек (Freeman, 1970). Другой геометрический параметр звездного диска, его толщина, может быть охарактеризован приблизительно постоянным вертикальным масштабом z_0. В часто используемой модели изотермического диска уменьшение плотности с расстоянием z от галактической плоскости описывается простым законом $\propto \mathrm{sech}^2(z/z_0)$ (хотя есть и альтернативные модели, где зависимость не квадратичная или вообще экспоненциальная: de Grijs и van der Kruit, 1996). Во всех случаях толщина диска z_0 в первую очередь определяется локальной плотностью диска и дисперсией скоростей звезд. Однако, как мы можем видеть в нашей Галактике, молодые и старые звезды имеют разные дисперсии

*e-mail:aamarchuk@gmail.com

скоростей, что приводит к довольно сложной вертикальной структуре, часто состоящей из т.н. “тонкого молодого” и “толстого старого” дисков. Однако, поскольку основная часть массы диска в спиральных галактиках состоит из звезд возрастом в несколько миллиардов лет, в большей части работ определенная по фотометрическому анализу толщина соответствует старому звездному диску.

В отличие от радиальной шкалы h, толщину диска можно измерить напрямую только в галактиках, где диски видны с ребра. Интерес к галактикам, видимым с ребра, и той информации, что они могут дать, легко проследить по большому числу работ, посвященных их исследованию. Сложно перечислить все, но можно упомянуть пионерские работы van der Kruit и Searle, 1981; каталог RFGC, составленный И.Д. Караченцевым с соавторами Karachentsev и др., 1999; работа по каталогу 2MASS A. V. Mosenkov, N. Ya. Sotnikova и V. P. Reshetnikov, 2010; обширные усилия были предприняты Бизяевым Д.В. и Макаровым Д.И. с другими исследователями для построения самых больших выборок подобных объектов, включающих десятки тысяч галактик D. V. Bizyaev и др., 2014; D. Makarov и др., 2022. Есть и другие работы. При этом все эти выборки состоят из сравнительно близких объектов и могут служить для описания физики галактик только в современную эпоху. Из выборок далеких галактик, составленных по наблюдениям телескопа им. Хаббла, можно отметить работу Usachev, Vladimir P. Reshetnikov и Savchenko, 2024 и выборку Hamilton-Campos и др., 2023. Зачастую трудность нахождения таких галактик связана со сложностью определения того, видна ли галактика с ребра. Самые современные наблюдения, выполненные с телескопа JWST, позволяют заглянуть на еще более ранние эпохи с заметно улучшенным разрешением. Неудивительно, что за сравнительно короткое время, прошедшее с запуска телескопа, опубликовано уже несколько работ, посвященных галактикам, видимым с ребра. Это статья Lian и Luo, 2024, где толщина дисков измерялась с помощью вертикальных срезов, и статья Tsukui и др., 2024 (в соавторах также Фриман), где для чуть более сотни галактик выполнена фотометрическая декомпозиция с одним и двумя дисками. Есть и статьи по отдельным экзотическим случаям, как, например, исследование видимой с ребра галактики на $z = 5.289$ в статье Yan, Sun и Ling, 2024.

Таким образом, галактики, видимые с ребра, представляют собой уникальный класс объектов, изучение которых позволяет напрямую получить информацию о распределении вещества, его динамических свойствах, кинематике и структуре дисков, свойствах пылевых слоев. Однако на больших красных смещениях, соответствующих эпохе молодой Вселенной, такие галактики остаются малоизученными из-за ограниченных разрешающих возможностей предыдущих телескопов и космологического смещения длины волны с множителем $1 + z$. Как уже было сказано, телескоп JWST, обладающий высоким разрешением и чувствительностью в инфракрасном диапазоне, позволяет изучать диски на больших z именно в полосе испускания в ближнем и среднем ИК диапазонах, что открывает новые горизонты для детального анализа этих объектов, чему и были посвящены новые работы Lian и Luo, 2024; Tsukui и др., 2024. При этом еще один важный параметр, а именно вклад темного вещества в массу, который такие объекты позволяют оценить, в этих работах не изучался.

В работе Zasov, D. I. Makarov и Mikhailova, 1991 было показано, что, если вертикальная дисперсия скоростей σ_z пропорциональна радиальной дисперсии скоростей звезд σ_R, которая в свою очередь в старом звездном диске близка или пропорциональна к критическому порогу гравитационной (джинсовской) неустойчивости вращающегося диска, то относительная толщина диска z_0/h должна увеличиваться с уменьшением относительной массы галактического гало. Справедливость такой оценки была в дальнейшем подтверждена наблюдениями (Zasov, D. V. Bizyaev и др., 2002) и численным моделированием (Khoperskov, Zasov и Tyurina, 2001; N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2003; N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2006). В самих расчетах используется взятый постоянным т.н. параметр Тумре для звездного диска Q, который соответствует тонкому однородному диску, и описывает устойчивость этого диска к радиальным возмущениям. Из общих соображений марджинальной устойчивости дисков действительно можно полагать $Q \approx 1 - 1.5$ (Zasov, Khoperskov и Saburova, 2011). Численные модели минимально устойчивых дисков также показывают, что параметр Q остается почти постоянным в широком интервале расстояний за

пределами центральной области, а его значение слабо зависит от масс компонент галактики или формы ее кривой вращения (Khoperskov, Zasov и Tyurina, 2001). При этом в общем случае Q является функцией радиального галактоцентрического расстояния R, постепенно увеличиваясь к периферии (R. Bottema, 1993). В дополнение к этому, в наблюдениях настоящих галактических дисков показано, что порог неустойчивости может быть заметно выше, вплоть до $Q \approx 3$ (Kostiuk и др., 2025; A. A. Marchuk, 2018; A. A. Marchuk и N. Y. Sotnikova, 2018), что может быть связано с наличием нескольких дисков, влиянием их толщины и нерадиальных возмущений. Галактики в раннюю эпоху также обладают более “разогретыми” дисками (Übler, Genzel и др., 2019), что влияет на порог их устойчивости. Таким образом, использование условия $Q = const$ при оценке вклада темного гало, хоть и является физически обоснованным и наверняка подходит для заметного числа объектов, вносит заметную неопределенность в оценку.

Основной задачей в данной работе является создание выборки галактик на больших красных смещениях, видимых ”с ребра”, и исследование параметров темного гало для объектов в выборке. Актуальность данного исследования обусловлена несколькими факторами. Во-первых, изучение галактик на больших красных смещениях позволяет заглянуть в ту эпоху, когда проходили ранние этапы формирования крупномасштабной структуры Вселенной. Во-вторых, галактики, видимые с ребра, предоставляют уникальную возможность исследовать внутреннюю структуру галактических дисков, включая вертикальное распределение газа, пыли, звездного населения и даже темного вещества. В-третьих, отсутствие систематического анализа таких объектов на больших красных смещениях оставляет множество вопросов, связанных с их эволюцией и ролью в формировании современной структуры Вселенной. Наконец, все оценки вклада темного вещества в работе будут сделаны новым способом, который также использует фотометрический анализ, но не использует условие постоянства параметра Тумре по диску, а сам оцениваемый вклад меняется с изменением расстояния до центра галактики.

Для выполнения расчетов в работе используются стандартные космологические параметры: $H_0 = 70(\text{км} \times \text{с}^{-1})/\text{Мпк}$, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$.

1 Метод

Для галактики, видимой с ребра, из фотометрического анализа доступны радиальный масштаб h_R и толщина z_0. Предположим также, что для нее известна полная звездная масса M_*, например из фитирования SED-моделей (как в исследуемом случае) или из хорошего ограничения отношения массы-к-светимости $\langle M/L \rangle$ в исследуемом диапазоне. Например, для фильтра K_s можно принять $\langle M/L \rangle \approx 0.5$ в солнечных величинах, что верно для заметной части исследуемой выборки (см. следующий раздел). Отметим, что в этом случае необходим всего один снимок исследуемой галактики.

Тогда можно проделать следующую цепочку вычислений:

1. Зная звездную полную M_* и полагая вклад балджа малым (т.е. $M_* = M_d$), можно приблизительно вывести массовую модель диска галактики, в частности, для нахождения поверхностной плотности
$$\Sigma_0 = \langle M/L \rangle \times J_0 \times \int sech^2(z/z_0)dz, \tag{1}$$
где $\langle M/L \rangle$ – усредненное отношение масса-светимость, J_0 – объемная светимость. Отношение масса-светимость может быть найдено из соотношения
$$M_d = \langle M/L \rangle \times L_d = \langle M/L \rangle \times (4\pi J_0 h^2 z_0), \tag{2}$$
где L_d – светимость диска галактики, M_d – масса диска, полученная с помощью подгонки SED в данных DJA.

2. Из условия равновесия в вертикальном направлении ("барометрическая формула" для звезд) для каждой модели можно найти дисперсия скоростей в вертикальном направлении:

$$\sigma_z^2 = \pi G \Sigma(r) z_0, \tag{3}$$

где G – гравитационная постоянная, $\Sigma(r)$ – поверхностная плотность, z_0 - вертикальный масштаб диска, полученный из декомпозиции.

3. Зная массу галактики, можно оценить *максимальную* скорость вращения галактики из барионного соотношения Талли-Фишера. Есть много работ, посвященных анализу параметров этой зависимости, в данной работе используется приближение, найденное в Di Teodoro и др., 2021,

$$\log M_* = 0.8 + 4.25 V_{rot}. \tag{4}$$

где V_{rot} – скорость вращения галактики. Таким образом:

$$V_{rot} = 10^{\frac{\log M_* - 0.8}{4.25}}, \tag{5}$$

Стоит отметить, что *максимальная* скорость вращения галактики не всегда хорошо описывает форму ее кривой вращения целиком. Тем не менее, в заметном числе случаев во внешних частях диска, которые и исследуются в этой работе, кривая вращения после монотонного роста выходит на плато (например, см. Alexander A. Marchuk, 2024), как раз соответствующего максимуму. Конечно, подобные оценки кинематики работают только в статистическом смысле, но хорошее согласие с наблюдательными данными других авторов, обсуждаемое в Разделе 4, вселяет уверенность в правомочность подобного анализа.

4. Отношение общей массы галактики к массе ее диска пропорционально отношению масштабов со следующим коэффициентом (см., например, Zasov, D. V. Bizyaev и др., 2002):

$$\frac{h}{z_0} \propto \frac{1}{Q(\sigma_z/\sigma_R)^2} \frac{M_{tot}}{M_d}, \tag{6}$$

где Q – параметр неустойчивости Тумре для звезд, σ_z и σ_R – вертикальная и радиальная дисперсия звезд, M_{tot} – полная масса галактики и гало, M_d – масса диска. Параметр Тумре равен

$$Q = \frac{\varkappa \sigma_R}{3.36 G \Sigma}, \tag{7}$$

где $\varkappa$ – это эпициклическая частота, $\Sigma(r)$ – поверхностная плотность диска, обычно в $M_\odot/\text{пк}^2$. Если $Q < 1$, то такой диск неустойчив относительно осесимметричных возмущений (Toomre, 1964).

Как было упомянуто во Введении, обычно коэффициент в уравнении (6) получают при условии постоянства параметра Тумре из соображений о маржинальной устойчивости диска, используя $Q \approx 1.2-1.5$ (как зачастую и в N-body расчетах). Отношение дисперсий σ_z/σ_R также довольно постоянно по диску как в наблюдениях (Gerssen, Kuijken и Merrifield, 2000; Mogotsi и Romeo, 2019; A. A. Marchuk и N. Y. Sotnikova, 2017; Shapiro, Gerssen и van der Marel, 2003), так и в численных моделях (N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2003; N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2006), и составляет $0.6 - 0.8$. Значительно от указанной величины это соотношение отличаться не может, поскольку $\sigma_z < \sigma_R$, а снизу существует минимальный порог, после которого диск становится неустойчивым относительно изгибных возмущений, ограничивающий $\sigma_z/\sigma_R > 0.37 - 0.4$ (Polyachenko и Shukhman, 1977).

В данной работе вклад темного вещества оценивается новым уточненным способом без предположения $Q = \text{const}$. Из разложения коэффициента в ур. (6) на множители получим

$$Q(\sigma_z/\sigma_R)^2 = \left(\frac{Q}{\sigma_R}\right) \times \left(\frac{\sigma_z}{\sigma_R}\right) \times \sigma_z = \frac{\sqrt{2} V_{rot} \times (0.6 \pm 0.2)}{3.36 R G \Sigma_0 \exp(-R/h)} \times \sqrt{\pi G \Sigma_0 \exp(-R/h) z_0}, \tag{8}$$

где второй множитель оценивается как константа, первый - с использованием предположения о плоской кривой вращения во внешних частях диска, тогда $\varkappa = \sqrt{2}V_{rot}/R$ и выражение $\Sigma(R) = \Sigma_0 \exp(-R/h)$ для поверхностной плотности диска, а последний множитель - из ур. (3). После сокращения остается

$$Q(\sigma_z/\sigma_R)^2 \approx \frac{\sqrt{2\pi}V_{rot} \times (0.6 \pm 0.2) \times \sqrt{z_0}}{3.36\sqrt{G\Sigma_0}R\exp(-R/2h)}. \tag{9}$$

Тогда из формулы (6) получим выражение для оценки массы гало с точностью до коэффициента:

$$M_{halo} = M_{tot} - M_d \sim M_d \left(\frac{h \times Q(\sigma_z/\sigma_R)^2}{z_0} - 1 \right). \tag{10}$$

Упомянутые предположения дают и границы применимости формулы: не слишком близко к центру, чтобы избежать влияния центральных компонент и кривая вращения успела выйти на плато (а значит не ближе $2.2h$), и вплоть до внешних границ звездного диска. Разумным образом можно полагать применимость в пределах $2.5h \leq R \leq 5h$ (de Grijs и van der Kruit, 1996; Sofue, 2017).

Важное отличие от предыдущего подхода также в том, что приведенное выражение (10) позволяет оценивать вклад темного вещества на разных расстояниях R от центра галактики. Причем показанная форма зависимости $M_{halo} \propto R^{-1}\exp(\frac{R}{2h})M_d(\leq R) \propto R^{-1}\exp(\frac{R}{2h}) \times (1 - (1 + R/h)\exp(-R/h))$ хорошо согласуется с ожидаемой. Действительно, для стандартного NFW-профиля темного гало, описывающего профиль плотности в зависимости от двух параметров (Navarro, Frenk и White, 1996)

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\frac{r}{R_s}\left(1 + \frac{r}{R_s}\right)^2}$$

полный интеграл массы в сфере радиусом R будет равен

$$M_{NFW}(< R) = \int_0^R 4\pi r^2 \rho(r)\, dr = 4\pi\rho_0 R_s^3 \left[\ln\left(\frac{R_s + R}{R_s}\right) - \frac{R}{R_s + R} \right]. \tag{11}$$

На Рисунке 1 показаны теоретическая кривая из (11) и для найденной в работе зависимости (6). Видно, что в упомянутых выше пределах кривые очень хорошо соответствуют друг другу. Показаны теоретические кривые для параметров гало $R_s/h = 5$ и $R_s/h = 10$, как характерные для галактики типа Млечного Пути (Sofue, 2012), но при других разумных параметрах полученный вывод останется тем же. Таким образом, показано, что новая найденная оценка (10) согласуется с ожидаемым поведением вклада темного гало, а также, по крайней мере чисто формально, позволяет определить его параметры ρ_0 и R_s (из оценки на разных расстояниях R - см. пересечения кривых на Рисунке).

2 Данные

В работе используются галактики из выборки, собранной в Tsukui и др., 2024. Такой выбор обусловлен тем, что в указанной работе сделаны качественные модели галактик, видимых с ребра, а объекты отобраны по всем доступным полям JWST. Отдельно отметим, что мы также отобрали и провели фотометрическую декомпозицию непересекающейся с Tsukui и др., 2024 выборки сопоставимых размеров, дающей схожие результаты, но для краткости ограничимся обсуждением уже опубликованных данных. Полное описание исследуемой выборки доступно в оригинальной работе Tsukui и др., 2024, ниже кратко воспроизводятся основные моменты.

В работе Tsukui и др., 2024 использовались общедоступные мозаичные изображения из архива DAWN JWST (DJA), которые были однородным образом обработаны с использованием

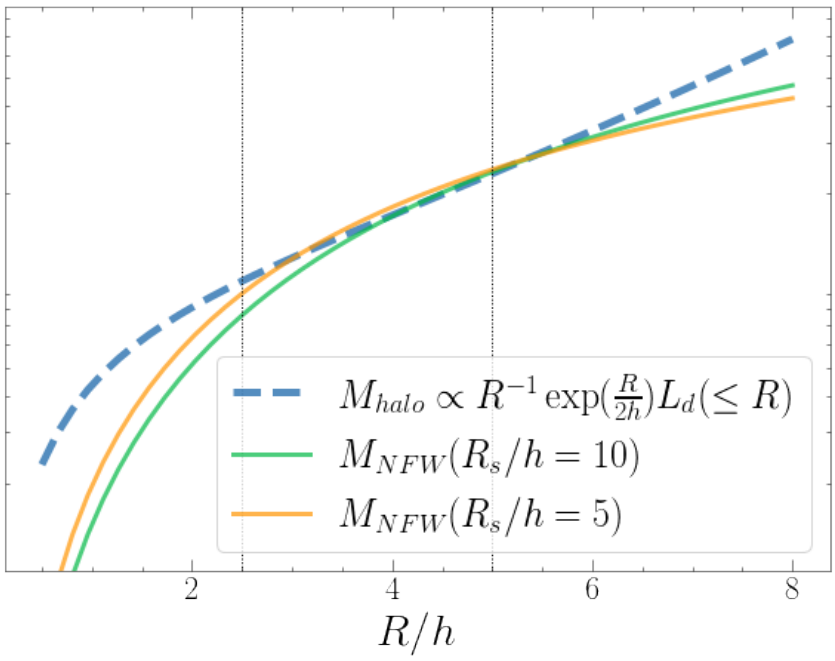

Рис. 1: Общая форма зависимости от расстояния для массы темного гало ((11), непрерывные линии) и для предсказанной зависимости ((10), пунктирная линия). Поскольку обе зависимости масштабируются на константу, то вертикальная ось безразмерная, а константы подобраны так, чтобы все линии были хорошо видны.

GRIZLI (G. Brammer, 2023). Используемые данные были взяты из флагманских наблюдательных программ JWST, таких как JADES (Rieke и др., 2023), FRESCO (Oesch и др., 2023), CEERS (Bagley, Finkelstein и др., 2023), COSMOS-Web (Casey и др., 2023), PRIMER (Dunlop и др., 2021) и NGDEEP (Bagley, Pirzkal и др., 2024). Конкретные данные о полях приведены в Таблице A1 цитируемой работы Tsukui и др., 2024.

Каталоги DJA для JWST общедоступны, сделаны путем прогона SExtractor (Bertin и Arnouts, 1996) на изображениях, полученных путем объединения доступных длинноволновых фильтров (F277W+F356W+F444W; Valentino и др. 2023). Физические параметры галактики брались из 3D-каталога HST (G. B. Brammer и др., 2012; Momcheva и др., 2016), включая красное смещение, звездную массу и скорость звездообразования, а из каталогов DJA было получено видимое осевое отношение галактики q. Галактики отбирались так, чтобы они были видны с ребра, имели отношение осей $q = a/b < 0,3$, звездную массу $M_* > 10^{8,5} M_\odot$ и были отделены от близлежащих источников хотя бы на 1.5”. После визуального осмотра, в котором уделялось особое внимание признакам того, что диск расположен под углом к лучу зрения (спиральные рукава, пылевая полоса), остались 132 галактики.

Эффективная PSF (ePSF) измерялась для каждого мозаичного изображения, следуя методам отбора звезд (Faisst и др. 2022, см. также Ito и др. 2024 и Zhuang и Shen 2024). Найдено, что эта ePSF шире, чем смоделированная с помощью WebbPSF (Perrin и др., 2014). Найденная после подгонки FWHM равняется 0.131”/0.146”/0.166” для F277W, F356W и F444W соответственно (при размере пикселя изображений 0.04”). Измеренные значения существенно не меняются между наблюдениями. Для моделирования распределения поверхностной яркости галактик и измерения структурных свойств авторы использовали пакет IMFIT (Erwin, 2015), что является стандартным выбором в подобных работах (Alexander A. Marchuk, Chugunov, Galliano и др., 2025; Alexander A. Marchuk, Chugunov, Gontcharov и др., 2024; Chugunov, Alexander A. Marchuk, Aleksandr V. Mosenkov и др., 2024; Chugunov, Alexander A. Marchuk и Aleksandr V. Mosenkov, 2025). Помимо PSF, для подгонки требуются карта ошибок и маска (для определения области подгонки) в качестве входных данных, после чего алгоритм выводит параметры наилучшей заранее заданной

doi:10.31725/0367-7966-2025-237-33-50
Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, № 237

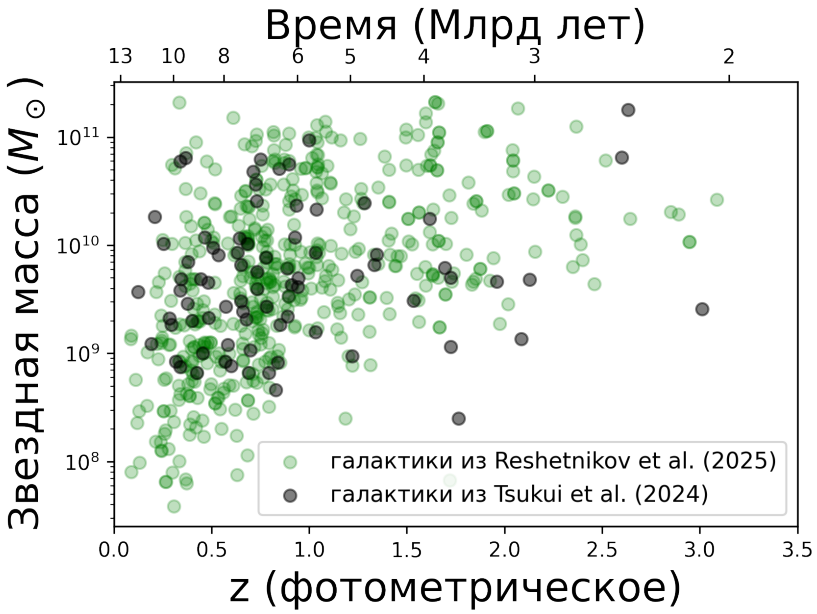

Рис. 2: Распределение звездной массы галактик, определенных по SED, от фотометрического красного смещения (все данные - из DJA). Зеленые точки показывают выборку сравнения из Vladimir P. Reshetnikov и др., 2025, серые - исследуемые в этой работе галактики.

модели и ее метрики, такие как χ^2 и байесовский информационный критерий (BIC). Этот критерий помогает обоснованно выбирать лучшую модель из нескольких, где число компонент может варьироваться. Авторами Tsukui и др., 2024 стандартно использовалась трехмерная модель диска, в которой плотность светимости диска следует экспоненциальному профилю в радиальном и профилю sech^2 в вертикальном направлениях, наклон полагается равным $i = 90°$.

Для каждой галактики в подходящем фильтре (об этом ниже) прогонялись последовательно усложняющиеся модели: 1) модель одного диска; 2) модель двух дисков (тонкий+толстый); 3) модель диска+балджа; и 4) модель двух дисков (тонкий+толстый) + балджа. Балджи подгоняются стандартной функцией Серсика (John Kormendy и Kennicutt, 2004). Необходимость дополнительных компонентов для каждой галактики определяется сравнением BIC между моделями. В итоговом наборе данных в Tsukui и др., 2024 галактик с одним и двумя дисками получается примерно поровну. Нами в анализе использовались 60 галактик, где в моделях получился только один толстый диск. Это не означает, что второго тонкого диска в этих объектах нет, но, скорее всего, он мал и его вклад можно не учитывать.

Изучать галактики в большом диапазоне красных смещений довольно сложно из-за космологического покраснения света, что описывается т.н. K-поправкой[1]. В работе Tsukui и др., 2024 фильтры подобраны так, чтобы постараться учесть эту поправку, максимизируя пересечение с полосой K_s и диапазоном ближнего ИК. Используются следующие изображения NIRCam F277W: 2.7 мкм, F356W: 3.6 мкм и F444W: 4.4 мкм для галактик с красным смещением $z < 0.46$, $0.46 < z < 0.82$ и $0.46 < z < 1.45$ соответственно. Для галактик с большим красным смещением используется фильтр F444W, изображения которого соответствуют полосам H и J в бинах $1.45 < z < 2.24$ и $2.24 < z < 3$. Таким образом, исследуемые диски отслеживают распределение звездной массы галактик, что важно для предложенного метода, и слабо затронуты поглощением пыли. Отметим, что систематические отличия в измерениях размеров диска для ближнего ИК и полосы K_s также невелики, что показано в D. Bizyaev и Mitronova, 2009.

Параметры используемой выборки в 60 галактик в целом соответствуют распределениям, приведенным на рис. 2 в Tsukui и др., 2024. Для читателя приведем здесь только распределе-

[1]Это и есть та причина, почему JWST наблюдает в ИК фильтрах и из-за которой наблюдения HST хоть и помогают увидеть галактики достаточно далеко, но не позволяют изучить в них распределение массы.

doi:10.31725/0367-7966-2025-237-33-50
Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, № 237

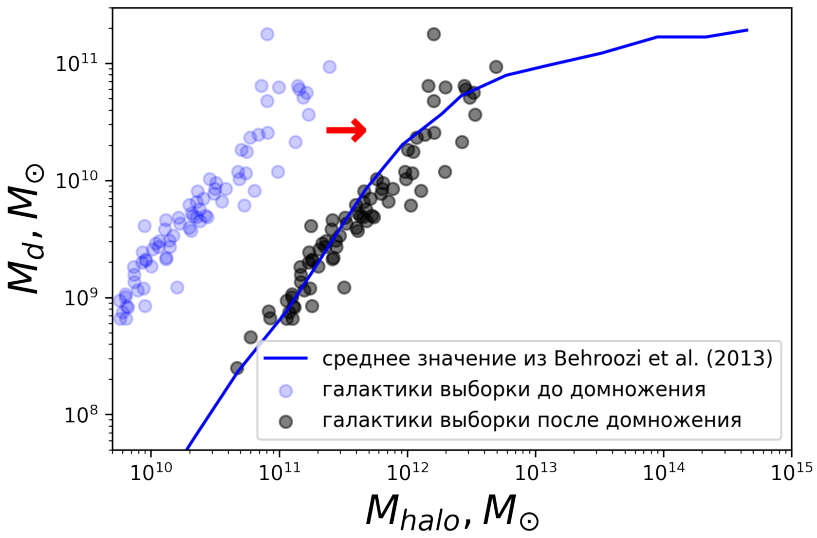

Рис. 3: На графике изображена зависимость массы диска от массы темного гало для галактик из выборки Tsukui и др., 2024. Черными точками обозначены галактики после сдвига (домножения на 20), синие - до. Линией показано среднее значение зависимости звездной массы галактики от массы гало из статьи Behroozi, Wechsler и Conroy, 2013.

ние выборки галактик по звездной массе и красному смещению на Рис. 2. Для сравнения на Рисунке приведены также данные большей выборки галактик, видимых с ребра из (Vladimir P. Reshetnikov и др., 2025), составленной похожим образом. Видно общее согласие выборок и хорошо заметен эффект наблюдательной селекции - на большом удалении мы видим только массивные галактики. Красные смещения, определенные как фотометрическим, так и спектроскопическим способом, хорошо соответствуют друг другу, но используются фотометрические, поскольку они есть для всех объектов. В выборке среднее значение красного смещения $\langle z \rangle \approx 0.88$, галактики распределены по z от ~ 0.12 до ~ 3.01, что соответствует времени до объектов примерно от 1,6 млрд лет до 11,4 млрд лет (70% возраста Вселенной), при этом в выборке наличествует широкий диапазон звездных масс при всех красных смещениях.

3 Результаты

На Рисунке 3 показана зависимость массы диска от массы гало, полученная из оценки (10) для внешней границы диска $R = 5h$. Для сравнения на график нанесено хорошо известное среднее значение зависимости массы звезд от массы гало из работы Behroozi, Wechsler и Conroy, 2013. Так как формула (10) дает значение с точностью до умножения на константу и верна только в пределах диска, то необходимо подобрать коэффициент так, чтобы подогнать значения к кривой из Behroozi, Wechsler и Conroy, 2013. На графике коэффициент равен 20. Полученные после умножения значения хорошо согласуются со значениями из статьи Behroozi, Wechsler и Conroy, 2013, прослеживается излом. Отстоящие ниже кривой точки могут быть связаны с более ранним ее загибом для галактик на больших z, что также ожидается (см. ту же статью). Общая тенденция такова: с увеличением массы галактики увеличивается масса гало, но когда масса гало достигает $\sim 10^{12} M_\odot$, масса галактики перестает сильно увеличиваться, и зависимость выходит на слаборастущее плато. Известно, что гало вблизи $10^{12} M_\odot$ наиболее эффективно образуют звезды на всех красных смещениях; эффективность конверсии барионов в массивных гало заметно падает после $z \sim 2.5$. Стоит также отметить, что разброс точек на Рисунке 3 достаточно мал, что не в последнюю очередь связано с аккуратным подбором фильтров в зависимости от красного смещения, которые неплохо трассируют распределение массы в диске галактики, видимой с ребра.

doi:10.31725/0367-7966-2025-237-33-50
Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, № 237

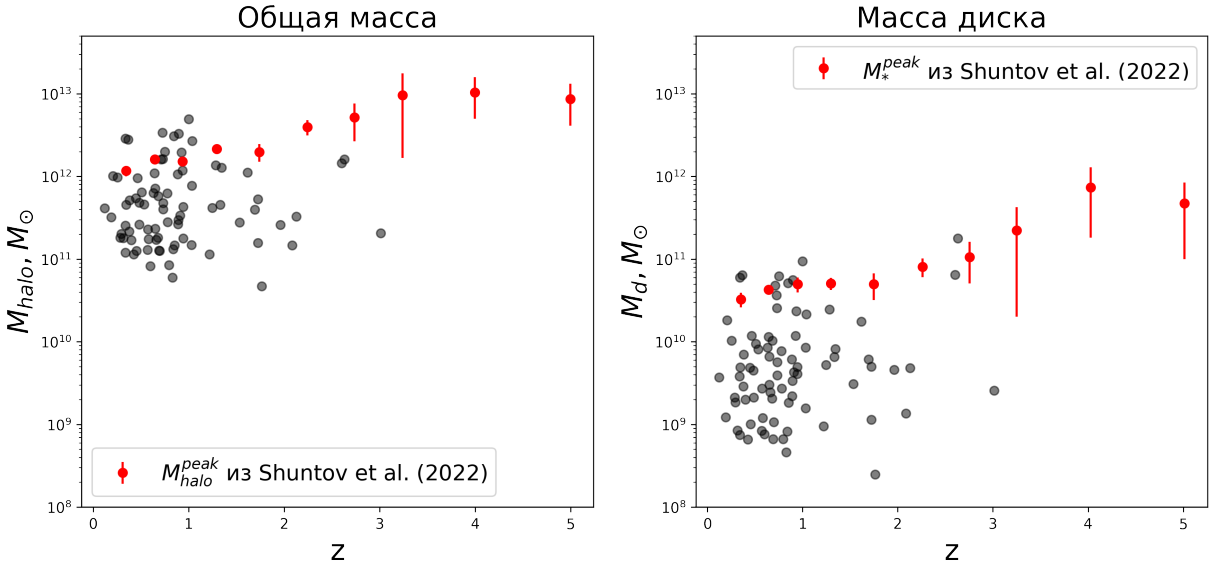

Рис. 4: На левом и правом графиках серыми точками показана зависимость массы гало (константа та же, что и на Рисунке 3) и диска галактик соответственно от z. Также на графиках отмечена т.н. пиковая масса (красные точки) для полной массы (слева) и звездной массы (справа) из статьи Shuntov и др., 2022.

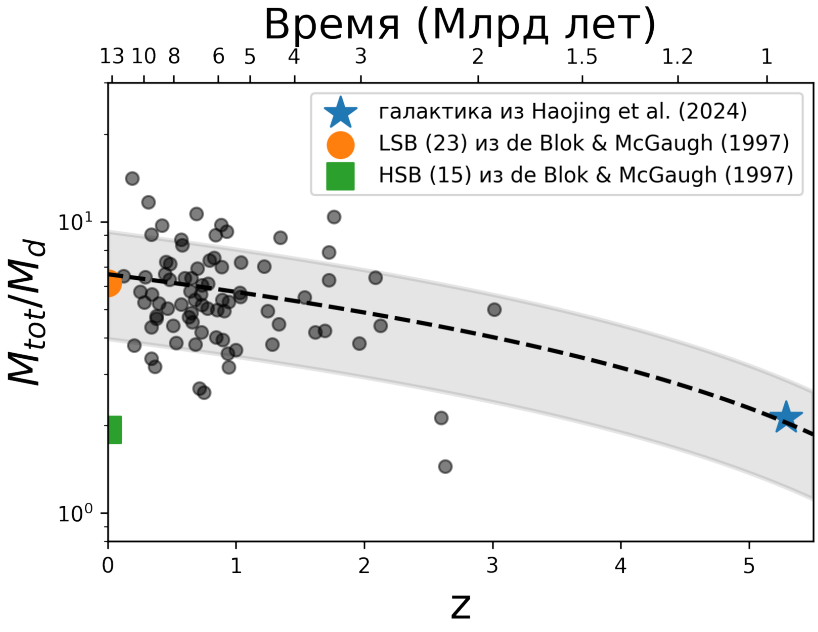

Рис. 5: График отношения полной массы галактики к массе диска (M_{tot}/M_d) на расстоянии $5h$ от центра в зависимости от красного смещения. Черным обозначены значения для галактик из выборки, линии обозначают линейную (в исходных координатах) аппроксимацию данных, закрашенная область - 40% разброс. На $z = 0$ показаны средние значения величины для подвыборок LSB и HSB из de Blok и S. S. McGaugh, 1997 (модель максимального диска). Звездой обозначены параметры, оцененные в работе для далекой галактики из Yan, Sun и Ling, 2024.

На Рисунке 4 изображены графики зависимости полной массы галактики, вычисленной с помощью уравнения ((10)), от красного смещения и зависимости массы диска (взятых из каталогов) от красного смещения. Как говорилось выше, вычисления домножены на коэффициент 20. Красные точки на графиках справа и слева показывают т.н. пиковую массу из работы Shuntov и др., 2022. Пиковая масса представляет собой массу, при которой процесс образования галактик за всю историю существования гало был наиболее эффективным, и фактически как раз соответствует излому на Рисунке 3 при $M_{halo} \approx 10^{12} M_{\odot}$. Причем пиковая масса, как гало так и барионов, приблизительно постоянна на большом промежутке z. Видно согласие полученных результатов. Значения, домноженные на коэффициент, подобранный исходя из работы Behroozi, Wechsler и Conroy, 2013 хорошо ложатся на результаты уже другой работы Shuntov и др., 2022. Фактически, результат, изображенный на Рисунке 4 показывает ту же зависимость, что и на Рисунке 3, только разнесенный по z и из другой работы. Иными словами, поскольку массы дисков, найденные в DJA, почти все расположились до излома на Рисунке 3 (которому и соответствует пиковая масса), то и массы гало почти все находятся ниже красных точек на Рисунке 4.

На Рисунке 5 показана зависимость отношения M_{tot}/M_d от красного смещения в пределах диска $5h$. Как уже упоминалось, выбор именно такого значения обусловлен тем, что в пределах этого радиуса расположен почти весь диск (96%), кривая вращения уже точно вышла на плато, а влияние центральных компонент минимально. Хорошо виден тренд на уменьшение отношения с увеличением красного смещения, т.е. масса темного гало в пределах $5h$ вероятно увеличивается со временем. На Рисунке также показано значение очень далекой галактики, видимой с ребра из Yan, Sun и Ling, 2024, для которой нами проведена декомпозиция в самом длинноволновом фильтре (параметры $z = 5.289, h^{F444W} = 0.82$ кпк, $z_0^{F444W} = 0.22$ кпк, $\log M_d = 9.78$). Видно, что такой далекий объект хорошо попадает на продленную зависимость, найденную в работе. Сравнение напрямую с близкими галактиками провести не так просто, единственная известная авторам работа, где оценивалось это же отношение в тех же пределах - это de Blok и S. S. McGaugh, 1997. В ней для выборки галактик низкой поверхностой яркости (LSB) и высокой поверхностной яркости (HSB) вклад оценивался по декомпозиции кривой вращения на компоненты. Использовались две модели диска - модель максимального диска и т.н. модель диска Боттемы (Roelof Bottema, 1997). На Рисунке 5 приведены средние величины по этим подвыборкам для модели максимального диска. Видно, что для LSB-подвыборки, как и должно быть, вклад темного вещества заметно выше и согласуется с проведенной зависимостью, тогда как для HSB - в три раза меньше (характерный разброс в обоих случаях порядка самой величины). При этом для генеральной совокупности галактик значение, скорее всего, лежит между указанными. При этом зависимость на Рисунке 5, вообще говоря, проведена с точностью до константы, как следует из (10), которая получается порядка двойки, чтобы согласие с объектами на $z = 0$ было хорошим. Отметим также, что в N-body моделях стандартным отношением $M_{tot}/M_d - 1$ в пределах $4h$ считается $1.5 - 3$ (Smirnov и Natalia Ya Sotnikova, 2018), что также хорошо согласуется с такой константой (отношение NFW-гало-диск подрастает на 25% с $4h$ к $5h$ при $R_s/h = 5$).

4 Обсуждение

Как видно из предыдущего раздела, оценки массовой доли темного гало, сделанные с помощью нового метода, хорошо согласуются с ожидаемыми из литературы. При этом, безусловно, сам метод работает только в усредненном статистическом смысле и может довольно сильно ошибаться в отдельных случаях.

Так, например, использование зависимости Талли-Фишера, полученной для локальных галактик, может быть необоснованно для заметно более далеких объектов, где соотношение может быть иным. Тут можно сослаться на результаты Übler, Förster Schreiber и др., 2017, где показано, что зависимость Талли-Фишера не сильно меняется до по крайней мере $z \sim 2.5$.

Хороший способ проверить нашу работу - это сделать грубые оценки на кинематику галактик и сравнить их с ожидаемыми. Из массовой модели галактики в работе оцениваются V_{rot} и σ_z, с

помощью которых можно оценить полную дисперсию скоростей звезд σ и отношение V/σ, которое показывает, насколько регулярное вращение в галактике преобладает. Для этого в формулу для эллипсоида скоростей

$$\sigma^2 = \sigma_z^2 + \sigma_R^2 + \sigma_\varphi^2 \tag{12}$$

нужно подставить σ_z – дисперсию скоростей в вертикальном направлении, σ_R – дисперсию скоростей в радиальном направлении, σ_φ – дисперсию скоростей в азимутальном направлении. Отношение $\sigma_z/\sigma_R = 0.6$ взято, как и ранее, постоянным (N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2003; N. Ya. Sotnikova и Rodionov, 2006), а для отношения σ_φ/σ_R верно в эпициклическом приближении следующее выражение Binney и Tremaine, 2008:

$$\frac{\sigma_\varphi^2(R)}{\sigma_R^2(R)} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{\partial ln\overline{v}_\varphi}{\partial lnR}\right). \tag{13}$$

Производная $\partial ln\overline{v}_\varphi/\partial lnR$ при выходе кривой вращения на плато близко к нулю и ею можно пренебречь. Такая грубая оценка полной дисперсии скоростей звезд в галактиках выборки растет с увеличением красного смещения и хорошо согласуется, например, с графиком в работе Übler, Genzel и др., 2019. Стоит однако отметить, что рост дисперсии с красным смещением может быть следствием наблюдательной селекции, так как для более массивных галактик значение дисперсий, как полной, так и вертикальной, растет. При этом с увеличением красного смещения возможно наблюдать только более массивные в среднем галактики.

При этом отношение V/σ с красным смещением падает. "Холодные" диски (высокие V/σ) ожидаются в богатых газом галактиках с активным звездообразованием, где преобладает вращение. "Горячие" диски (низкие V/σ) ожидаются в системах, нагретых в результате слияний или из-за медленного перераспределения энергии и массы, которое происходит из-за взаимодействий с барами, спиралями или темным гало (см. Toomre, 1964, Binney и Tremaine, 2008). Результаты показывают, что отношение V/σ увеличивается с течением времени (от $z \sim 3$ до $z = 0$), что ожидается и согласуется с аналогичным результатом из работы Wisnioski и др., 2019. Также найдено, что для более массивных галактик значение V/σ в среднем меньше, чем для менее массивных.

Таким образом, показано, что оценки кинематических параметров (V, σ, V/σ) для далеких галактик получаются разумными и согласуются с другими работами, что служит дополнительным аргументом корректности метода.

В числе прочих аргументов можно также упомянуть следующие. Как показано в Tsukui и др., 2024, зависимость отношения h/z_0 от V/σ неплохо следует теоретической квадратичной зависимости, показанной в работе Корменди J. Kormendy, 1982. Там же (рис. 13) найдено, что вертикальная дисперсия галактик в выборке согласуется с таковой для близких галактик из DiskMass Survey Martinsson, Verheijen, Westfall, Bershady, Andersen и др., 2013, Martinsson, Verheijen, Westfall, Bershady, Schechtman-Rook и др., 2013, а также с газовыми дисками (в основном, ионизованного водорода), которые напрямую связаны со звездными. Полученные данные согласуются с выводами из Tsukui и др., 2024 о том, что примерно одинаковые дисперсии скоростей между звездами и газом говорят об эффективном формировании газовыми дисками соответствующих структур с похожей толщиной. Интересным аргументом тут служит еще и тот факт, что галактики из выборки на плоскости $\log M_{halo}/M_d$ (в пределах $5h$) против $\log V_{rot}$ покрывают ту же область, что и диски близких галактик в de Blok и S. S. McGaugh, 1997 (их рис. 11, справа). Причем в указанной работе скорости оценивались из кривых вращения. Это показывает, что близкие галактики и далекие по многим параметрам похожи, а предположения - валидны.

Следует упомянуть еще некоторые соображения. Безусловно, требуется правильный учет наблюдательной селекции, хорошо заметной на Рисунке 2, но это дело будущих работ. В выражении для расчета вертикального равновесия исключается вклад темной материи, поскольку он мал, и его включение незначительно изменит расчетное значение, как и второго диска. Звездная масса включает в себя также вклад балджа, который не учитывается, поскольку балджи в выборке маленькие. Влияние угла наклона и насколько правдоподобно восстанавливается толщина диска

отдельно проверялось в Tsukui и др., 2024 (аппендиксы в статье). Коэффициент пропорциональности в исследуемой формуле, вообще говоря, не обязан быть одинаковым, но хорошее согласие с литературой, по-видимому, говорит об обратном, что параметр R_s/h в выборке меняется несильно. Вклад в полную массу помимо звездного диска и темного гало дает также атомарный и молекулярный газ, чья доля в первом приближении пропорциональна $\propto \sigma/V$ (Genzel и др., 2011), и, таким образом, вклад газа заметно больше на больших z, что стоит учитывать при интерпретации Рисунка 5.

К сожалению, ошибки в используемом выражении (10) не так-то просто оценить. Так, найти ошибку определения звездной массы из SED-моделирования в каталоге DJA не удалось, но маловероятно, что она меньше нескольких десятков процентов. Ошибки в определении параметров декомпозиции чаще всего значительные из-за влияния пыли (Savchenko и др., 2023), что здесь не должно сильно сказываться из-за удачного выбора фильтров JWST. Тем не менее, imfit не позволяет корректно оценить ошибки, и очень маленькие процитированные в Tsukui и др., 2024 (таблица D1) величины ошибок скорее всего занижены. Величина скорости V_{rot} при этом, скорее всего, ограничивается довольно хорошо, поскольку хоть показатель степени в соотношении Талли-Фишера и варьируется в широких пределах 3.5-4.3, но не настолько велик, и, скорее всего, неточность тут определяется ошибкой определения самой звездной массы. Наконец, отношение дисперсий σ_z/σ_R ограничивается довольно хорошо с разбросом в 30%. Таким образом, суммарную ошибку определения полной массы можно оценить в 50%-60%, что сравнимо или лучше исходной оценки из Zasov, D. V. Bizyaev и др., 2002, где σ_z/σ_R входит во второй степени.

Наконец, кратко обсудим зависимость, показанную на Рисунке 5, что общая масса подрастает в ~ 1.5 раза с $z = 3$. Вклад газа, который меняется с $f_g \sim 50\%$ до приблизительно $f_g \sim 5\% - 10\%$ на протяжении этих эпох (Scoville и др., 2023), не достаточен для объяснения наблюдаемого роста, хоть и может значительно “спрямить” тренд. Подобный результат может быть объяснен с точки зрения ожидаемых процессов адиабатического поджатия темного гало к центру (Blumenthal и др., 1986). При условии одинакового начального удельного углового момента гало и диска, рост размеров диска приводит к “поджатию” гало к центру галактики и отличию от формы NFW-профиля. Помимо сохранения углового момента, должны также сохраняться и остальные т.н. переменные действия (Young, 1980; Sellwood и Stacy S. McGaugh, 2005). Величина эффекта, как и его наличие, по-прежнему обсуждаются в литературе, но позволяют, например, лучше подгонять кривую вращения (Li и др., 2022). Возможно также, что найденная зависимость, если подтвердится, обусловлена вековыми процессами совместной эволюции, или же ростом размера диска (и, соответственно, h), который без поджатия просто начинает дотягиваться до более далекой части гало (van der Wel и др., 2014).

5 Заключение

В работе предложен новый способ уточнить оценку вклада темного гало на основе декомпозиции галактик, видимых с ребра. Новый способ не предполагает постоянство параметра Тумре Q, а дает оценку (10), которая меняется с ростом расстояния до центра галактики, причем этот рост хорошо согласуется с ожидаемым для теоретического профиля темного гало (Рисунок 1). Была исследована выборка из Tsukui и др., 2024, включающая в себя 60 далеких галактик с одним диском, расположенных вплоть до $z \sim 3$. Показано, что с увеличением массы диска галактики растет и масса гало до $\sim 10^{12} M_\odot$, где масса гало перестает сильно увеличиваться (Рисунок 3). В этих и других аспектах проделанная работа хорошо согласуется с литературой, в том числе, в оценках кинематики. Впервые показано, что отношение полной массы к массе диска M_{tot}/M_d в пределах $5h$ (пять экспоненциальных радиусов) уменьшается с увеличением красного смещения (Рисунок 5). Найденный результат может быть важным независимым свидетельством процессов перераспределения темной массы на космологических временах, например вследствие адиабатического поджатия гало к центру галактик. Дальнейшие исследования должны помочь определить, какой именно процесс ответственен за наблюдаемый эффект, если он подтвердится, и как

подобные изменения сказываются на эволюции этих объектов.

Благодарности

Авторы благодарят Российский Научный Фонд (грант 24-72-10084), откуда брались данные сравнения, а также авторов шаблона «Известий». Некоторые из представленных здесь данных были получены из архива Dawn JWST (DJA), проект Cosmic Dawn Center (DAWN).

Список литературы

Freeman, K. C. (1970). On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. ApJ 160, 811.

de Grijs, R. и P. C. van der Kruit (1996). Structure analysis of edge-on spiral galaxies. A&AS 117, 19—37.

van der Kruit, P. C. и L. Searle (1981). Surface photometry of edge-on spiral galaxies. I - A model for the three-dimensional distribution of light in galactic disks. A&A 95, 105—115.

Karachentsev, I. D., V. E. Karachentseva, Yu. N. Kudrya, M. E. Sharina и S. L. Parnovskij (1999). The revised Flat Galaxy Catalogue. *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory* 47, 5—185. arXiv: astro-ph/0305566 [astro-ph].

Mosenkov, A. V., N. Ya. Sotnikova и V. P. Reshetnikov (2010). 2MASS photometry of edge-on spiral galaxies - I. Sample and general results. MNRAS 401.1, 559—576. arXiv: 0909.1263 [astro-ph.CO].

Bizyaev, D. V. и др. (2014). The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks. ApJ 787.1, 24. arXiv: 1404.3072 [astro-ph.GA].

Makarov, D. и др. (2022). The edge-on Galaxies in the Pan-STARRS survey (EGIPS). MNRAS 511.2, 3063—3075. arXiv: 2201.08888 [astro-ph.GA].

Usachev, Pavel A., Vladimir P. Reshetnikov и Sergey S. Savchenko (2024). Edge-on galaxies in the HST COSMOS field: the evolution of stellar discs up to z 0.5. MNRAS 529.1, L78—L82. arXiv: 2401.05852 [astro-ph.GA].

Hamilton-Campos, Kathleen A., Raymond C. Simons, Molly S. Peeples, Gregory F. Snyder и Timothy M. Heckman (2023). The Physical Thickness of Stellar Disks to z $\sim$ 2. ApJ 956.2, 147. arXiv: 2303.04171 [astro-ph.GA].

Lian, Jianhui и Li Luo (2024). The Thickness of Galaxy Disks from z = 5 to 0 Probed by JWST. ApJ 960.2, L10. arXiv: 2312.07070 [astro-ph.GA].

Tsukui, Takafumi, Emily Wisnioski, Joss Bland-Hawthorn и Ken Freeman (2024). The emergence of galactic thin and thick discs across cosmic history. *arXiv e-prints*, arXiv:2409.15909. arXiv: 2409.15909 [astro-ph.GA].

Yan, Haojing, Bangzheng Sun и Chenxiaoji Ling (2024). An Edge-on Regular Disk Galaxy at z = 5.289. ApJ 975.1, 44. arXiv: 2407.04209 [astro-ph.GA].

Zasov, A. V., D. I. Makarov и E. A. Mikhailova (1991). Thickness of Thin Stellar Disks and the Mass of the Dark Halo. *Soviet Astronomy Letters* 17, 374.

Zasov, A. V., D. V. Bizyaev, D. I. Makarov и N. V. Tyurina (2002). Relationship between the Thickness of Stellar Disks and the Relative Mass of a DarkGalactic Halo. *Astronomy Letters* 28, 527—535. arXiv: astro-ph/0208124 [astro-ph].

Khoperskov, A. V., A. V. Zasov и N. V. Tyurina (2001). Estimating the Masses of the Spherical and Disk Components of Galaxies via Numerical Simulations. *Astronomy Reports* 45.3, 180—194.

Sotnikova, N. Ya. и S. A. Rodionov (2003). Mechanisms of the Vertical Secular Heating of a Stellar Disk. *Astronomy Letters* 29, 321—335. arXiv: astro-ph/0304215 [astro-ph].

— (2006). Estimating the dark halo mass from the relative thickness of stellar disks. *Astronomy Letters* 32.10, 649—660. arXiv: astro-ph/0609163 [astro-ph].

Zasov, A. V., A. V. Khoperskov и A. S. Saburova (2011). Gravitational stability and dynamical overheating of galactic stellar disks. *Astronomy Letters* 37.6, 374—384. arXiv: 1010 . 5179 [astro-ph.CO].

Bottema, R. (1993). The stellar kinematics of galactic disks. A&A 275, 16—36.

Kostiuk, V. S., A. S. Gusev, A. A. Marchuk и E. V. Shimanovskaya (2025). Gravitational instability and spatial regularity of the gas clouds and young stellar population in spiral arms of NGC 628. A&A 698, L6. arXiv: 2505.05699 [astro-ph.GA].

Marchuk, A. A. (2018). Gravitational instability and star formation in NGC 628. MNRAS 476.3, 3591—3599. arXiv: 1804.07964 [astro-ph.GA].

Marchuk, A. A. и N. Y. Sotnikova (2018). Two-component gravitational instability in spiral galaxies. MNRAS 475.4, 4891—4910. arXiv: 1804.07962 [astro-ph.GA].

Übler, H., R. Genzel и др. (2019). The Evolution and Origin of Ionized Gas Velocity Dispersion from z ∼ 2.6 to z ∼ 0.6 with KMOS^{3D}. ApJ 880.1, 48. arXiv: 1906.02737 [astro-ph.GA].

Di Teodoro, Enrico M., Lorenzo Posti, Patrick M. Ogle, S. Michael Fall и Thomas Jarrett (2021). Rotation curves and scaling relations of extremely massive spiral galaxies. MNRAS 507.4, 5820—5831. arXiv: 2109.03828 [astro-ph.GA].

Marchuk, Alexander A. (2024). Resonance coupling in spiral arms. Patterns for flat rotation curve. A&A 686, L14. arXiv: 2405.14483 [astro-ph.GA].

Toomre, A. (1964). On the gravitational stability of a disk of stars. ApJ 139, 1217—1238.

Gerssen, Joris, Konrad Kuijken и Michael R. Merrifield (2000). Disc heating in NGC 2985. MNRAS 317.3, 545—549. arXiv: astro-ph/0005454 [astro-ph].

Mogotsi, Keoikantse Moses и Alessandro B. Romeo (2019). The stellar velocity dispersion in nearby spirals: radial profiles and correlations. MNRAS 489.3, 3797—3809. arXiv: 1804.10119 [astro-ph.GA].

Marchuk, A. A. и N. Y. Sotnikova (2017). Reconstructing the velocity dispersion profiles from the line-of-sight kinematic data in disc galaxies. MNRAS 465.4, 4956—4967. arXiv: 1702.07687 [astro-ph.GA].

Shapiro, Kristen L., Joris Gerssen и Roeland P. van der Marel (2003). Observational Constraints on Disk Heating as a Function of Hubble Type. AJ 126.6, 2707—2716. arXiv: astro-ph/0308489 [astro-ph].

Polyachenko, V. L. и I. G. Shukhman (1977). *Pis'ma Astron. Zh.* 254.3.

Sofue, Yoshiaki (2017). Rotation and mass in the Milky Way and spiral galaxies. PASJ 69.1, R1. arXiv: 1608.08350 [astro-ph.GA].

Navarro, Julio F., Carlos S. Frenk и Simon D. M. White (1996). The Structure of Cold Dark Matter Halos. ApJ 462, 563. arXiv: astro-ph/9508025 [astro-ph].

Sofue, Yoshiaki (2012). Grand Rotation Curve and Dark Matter Halo in the Milky Way Galaxy. PASJ 64, 75. arXiv: 1110.4431 [astro-ph.GA].

Brammer, Gabriel (2023). *grizli*.

Rieke, Marcia J. и др. (2023). JADES Initial Data Release for the Hubble Ultra Deep Field: Revealing the Faint Infrared Sky with Deep JWST NIRCam Imaging. ApJS 269. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2023ApJS..269...16R, 16.

Oesch, P. A. и др. (2023). The JWST FRESCO survey: legacy NIRCam/grism spectroscopy and imaging in the two GOODS fields. MNRAS 525. Publisher: OUP ADS Bibcode: 2023MNRAS.525.2864O, 2864—2874.

Bagley, Micaela B., Steven L. Finkelstein и др. (2023). CEERS Epoch 1 NIRCam Imaging: Reduction Methods and Simulations Enabling Early JWST Science Results. ApJ 946. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2023ApJ...946L..12B, L12.

Casey, Caitlin M. и др. (2023). COSMOS-Web: An Overview of the JWST Cosmic Origins Survey. ApJ 954. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2023ApJ...954...31C, 31.

Dunlop, James S. и др. (2021). PRIMER: Public Release IMaging for Extragalactic Research. *JWST Proposal. Cycle 1.* ADS Bibcode: 2021jwst.prop.1837D, 1837.

Bagley, Micaela B., Nor Pirzkal и др. (2024). The Next Generation Deep Extragalactic Exploratory Public (NGDEEP) Survey. ApJ 965. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2024ApJ...965L...6B, L6.

Bertin, E. и S. Arnouts (1996). SExtractor: Software for source extraction. A&AS 117, 393—404.

Valentino, Francesco и др. (2023). An Atlas of Color-selected Quiescent Galaxies at z > 3 in Public JWST Fields. ApJ 947.1. _eprint: 2302.10936, 20.

Brammer, Gabriel B. и др. (2012). 3D-HST Grism Spectroscopy of a Gravitationally Lensed, Low-metallicity Starburst Galaxy at z = 1.847. ApJ 758.1. _eprint: 1207.3795, L17.

Momcheva, Ivelina G. и др. (2016). The 3D-HST Survey: Hubble Space Telescope WFC3/G141 Grism Spectra, Redshifts, and Emission Line Measurements for ~ 100,000 Galaxies. ApJS 225. ADS Bibcode: 2016ApJS..225...27M, 27.

Faisst, Andreas L., Ranga Ram Chary, Gabriel Brammer и Sune Toft (2022). What Are Those Tiny Things? A First Study of Compact Star Clusters in the SMACS0723 Field with JWST. ApJ 941. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2022ApJ...941L..11F, L11.

Ito, Kei и др. (2024). Size–Stellar Mass Relation and Morphology of Quiescent Galaxies at z 3 in Public JWST Fields. ApJ 964. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2024ApJ...964..192I, 192.

Zhuang, Ming-Yang и Yue Shen (2024). Characterization of JWST NIRCam PSFs and Implications for AGN+host Image Decomposition. ApJ 962. Publisher: IOP ADS Bibcode: 2024ApJ...962..139Z, 139.

Perrin, Marshall D. и др. (2014). Updated point spread function simulations for JWST with WebbPSF. В: *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. Под ред. Jr. Oschmann Jacobus M., Mark Clampin, Giovanni G. Fazio и Howard A. MacEwen. T. 9143. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 91433X.

Erwin, Peter (2015). IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting. ApJ 799.2. _eprint: 1408.1097, 226.

Marchuk, Alexander A., Ilia V. Chugunov, Frédéric Galliano и др. (2025). Accurate Decomposition of Galaxies with Spiral Arms: Dust Properties and Distribution. *Galaxies* 13.2, 39. arXiv: 2504.05839 [astro-ph.GA].

Marchuk, Alexander A., Ilia V. Chugunov, George A. Gontcharov и др. (2024). Galaxies decomposition with spiral arms - II. A multiwavelength case study of M 51. MNRAS 528.2, 1276—1295. arXiv: 2402.08531 [astro-ph.GA].

Chugunov, Ilia V., Alexander A. Marchuk, Aleksandr V. Mosenkov и др. (2024). Galaxies decomposition with spiral arms - I: 29 galaxies from S^4G. MNRAS 527.4, 9605—9624. arXiv: 2311.01848 [astro-ph.GA].

Chugunov, Ilia V., Alexander A. Marchuk и Aleksandr V. Mosenkov (2025). Less wound and more asymmetric: JWST confirms the evolution of spiral structure in galaxies at $z \lesssim 3$. PASA 42, e029. arXiv: 2501.11670 [astro-ph.GA].

Kormendy, John и Jr. Kennicutt Robert C. (2004). Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. ARA&A 42.1. _eprint: astro-ph/0407343, 603—683.

Reshetnikov, Vladimir P. и др. (2025). Galactic warps: From cosmic noon to the current epoch. A&A 697, L1. arXiv: 2504.12403 [astro-ph.GA].

Bizyaev, Dmitry и Sofia Mitronova (2009). Structural Parameters of Stellar Disks from two Micron All Sky Survey Images of Edge-on Galaxies. ApJ 702.2. _eprint: 0907.3472, 1567—1574.

Behroozi, Peter S., Risa H. Wechsler и Charlie Conroy (2013). The Average Star Formation Histories of Galaxies in Dark Matter Halos from z = 0-8. ApJ 770.1, 57. arXiv: 1207.6105 [astro-ph.CO].

Shuntov, M. и др. (2022). COSMOS2020: Cosmic evolution of the stellar-to-halo mass relation for central and satellite galaxies up to $z \sim 5$. A&A 664, A61. arXiv: 2203.10895 [astro-ph.GA].

de Blok, W. J. G. и S. S. McGaugh (1997). The dark and visible matter content of low surface brightness disc galaxies. MNRAS 290.3, 533—552. arXiv: astro-ph/9704274 [astro-ph].

Bottema, Roelof (1997). The maximum rotation of a galactic disc. A&A 328, 517—525. arXiv: astro-ph/9706230 [astro-ph].

Smirnov, Anton A. и Natalia Ya Sotnikova (2018). What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? MNRAS 481.3, 4058—4076. arXiv: 1809.06167 [astro-ph.GA].

Übler, H., N. M. Förster Schreiber и др. (2017). The Evolution of the Tully-Fisher Relation between $z \sim 2.3$ and $z \sim 0.9$ with $KMOS^{3D}$. ApJ 842.2, 121. arXiv: 1703.04321 [astro-ph.GA].

Binney, James и Scott Tremaine (2008). *Galactic Dynamics: Second Edition*.

Wisnioski, E. и др. (2019). The $KMOS^{3D}$ Survey: Data Release and Final Survey Paper. ApJ 886.2, 124. arXiv: 1909.11096 [astro-ph.GA].

Kormendy, J. (1982). Observations of Galaxy Structure and Dynamics. *Saas-Fee Advanced Course* 12, 115.

Martinsson, Thomas P. K., Marc A. W. Verheijen, Kyle B. Westfall, Matthew A. Bershady, David R. Andersen и др. (2013). The DiskMass Survey. VII. The distribution of luminous and dark matter in spiral galaxies. A&A 557, A131. arXiv: 1308.0336 [astro-ph.CO].

Martinsson, Thomas P. K., Marc A. W. Verheijen, Kyle B. Westfall, Matthew A. Bershady, Andrew Schechtman-Rook и др. (2013). The DiskMass Survey. VI. Gas and stellar kinematics in spiral galaxies from PPak integral-field spectroscopy. A&A 557, A130. arXiv: 1307.8130 [astro-ph.CO].

Genzel, R. и др. (2011). The Sins Survey of z ~2 Galaxy Kinematics: Properties of the Giant Star-forming Clumps. ApJ 733.2, 101. arXiv: 1011.5360 [astro-ph.CO].

Savchenko, Sergey S. и др. (2023). The problem of dust attenuation in photometric decomposition of edge-on galaxies and possible solutions. MNRAS 524.3, 4729—4745. arXiv: 2309.06257 [astro-ph.GA].

Scoville, Nick и др. (2023). Cosmic Evolution of Gas and Star Formation. ApJ 943.2, 82. arXiv: 2211.07836 [astro-ph.GA].

Blumenthal, G. R., S. M. Faber, R. Flores и J. R. Primack (1986). Contraction of Dark Matter Galactic Halos Due to Baryonic Infall. ApJ 301, 27.

Young, P. (1980). Numerical models of star clusters with a central black hole. I - Adiabatic models. ApJ 242, 1232—1237.

Sellwood, J. A. и Stacy S. McGaugh (2005). The Compression of Dark Matter Halos by Baryonic Infall. ApJ 634.1, 70—76. arXiv: astro-ph/0507589 [astro-ph].

Li, Pengfei, Stacy S. McGaugh, Federico Lelli, James M. Schombert и Marcel S. Pawlowski (2022). Incorporating baryon-driven contraction of dark matter halos in rotation curve fits. A&A 665, A143. arXiv: 2208.04326 [astro-ph.GA].

van der Wel, A. и др. (2014). 3D-HST+CANDELS: The Evolution of the Galaxy Size-Mass Distribution since z = 3. ApJ 788.1, 28. arXiv: 1404.2844 [astro-ph.GA].

doi:10.31725/0367-7966-2025-237-33-50

Estimating the contribution of a dark halo at different distances in the disk of an edge-on galaxy

A.A. Marchuk[1,2], M.D. Kozlov[2]

[1] The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo , [2]Saint Petersburg State University

Received 17 June 2025 / Accepted 17 July 2025

Abstract

Edge-on or nearly edge-on galaxies allow direct measurements of their disk thicknesses. It is known that the ratio of the radial to vertical disk scales can be directly related to the mass fraction of dark matter within the disk via the Toomre parameter and the squared ratio of the stellar radial to vertical dispersions. Thus, for edge-on galaxies, the dark halo mass can be independently estimated, but this requires knowing the proportionality coefficient. This paper shows how the estimate can potentially be refined using only a single IR image of the galaxy (to find the mass) and additional conditions (Tully-Fisher relation, disk equilibrium in the vertical direction). Moreover, the proportionality coefficient dependence on the distance R follows the theoretical expectation (the NFW profile is used in the paper) and allows one to reconstruct the parameters of the dark halo itself. Preliminary results of applying the method to a sample of distant galaxies (up to $z \sim 3$) obtained from JWST observations are demonstrated. It is shown that for these galaxies the dark halo mass is larger with new method, and it and other parameters are in good agreement with the literature. It is found that the fraction of the dark halo mass relative to the disk mass within five exponential scales increases toward the present epoch, which may be a sign of the expected adiabatic contraction of the dark halo toward the center.

key words: edge-on galaxies; JWST observations; dark halo; galactic disks