



Диски галактик в EAGLE: как меняются и эволюционируют их изломы?

А.Д. Панасюк¹^{*}, А.А. Смирнов¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 3 октября 2025 / Принята к публикации 12 октября 2025

Аннотация

Значительная доля наблюдаемых дисковых галактик как в ближней, так и в дальней Вселенной демонстрирует изломы в радиальных профилях поверхностной яркости и/или звёздной массы дисков. За последние два десятилетия благодаря проектам обширных и глубоких обзоров неба удалось накопить наблюдательную базу, которая позволила получить статистику по параметрам изломов в профилях дисков. Однако в астрономическом сообществе до сих пор нет единого мнения о том, в какой период жизни галактики образуются изломы и как они эволюционируют на космологических временных масштабах (порядка нескольких миллиардов лет). В последние годы для изучения долговременной эволюции галактик в астрономическом сообществе стали активно применяться космологические симуляции. В таких симуляциях путем задания космологической модели и физики взаимодействия тёмной и барионной материй удастся воспроизводить и проследивать эволюцию модельных галактик морфологически и динамически близких к наблюдаемым. В рамках данного исследования была выполнена двумерная декомпозиция профилей поверхностной яркости и звёздной плотности 32 модельных галактик из симуляции высокого разрешения Recal-L025N0752 космологического обзора EAGLE на различных красных смещениях вплоть до $z = 3$. Средний шаг по времени составил ~ 700 млн лет. Получены статистические распределения по типам, времени жизни, моментам формирования, положениям и силам изломов. Кроме того, установлено, что изломы могут возникать и исчезать в процессе эволюции галактик. На основе сравнительного анализа модельных галактик с барами и без было найдено, что наличие или отсутствие излома не связано с наличием в галактике бара.

ключевые слова: галактики, звёздный диск, космологические симуляции

Введение

В настоящее время установлено, что большинство дисковых галактик ближней Вселенной имеют изломы в радиальных профилях поверхностной яркости (M. Pohlen, I. Trujillo, 2006; Tang *et al.* 2020). Преобладание галактик с изломами также наблюдается и на больших красных смещениях, вплоть до $z = 3$ (Azzollini, I. Trujillo, J. E. Beckman, 2008; Xu, Yu, 2024). По наличию изломов и распределению поверхностной яркости радиальные профили дисков принято делить на три основных типа (Peter Erwin, John E. Beckman, Michael Pohlen, 2005; M. Pohlen, P. Erwin *et al.* 2008). К первому типу профиля (ТИ) принято относить галактики без изломов в радиальном профиле. Ко второму типу профилей (ТII) относят галактики с нисходящим профилем яркости после положения излома (down-bending). К третьему типу (ТIII) относят галактики с более высоким профилем яркости после излома (up-bending). Также в галактиках встречаются профили с несколькими изломами. В таком случае все изломы обозначаются в последовательности от центра галактики, например, ТIII+ТII. Помимо профилей яркости, изломы также обнаруживаются и в радиальных профилях звёздной массы (Bakos, Ignacio Trujillo, Michael Pohlen, 2008, Tang *et*

^{*}e-mail:panasyu.andrej@yandex.ru

al. 2020). Для профилей ТІ и ТІІІ профили звёздной массы, как правило, сходны с профилями поверхностной яркости, в то время как для профилей ТІІ изломы в массе могут вовсе отсутствовать. В настоящее время предложен ряд механизмов для описания процессов формирования изломов различных типов.

Среди основных механизмов, объясняющих формирование изломов второго типа (ТІІ), рассматриваются перераспределение углового момента при сжатии протогалактического облака (van der Kruit, 1987; van der Kruit, 1988), падение темпов звёздообразования во внешних областях галактики (Schaye, 2004; Elmegreen, Hunter, 2006), звёздные миграции, вызванные действием бара (Debattista *et al.* 2006; Foyle, Courteau, Thacker, 2008) и спиралей (Minchev, Famaey, 2010). Кроме того в работах Roškar *et al.* 2008 и Sánchez-Blázquez *et al.* 2009 показано, что учёт звёздной миграции позволяет объяснять отсутствие изломов в профилях звёздной массы при наличии излома в профиле яркости.

Для профилей третьего типа (ТІІІ) в настоящее время предлагается множество различных механизмов: малые слияния (Younger *et al.* 2007), большие слияния (Borlaff *et al.* 2014), столкновения с подструктурами холодной тёмной материи (Kazantzidis *et al.* 2009), асимметрия изофот в результате приливного взаимодействия (Laine *et al.* 2014), повышение темпов звёздообразования внутреннего диска (Wang *et al.* 2018), а также усиленная звёздная миграция, обусловленная воздействием сильного бара в медленно вращающихся галактиках (Herpich *et al.* 2017).

Несмотря на большое количество предложенных механизмов, в астрономическом сообществе до сих пор нет единого мнения о процессах формирования и эволюции изломов профилей дисковых галактик. Одним из возможных способов решения данных противоречий является набирающий в последнее время популярность метод исследования эволюции галактик в рамках космологических симуляций. Такие симуляции представляют собой куб со стороной от нескольких десятков до нескольких сотен Мпк с периодическими начальными условиями. В этом объёме моделируются частицы тёмной материи и газа. В рамках симуляции задаются космологическая модель и физика взаимодействия тёмной и барионной материй. Подробности о физике и реализации современных симуляций можно найти в обзоре Vogelsberger *et al.* 2020. Современные симуляции формирования и эволюции галактик способны воссоздавать большие выборки модельных галактик с хорошим пространственным разрешением и физическими характеристиками, близкими к наблюдаемым (Schaye *et al.* 2015; Nelson *et al.* 2019). Особым преимуществом данных симуляций является возможность проследивать эволюцию одной модельной галактики на различных красных смещениях и определять как меняются её параметры с течением времени.

Однако на данный момент существует только одна работа Pfeffer *et al.* 2022, в которой используются данные симуляций в полном космологическом контексте для исследования изломов в радиальном профиле дисков галактик. В этой работе были использованы две выборки высокого и среднего разрешения космологического обзора EAGLE. Выборка среднего разрешения использовалась для анализа свойств модельных галактик при $z = 0$ и изучения изменений их профилей при попадании в скопление. Для выборки галактик высокого разрешения был проведен качественный анализ изменения профилей звёздной массы на различных красных смещениях вплоть до $z = 3$.

Полученные в указанной работе результаты вызывают интерес, в частности, к вопросу о том, как именно изменяются параметры изломов со временем. Также авторами не был освещён вопрос связи изломов в профилях дисков с наличием или отсутствием в галактиках бара. Поэтому в рамках настоящего исследования проводится фотометрическая декомпозиция модельных галактик EAGLE высокого разрешения с целью определения параметров бара и радиального профиля диска, а также оценивается как данные параметры меняются на различных красных смещениях.

Работа имеет следующую структуру. В разделе 1 описываются исходные данные, параметры выборки и методы обработки данных симуляции. В разделе 2 представлены полученные результаты и проводится анализ эволюции параметров профилей диска. В разделе 3 делаются основные выводы и подводятся итоги настоящей работы.

1 Данные и методы

1.1 Симуляция EAGLE

"Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments" (EAGLE) — это проект, представляющий собой набор космологических симуляций, описывающих формирование и эволюцию галактик в рамках концепции холодной тёмной материи с космологической постоянной Λ (Robert A. Crain *et al.* 2015; Schaye *et al.* 2015). При моделировании используются космологические параметры $\Omega_m = 0.307$, $\Omega_\Lambda = 0.693$, $\Omega_b = 0.04825$ и $\sigma_8 = 0.8288$, взятые из исследования Planck Collaboration *et al.* 2014. Моделирование проводится при помощи модифицированной гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с алгоритмом Tree-PM для N-тел, реализованной в пакете GADGET-3, который является обновленной версией GADGET-2 (Springel, 2005). Помимо гидродинамического формализма симуляции EAGLE также включают в себя подсеточные функции, выполняющие расчёт радиационного охлаждения, звёздообразования, звёздной эволюции, формирования и роста чёрных дыр. Физика обратной связи от звёзд и чёрных дыр калибруется таким образом, чтобы функция масс галактик, их размеры и массы чёрных дыр соответствовали наблюдательным данным при $z \approx 0$ (Robert A. Crain *et al.* 2015). Симуляции EAGLE способны воспроизводить многие свойства галактик, такие как функция звёздных масс (Furlong, Bower, Theuns *et al.* 2015), удельные скорости звёздообразования (Schaye *et al.* 2015), размеры (Furlong, Bower, R. A. Crain *et al.* 2017), цвета (Trayford *et al.* 2017), морфология (Bignone *et al.* 2019).

Субгало модельных галактик и групп галактик в симуляции идентифицируются с помощью алгоритмов friends-of-friends (FoF) (Davis *et al.* 1985) и SUBFIND (Springel *et al.* 2001). Отслеживание эволюции отдельных галактик во времени выполняется путём анализа деревьев слияний. Деревья слияний и параметры гало модельных галактик доступны в базе данных EAGLE (McAlpine *et al.* 2016).

В данной работе использовалась симуляция EAGLE высокого разрешения *Recal-L025N0752*. Моделируемый объём представляет собой куб с периодическими граничными условиями. Сторона куба составляет 25 Мпк в сопутствующих координатах. Объём изначально содержит по 752^3 частиц газа и тёмной материи. Масса барионной частицы $2.26 \cdot 10^5 M_\odot$. Максимальная длина гравитационного сглаживания 0.35 кpc.

1.2 Параметры выборки

Для выделения дисковых галактик из выборки был использован параметр k_{co} . Он соответствует доле кинетической энергии, заключенной в соосном вращении (Correa, Schaye *et al.* 2017; Thob *et al.* 2019). В работе Correa, Schaye *et al.* 2017 показано, что данный параметр связан с морфологическим типом модельных галактик в EAGLE. Низкие значения параметра ($k_{co} \sim 0.2$) характерны для эллиптических галактик, в то время как большие значения параметра ($k_{co} \sim 0.7$) — для дисковых. К дисковым мы относили галактики у которых $k_{co} > 0.4$. При таком выборе порогового значения в нашей выборке присутствуют как линзовидные галактики ($k_{co} \approx 0.4$), так и галактики поздних типов ($k_{co} > 0.6$) (Correa, Schaye, 2020).

Для исследования изломов в профилях поверхностной яркости нам необходимо высокое пространственное разрешение модельных галактик выборки. Для достижения этой цели были отобраны галактики со звёздной массой $M_* > 10^{10} M_\odot$. Это обеспечивает разрешение свыше $7 \cdot 10^4$ звёздных частиц на галактику при $z = 0$. Данные критерии позволили отобрать 32 галактики высокого разрешения. Их эволюция была прослежена вплоть до $z = 3$. Средний шаг по времени между снимками (снэпшотами) составляет около 0.7 млрд лет.

1.3 Первичная обработка

Для сравнения модельных галактик с наблюдательными данными необходимо построение профилей поверхностной яркости и звёздной массы. Для построения профилей массы использовался

пакет `pybody` (Pontzen *et al.* 2013), предназначенный для анализа данных SPH и N-body симуляций. Двумерные профили звёздной массы строились путём сглаживания с ядром Wendland C2 (Wendland, 1995) с последующим интегрированием вдоль луча зрения. В качестве длины сглаживания использовалось расстояние до 64-й ближайшей звёздной частицы в соответствии с методикой, описанной в работе Trayford *et al.* 2017.

Для построения профилей поверхностной яркости использовался код SKIRT, выполняющий расчёт переноса излучения в галактиках методом Монте-Карло (Maarten Baes, Davies *et al.* 2003; Maarten Baes, Verstaappen *et al.* 2011; Camps, M. Baes, 2015). Этот пакет часто применяется при построении изображений по данным космологических симуляций (Trayford *et al.* 2017; Maarten Baes, Gebek *et al.* 2024; Karoor *et al.* 2021). При построении изображений использовались модель звёздной популяции GALAXEV (Bruzual, Charlot, 2003) и начальная функция масс (IMF) Chabrier, 2003. Данная модель хорошо воспроизводит наблюдаемую функцию светимости галактик в оптическом диапазоне вплоть до красных смещений $z = 3$ (Gonzalez-Perez *et al.* 2014). Из данных симуляции EAGLE извлекались значения возраста, металличности, и начальной массы звёздных частиц. В данной работе строились изображения в фильтре SDSS r без учёта влияния пыли. Разрешение итоговых изображений было выбрано 0.2 кпк/пиксель.

Чтобы минимизировать влияние вертикальной структуры галактики на радиальный профиль, перед построением изображений выполнялась коррекция ориентации и приведение всех галактик в положение "плашмя". Для этого вычислялся полный момент импульса всех звёздных частиц в пределах от 2.5 до 30 кпк от центра галактики. Пределы выбраны согласно работе Trayford *et al.* 2017 так, чтобы во вращении преобладала дисковый компонент, а не область центральной выпуклости. Данный алгоритм эффективно ориентирует галактики на малых красных смещениях, однако для далёких объектов часть галактик оказывалась повернута не до конца. К таким галактиками применялась дополнительная коррекция, основанная на расчёте тензора инерции звёздных частиц, в соответствии с методикой, описанной в работе Thob *et al.* 2019. В качестве примера на рисунке 1 представлены итоговое распределение звёздной плотности и цветное изображение в фильтрах SDSS g, r, i для модельной галактики ID 1437151. Цветные изображения строились в соответствии с методом, предложенным в работе Lupton *et al.* 2004.

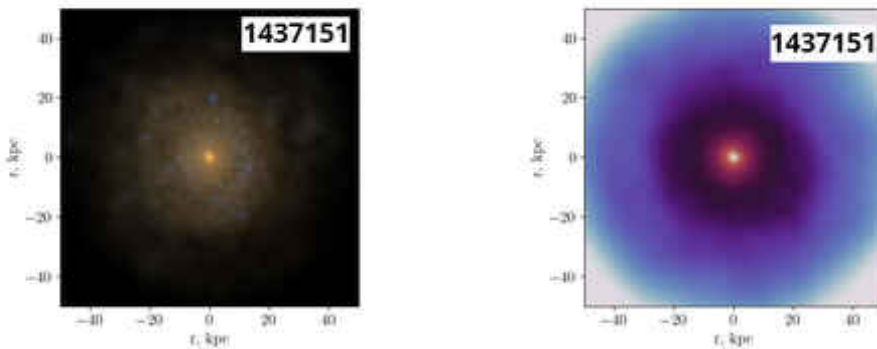


Рис. 1: Распределение поверхностной яркости (слева) и звёздной плотности (справа) для модельной галактики ID 1437151 на $z = 0$. Цветное изображение построено в фильтрах SDSS gri .

1.4 Поиск галактик с барами

В рамках исследования была отдельно выделена подвыборка галактик с баром. Идентификация бара и определение его параметров проводились в соответствии с методикой, описанной в работе Rosas-Guevara *et al.* 2022. Проводился Фурье-анализ распределение звёздной массы галактики, ориентированной в положение "плашмя". Вычислялись амплитуда A_2 и фаза Φ_2 второй Фурье-гармоники внутри концентрических цилиндрических оболочек радиуса R , шириной 0.1 кпк и

высотой 1 кпк над плоскостью диска

$$A_2(R) = \frac{\left| \sum_j m_j e^{2i\theta_j} \right|}{\sum_j m_j}, \quad \Phi_2(R) = \frac{1}{2} \arctan \left[\frac{\sum_j m_j \sin(2\theta_j)}{\sum_j m_j \cos(2\theta_j)} \right], \quad (1)$$

где суммирование происходит по всем звёздным частицам внутри оболочки радиуса R . m_j — масса частиц, θ_j — азимутальный угол частиц в плоскости диска. При значении максимума $A_2 > 0.15$ считалось, что в галактике есть бар. Под размером бара принималось максимальное расстояние на котором стандартное отклонение фазы второй гармоники не превышает 0.1. В качестве примера на рисунке 2 представлена модельная галактика ID 866129, в которой обнаружен бар.

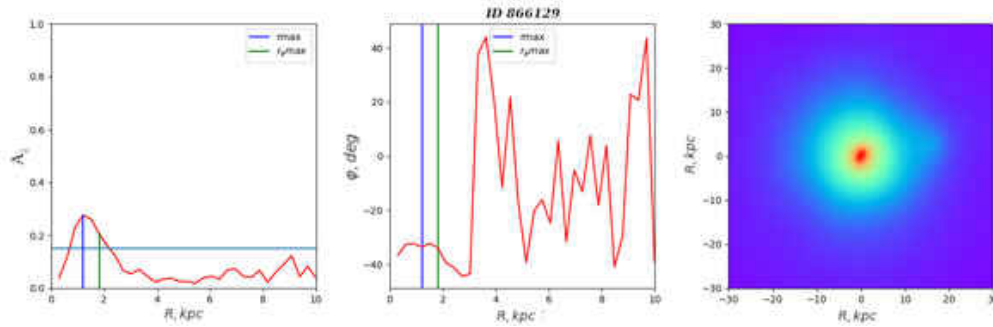


Рис. 2: Анализ бара в галактике ID 866129. Слева изображен график второй Фурье-гармоники в зависимости от радиуса. Горизонтальной линией показан порог обнаружения бара 0.15. В центре график фазы второй Фурье гармоники в зависимости от радиуса. Синяя вертикальная линия на обоих графиках отмечает максимум A_2 . Зелёная вертикальная линия на обоих графиках отмечает размер бара, на котором стандартное отклонение $\sigma_{\Phi_2} < 0.1$. Справа изображено двумерное распределение массы в модельной галактике.

1.5 Анализ

Фотометрическая декомпозиция компонент модельных галактик выполнялась с использованием пакета IMFIT (Peter Erwin, 2015). Этот пакет предназначен для фотометрической декомпозиции изображений галактик путём подбора параметров встроенных моделей. Поиск оптимальных значений параметров компонент (диска, балджа, бара) осуществляется с помощью алгоритма Левенберга – Марквардта (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963). Однако для корректной работы метода необходимы хорошие начальные приближения параметров. Для их получения выполнялась одномерная декомпозиция радиальных профилей в соответствии с методикой, описанной в работе Wang *et al.* 2018.

Для проведения одномерной декомпозиции радиальный профиль галактики строился с использованием программы IRAF.Ellipse (Jedrzejewski, 1987). На первом этапе профиль строился со свободно меняющимися эллиптичностью и позиционным углом для определения параметров ориентации изофот. Во второй раз профиль строился с фиксированными значениями позиционного угла и эллиптичности, усреднёнными вблизи 25-й изофоты.

Полученный профиль сглаживается скользящим средним (boxcar filter) с шириной окна 5 пикселей, после чего вычисляется вторая производная по радиусу для сглаженного профиля логарифма поверхностной яркости $\frac{d^2 \log(I)}{dr^2}$. К полученному профилю второй производной применяется процедура 3σ – clipping и определяется стандартное отклонение σ_{der} . Определяется радиус r_{in} , внутри которого $\frac{d^2 \log(I)}{dr^2} < \sigma_{der}$. Область внутри круга радиуса r_{in} считается областью преобладания центрального компонента. Внешний радиус галактики определяется как радиус 27й

изофоты r_{27} для сопоставления профилей с данными реальных наблюдений по данным SDSS, как, например, в работе M. Pohlen, I. Trujillo, 2006. Между радиусами r_{in} и r_{27} выполняется поиск изломов профилей диска по итеративной схеме, подробно описанной в работе Wang *et al.* 2018. По найденным изломам одномерный профиль приближается моделью из работы Laine *et al.* 2014:

$$I(r) = SI_0 e^{-\frac{r}{h_1}} \prod_{i=2}^{i=n} \left(\left(1 + e^{\alpha_{i-1,i}(r-r_{i-1,i})} \right)^{\frac{1}{\alpha_{i-1,i} \left(\frac{1}{h_{i-1}} - \frac{1}{h_i} \right)}} \right), \quad (2)$$

где S — нормирующий множитель, I_0 — яркость в центре диска, h_{i-1} и h_i — масштабы диска до и после излома, $r_{i-1,i}$ — i -й излом профиля, $\alpha_{i-1,i}$ — параметр, отвечающий за форму (гладкость) излома.

В случае отсутствия изломов профиль приближается экспоненциальным законом (Freeman, 1970):

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{r}{h}} \quad (3)$$

Полученная модель диска вычитается из профиля и выполняется приближение остатка в центральной области при помощи профиля Сёрсика (Sérsic, 1963):

$$I(r) = I_e e^{-\nu_n \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где r_e — эффективный радиус, I_e — поверхностная яркость на эффективном радиусе, n — индекс Сёрсика, ν_n — нормировочный коэффициент, получаемый из уравнения $\gamma(2n; \nu_n) = \frac{1}{2}\Gamma(2n)$.

В качестве параметров ориентации диска использовались эллиптичность и позиционный угол, усреднённые вблизи 25-й изофоты. Для балджа параметры ориентации определялись усреднением вблизи эффективного радиуса r_e .

Полученные параметры диска и балджа используются в качестве начальных приближений для двумерной декомпозиции. При двумерной декомпозиции используются те же модели диска и балджа, что и при одномерной. В тех случаях, когда это необходимо, к модели добавляется бар, описываемый профилем Феррера (Ferrers, 1877):

$$I(m) = \begin{cases} I_0(1 - m^2)^n & m < 1 \\ 0 & m \geq 1, \end{cases} \quad (5)$$

где $m^2 = (|x|/a)^{c_0+2} + (|y|/b)^{c_0+2}$. a, b — полуоси эллипса, n — параметр формы бара, c_0 — параметр, отвечающий за форму изофот.

Для всех галактик проводился визуальный осмотр результатов декомпозиции. Пример двумерной декомпозиции для модельной галактики ID 780704 представлен на рисунке 3.

2 Результаты

Была выполнена фотометрическая декомпозиция 32 модельных галактик космологического обзора EAGLE для различных красных смещений вплоть до $z=3$. Всего было проанализировано 540 изображений модельных галактик. Четыре кадра были исключены из анализа из-за проблем с исходными данными.

2.1 Статистика

По результатам фотометрического анализа было получено распределение галактик по типам радиальных профилей поверхностной яркости в зависимости от красного смещения. Это распределение представлено на рисунке 4. При подсчёте статистики для галактик с двумя изломами учитывались оба излома.

Анализ рисунка позволяет сделать следующие выводы. Первые галактики с изломами в дисках появляются уже при $z \approx 3$, а их доля возрастает с уменьшением красного смещения. Для

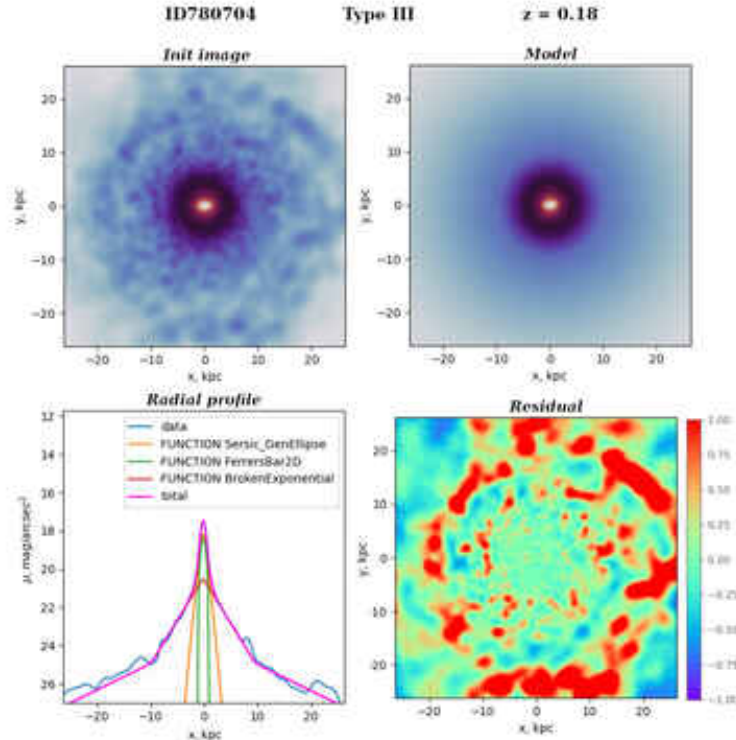


Рис. 3: Результат двумерной фотометрической декомпозиции для модельной галактики ID 780704 на $z=0.18$. В левом верхнем углу изображение модельной галактики в фильтре SDSS r . В правом верхнем углу фотометрическая модель, полученная в результате работы программы IMFIT. В левом нижнем углу срез профиля поверхностной яркости вдоль большой полуоси галактики. Синей линией показано распределение поверхностной яркости исходных данных. Оранжевой линией показан профиль компоненты балджа. Зеленой линией показан профиль компоненты бара. Красной линией показан профиль компоненты диска. Розовой линией отмечен суммарный профиль полученной фотометрической модели. В правом нижнем углу показано остаточное изображение после вычета модели, делённое на исходное изображение.

данной выборки модельных галактик характерна значительно меньшая доля профилей типа (ТII) по сравнению с наблюдательными данными, как на больших красных смещениях (Xu, Yu, 2024; Azzollini, I. Trujillo, J. E. Beckman, 2008), так и в близкой Вселенной (Gutiérrez *et al.* 2011; Tang *et al.* 2020).

Отметим, что для $z=0$ распределение по типам согласуется с распределением, полученным в работе Pfeffer *et al.* 2022 для галактик симуляции EAGLE Ref-L100N1504. Для сопоставимого диапазона масс и удельных темпов звездообразования в нашей выборке получены сходные результаты.

Кроме того, при красных смещениях $z < 1$ число галактик второго типа (ТII) остаётся относительно постоянным, в то время как число галактик третьего типа (ТIII) возрастает за счёт образования изломов в галактиках первого типа (ТИ). Это указывает на переходы от между типами профилей в процессе эволюции модельных галактик симуляции EAGLE.

2.2 Эволюция изломов

Помимо статистики также были построены графики изменения параметров изломов (положения и силы излома) в зависимости от красного смещения. Все модельные галактики нашей выборки имеют значение групповой массы $M_{200} < 10^{13} M_{\odot}$. Их можно считать изолированными галактиками, то есть не являющимися членами тесных групп и скоплений. Однако даже для таких

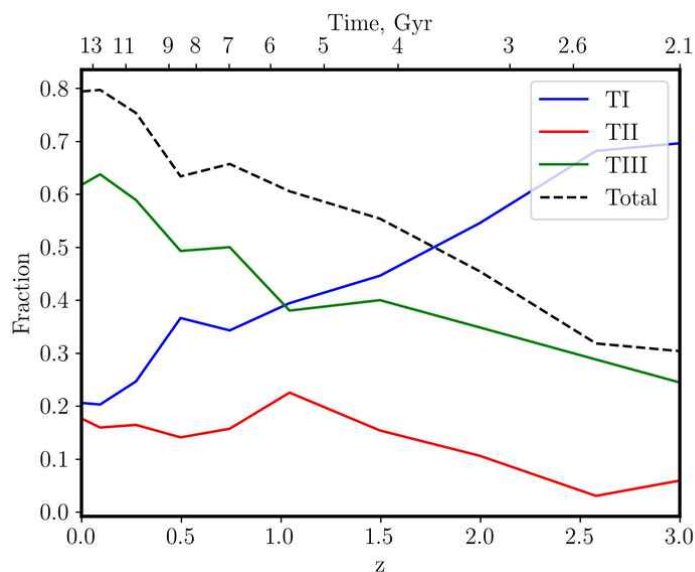


Рис. 4: Статистика распределения модельных галактик по типам профилей диска на различных красных смещениях. Синей линией отмечена доля профилей первого типа (ТИ). Красной линией отмечена доля профилей второго типа (ТII). Зеленой линией отмечена доля профилей третьего типа (ТIII). Черная пунктирная линия показывает общую долю галактик с изломами (сумма долей ТII и ТIII)

галактик внешние воздействия оказывают существенное влияние на ход эволюции радиальных профилей поверхностной яркости. Некоторые выявленные аспекты эволюции модельных галактик рассматриваются ниже более подробно.

Во-первых, было выявлено, что в рамках симуляции изломы в профилях диска могут появляться и исчезать. Мы оценили среднее время существования изломов (между формированием и разрушением) и время их возникновения. Соответствующие распределения представлены на рисунке 5. Из графика видно, что среднее время жизни изломов второго (ТII) и третьего (ТIII) типов дают схожие распределения. Также видно, что изломы обоих типов возникают на всем времени жизни Вселенной с особыми пиками частоты возникновения на возрастах Вселенной около 3-4 и 6-7 млрд. лет.

У части модельных галактик с профилями второго типа (ТII) наблюдается зависимость между ростом массы газа в галактике и исчезновением излома. У этих галактик излом присутствует только в профиле поверхностной яркости, но отсутствует в профиле звёздной плотности. Пример эволюции такой галактики (ID 959840) представлен на рисунке 6 (первая строка). При этом до момента разрушения параметры излома (положение и сила излома) остаются постоянными в ходе эволюции галактики. Средний диапазон времени жизни изломов данного типа составляет от 1 до 4 млрд лет.

Кроме того, в нашей выборке обнаружены модельные галактики второго типа (ТII) с изломами как в профиле поверхностной яркости, так и в профиле звёздной массы. Такие изломы имеют большее среднее время жизни (6 млрд лет). Для таких галактик характерно наличие излома во внешних областях дисков (радиус излома 15 кпк и больше). При внешних воздействиях на галактику масштаб внешнего диска (h_o) практически не меняется, в то время как масштаб внутреннего диска (h_i) может претерпевать значительные изменения. Пример такой модельной галактики (ID737885) представлен во второй строке рисунка 6. Отдельно следует отметить модельную галактику ID 892497, эволюция которой изображена на третьей строке рисунка 6. Её особенность заключается в том, что излом образуется на $z \sim 2.5$ и его положение остаётся практически неизменным на протяжении всего времени эволюции модельной галактики.

Для профилей третьего типа (ТIII), в отличие от профилей второго типа (ТII), обнаружена

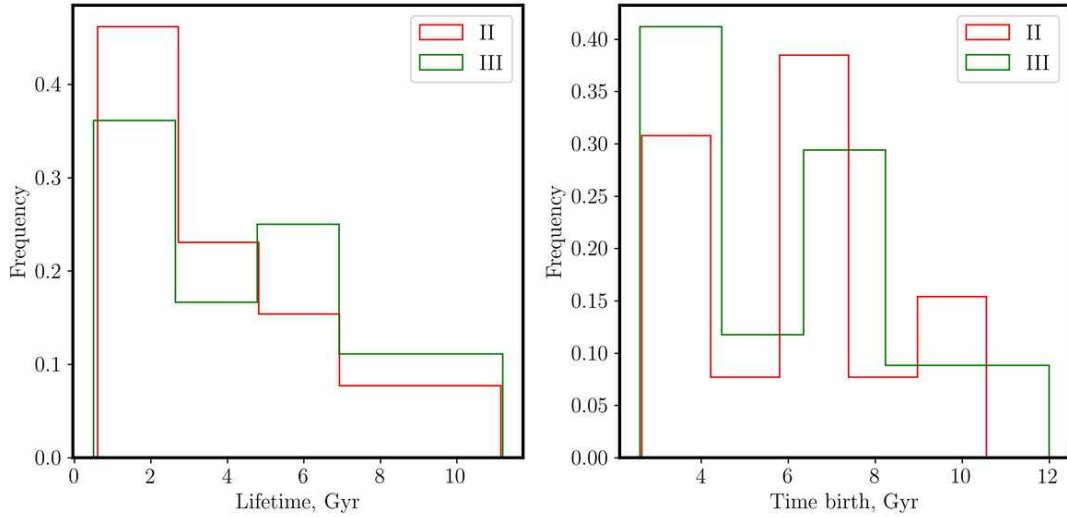


Рис. 5: Время жизни изломов (*слева*) и моменты возникновения изломов (*справа*). Красной линией отмечено отображено распределение для профилей второго типа (II). Зелёной линией отмечено распределение профилей третьего типа (III).

связь между образованием излома и увеличением газовой и звёздной массы. Для части таких галактик наблюдается связь момента образования излома с ростом темпов звёздообразования, к примеру для модельной галактики ID817104, представленной на первой строке рисунка 7. Кроме того, в выборке присутствуют галактики, у которых излом формируется уже при $z \approx 3$ и в дальнейшем мало изменяется под влиянием внешних воздействий (вторая строка рисунка 7).

В нашей выборке было идентифицировано несколько сценариев разрушения профилей третьего типа (ТIII). Первый сценарий связан с повышением яркости внутреннего дика под действием внешнего воздействия, что приводит к его подъёму, отдалению излома во внешние области и падению яркости в точке излома ниже порога обнаружения. Пример такой галактики ID 1757806 представлен на первой строке рисунка 8. Второй сценарий обусловлен внешним воздействием, которое приводит к разрушению исходного излома и формированию нового на другом радиусе и с другими масштабами диска. Пример такого случая для модельной галактики ID 1593757 представлен во второй строке рисунка 8. Третий наблюдаемый сценарий связан с формированием профиля типа ТIII+ТII и последующим сглаживанием внутреннего излома. Такой сценарий демонстрирует, к примеру, галактика ID 971267, представленная на рисунке 9, где видно, что изломы обоих типов образуются одновременно. При этом внешний масштаб h_3 не претерпевает особых изменений, что характерно и для других профилей второго типа (ТII), тогда как внутренние масштабы h_1 и h_2 растут. Если рост масштаба h_1 происходит быстрее, чем масштаба h_2 , то это приводит к их выравниванию и исчезновению излома, что по видимому и наблюдается в данном случае.

Важно подчеркнуть, что в рамках данного космологического обзора обнаружены различные сценарии эволюции изломов. Было получено, что изломы в профилях поверхностной яркости модельных галактик могут как образовываться на больших красных смещениях, сохраняя свой тип вплоть до $z = 0$ (ID 780704), так и менять тип профиля в ходе эволюции. Примером последнего может служить модельная галактика ID 1608845, где в профиле без излома (ТИ) образуется нисходящий излом (ТII), который при увеличении массы газа в галактике снова теряет излом (ТИ) и образует новый излом третьего типа (ТIII). Или уже упомянутая ранее модельная галактика ID 971267, где в профиле без излома (ТИ) возникает два излома с профилями ТIII и ТII. Со временем внутренний профиль сглаживается, и остаётся только внешний излом ТII.

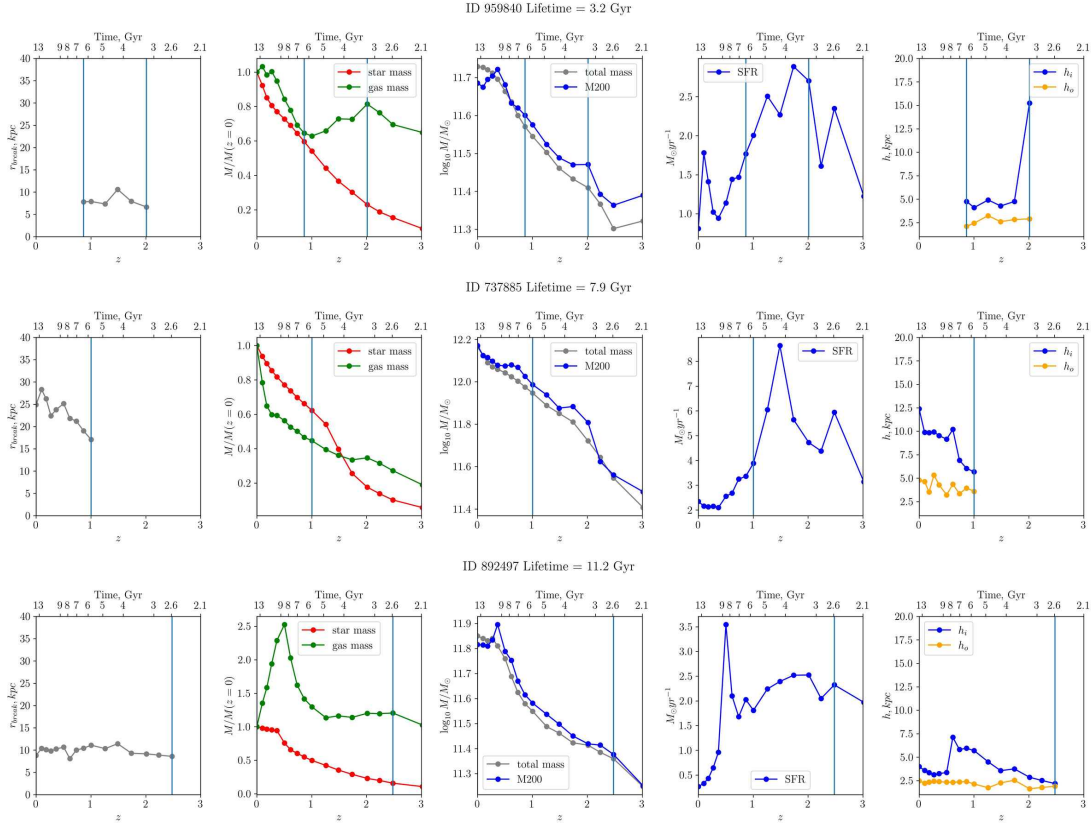


Рис. 6: Эволюция параметров различных модельных галактик с профилями второго (ТII) типа на различных красных смещениях. В одной строке представлено изменение параметров для одной модельной галактики. В первом столбце представлено изменение положение излома в профиле с течением времени. Во втором столбце показано изменение массы газа (зелёная линия) и звёздной массы (красная линия), нормированное на значение при $z = 0$. В третьем столбце представлено изменение полной массы галактики (серая линия) и массы галактического окружения M_{200} (синяя линия) с течением времени. В четвертом столбце представлено изменение суммарного темпа звёздообразования галактики со временем. В пятом столбце представлена эволюция внутреннего (синяя линия) и внешнего (оранжевая линия) масштабов диска с течением времени. Вертикальными линиями на графиках отмечено время возникновения и исчезновения изломов.

2.3 Силы изломов

Важной характеристикой профилей является сила излома, определяемая логарифмом отношения внешнего и внутреннего экспоненциальных масштабов дисков. Временной шаг в симуляции EAGLE не позволяет детально отслеживать изменение этого параметра под влиянием внешних факторов, как, например, в работе Mondelin *et al.* 2025, где разрешение по времени на порядок выше. В отличие от упомянутой работы, здесь мы исследуем, как глобально меняется этот параметр на всём интервале от $z = 3$ до $z = 0$. Распределение сил изломов модельных галактик на разных красных смещениях представлено на рисунке 10. Можем заметить, что статистических изменений в силе излома со временем не наблюдается, что свидетельствует о слабой эволюции данного параметра в рамках симуляции. Также мы можем отметить, что для профилей третьего типа (ТIII) наблюдается ряд изломов в диапазоне 0.50-0.75, в то время как для профилей второго типа (ТII) их практически нет, но при этом в среднем силы изломов имеют близкие значения.

Изломы наблюдаются не только в профилях поверхностной яркости, но также в профилях звёздной массы галактик. Распределение отношения внутренних и внешних масштабов дисков для профилей звёздной массы и поверхностной яркости представлено на рисунке 11. Распределения для профилей третьего типа (ТIII) очень близки. В то время как для профилей второго типа

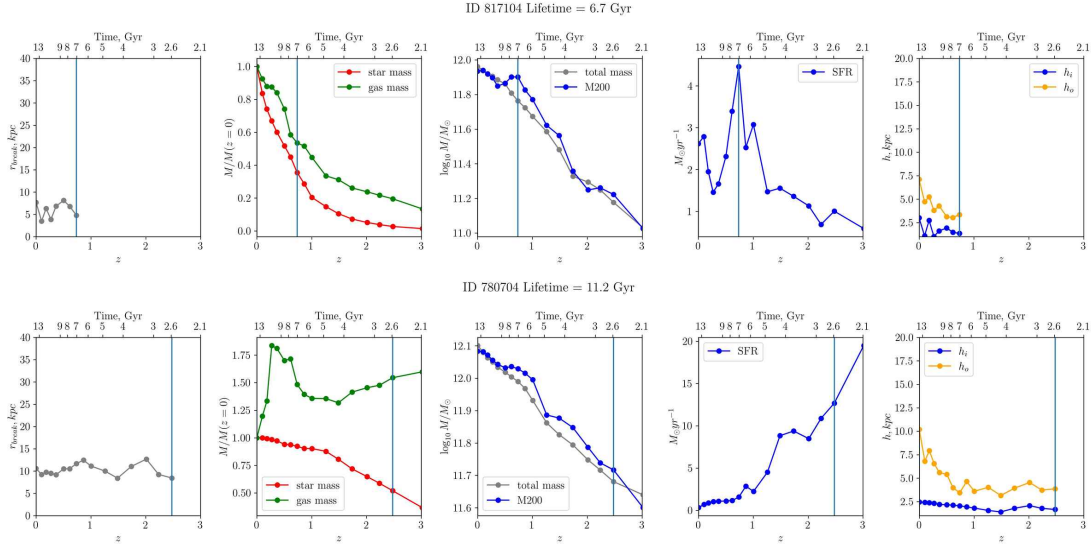


Рис. 7: То же, что на рисунке 6, но для галактик третьего типа (ТIII).

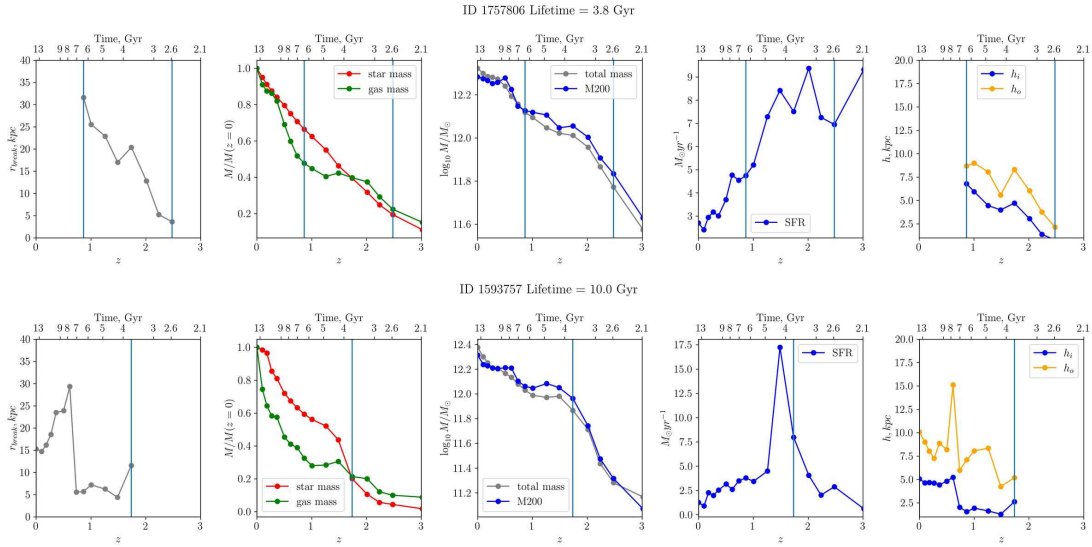


Рис. 8: То же, что на рисунке 6, но для галактик третьего типа (ТIII).

(ТII) число изломов в профиле массы оказывается меньше и их сила слабее, чем для изломов в яркости.

2.4 Связь с баром

В рамках данного исследования на основе симуляции была изучена связь между наличием бара в галактике и наличием излома. Распределение доли галактик с баром и без бара представлено на рисунке 12 (слева). Можно видеть, что для нашей выборки доля галактик с изломом не зависит от наличия в галактике бара. Одной из возможных причин такого поведения может быть тот факт, что большинство изломов нашей выборки относится к третьему типу (ТIII). В работах Peter Erwin, Gutiérrez, John E. Beckman, 2012, Wang *et al.* 2018, Laine *et al.* 2014 также показано, что доля профилей третьего типа (ТIII) не проявляет сильных зависимостей от наличия в галактике бара. Другим фактором может служить значения амплитуд вторых Фурье-гармоник (A_2) для модельных галактик нашей выборки. Распределение данной величины представлено на рисунке 12 (справа). Из графика можно видеть, что большинство галактик имеют значение $A_2 \approx 0.2-0.3$ и

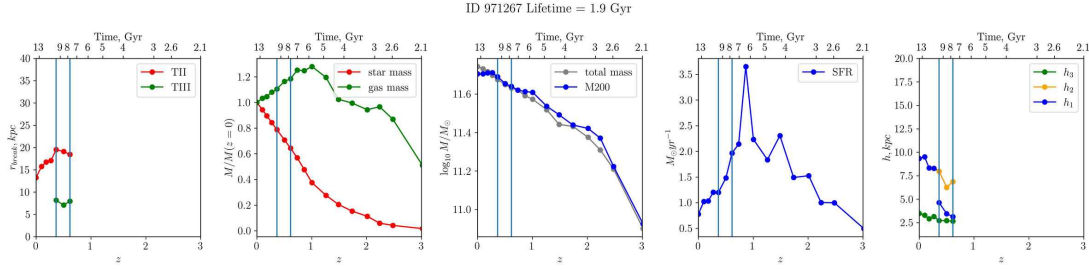


Рис. 9: То же, что на рисунке 6, но для модельной галактики ID 971267. В первом столбце приведены положение изломов для второго ТИ и третьего ТИ типов. На последнем графике приведены масштабы для трёх участков диска. Нумерация происходит по удалению участка от центра галактики.

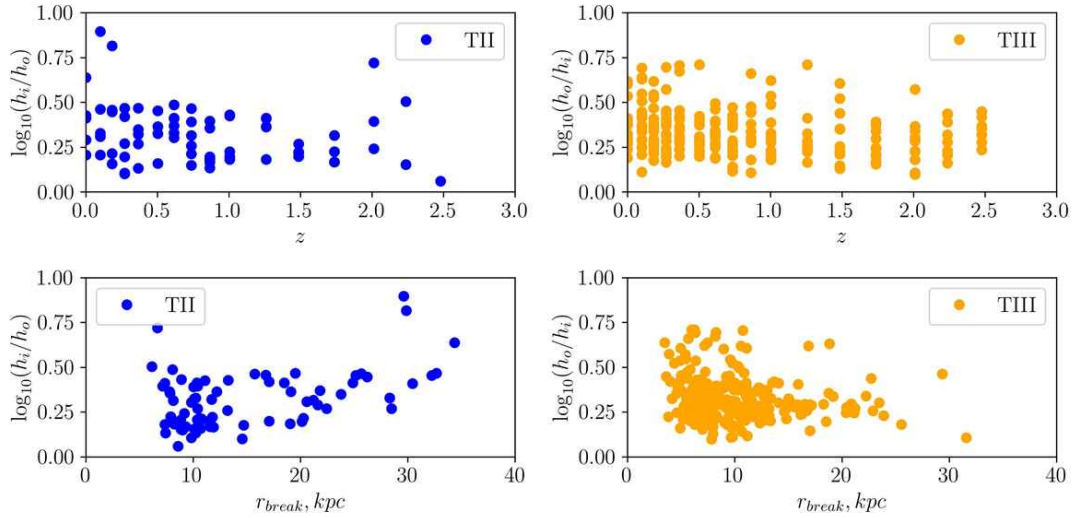


Рис. 10: *Сверху* значение силы излома на различных красных смещениях. *Снизу* значение силы излома в зависимости от радиуса излома. Синим отмечены профили второго типа (ТИ), оранжевым отмечены профили третьего типа (ТИИ).

почти отсутствуют галактики с $A_2 > 0.4$. Согласно классификации, приведённой в работе Algorry *et al.* 2017, в нашей выборке много слабых баров и практически нет сильных баров. Малая сила баров может объяснять их слабое влияние на формирование и эволюцию звёздных профилей. Таким образом, можно констатировать статистическое отсутствие связи между наличием излома и бара в нашей выборке. Для выяснения того, носит ли эта закономерность глобальный характер, необходим анализ выборки с большим количеством сильных баров.

3 Обсуждение и выводы

На основе анализа данных космологического обзора EAGLE выявлены следующие ключевые аспекты эволюции изломов в радиальных профилях поверхностной яркости модельных галактик:

1. Установлено, что изломы радиальных профилей представляют собой долгоживущие структуры, существующие на протяжении нескольких миллиардов лет. Этот результат согласуется с наблюдательными данными, которые также фиксируют изломы вплоть до $z = 3$. Однако распределение модельных галактик по типам профилей в симуляции не воспроизводит наблюдательную статистику. В частности, доля галактик типа ТИ оказывается заниженной на всех этапах эволюции.

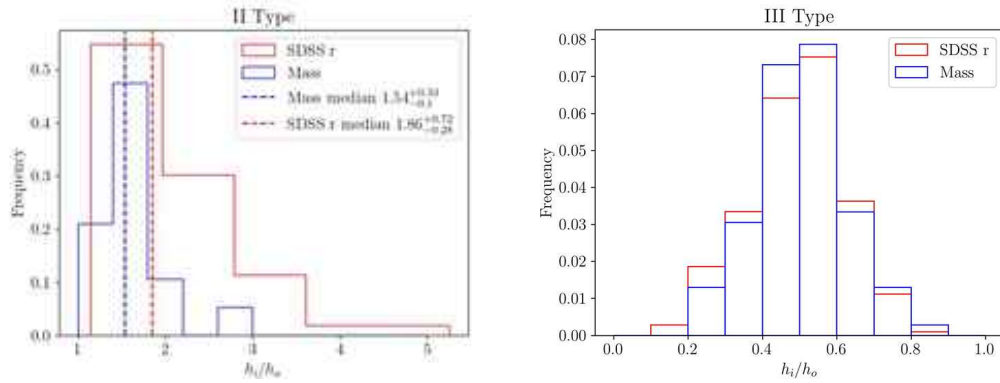


Рис. 11: Слева распределение отношения масштабов внутреннего (h_i) и внешнего (h_o) дисков для профилей второго типа (ТII). Синим цветом отвечено распределение для профилей звёздной массы. Красным цветом отвечено распределение для профилей поверхностной яркости. Пунктиром отмечены значения медианы распределений. Справа распределение отношения масштабов внутреннего (h_i) и внешнего (h_o) дисков для профилей третьего типа (ТIII). Синим цветом отмечено распределение для профилей звёздной массы. Красным цветом отвечено распределение для профилей поверхностной яркости.

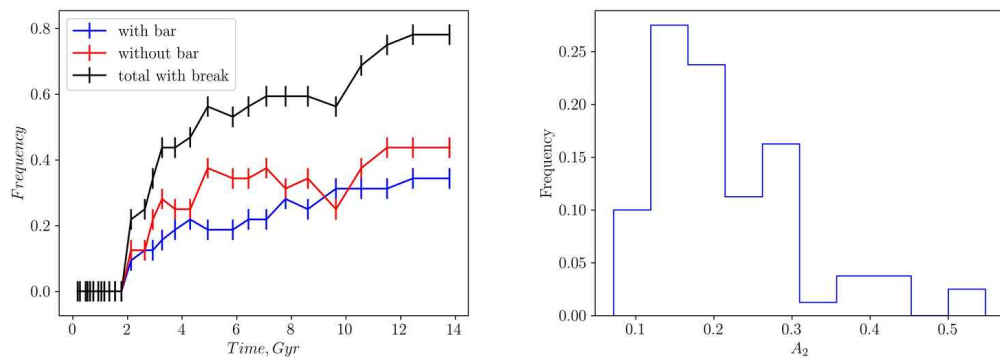


Рис. 12: Слева зависимость доли галактик с изломами от возраста Вселенной. Чёрным отмечена общая доля галактик с изломами. Красным отмечена доля галактик с изломами, но без бара. Синим отмечена доля галактик с баром и изломом. Справа представлено распределение амплитуды второй Фурье-гармоники для модельных галактик нашей выборки.

2. Обнаружено два типа поведения для профилей типа ТII. Для одних наблюдается излом только в профиле яркости. Такие изломы, как правило, характеризуются меньшей продолжительностью существования, но их параметры (положение и сила излома) остаются относительно стабильными. У других галактик, помимо излома в яркости, наблюдается более слабый излом и в профиле звёздной плотности. Для таких систем характерен больший радиус излома, который может смещаться в процессе эволюции. При этом в среднем время жизни таких изломов оказывается больше. Возможной причиной этого различия может быть принадлежность изломов к разным физическим типам: "break" и "truncation" (Martín-Navarro *et al.* 2012). Однако для более детального изучения этого феномена требуется дополнительный анализ кинематических характеристик модельных галактик.
3. Установлено, что изломы профилей формируются на всём времени существования Вселенной. Часть изломов, по-видимому, формируется на ранних стадиях образования диска (они наблюдаются уже при $z \approx 3$), тогда как другие могут возникать на более поздних этапах эволюции галактики. Кроме того, зафиксированы случаи перехода профилей из одного типа

в другой под влиянием внешних воздействий.

4. Проанализированы изломы в профиле звёздной массы. Для профилей третьего типа (ТIII) распределение по силам изломов в массе и в поверхностной яркости практически совпадают. Для профилей второго типа (ТII) изломы в массе или вовсе отсутствуют или оказываются в среднем слабее, чем в профилях поверхностной яркости. Эти результаты согласуются с наблюдательными данными для реальных галактик (Bakos, Ignacio Trujillo, Michael Pohlen, 2008).
5. На основе сравнения изломов в галактиках с барами и без установлено, что в нашей выборке доля галактик с изломами не зависит от наличия бара. В дальнейшем мы планируем проверить этот факт на выборке с большим количеством сильных баров.

В рамках данного исследования выявлен ряд особенностей в эволюции модельных галактик симуляций EAGLE. Полученные результаты могут быть использованы в будущем для проверки механизмов формирования изломов в дисках галактик.

Список литературы

- Pohlen, M., I. Trujillo (2006). *The structure of galactic disks. Studying late-type spiral galaxies using SDSS*. A&A, 454.3, 759–772. arXiv: [astro-ph/0603682](#) [astro-ph].
- Tang, Yimeng *et al.* (2020). *New Constraints on the Origin of Surface Brightness Profile Breaks of Disk Galaxies from MaNGA*. ApJ, 897.1, 79. arXiv: [2006.01356](#) [astro-ph.GA].
- Azzollini, R., I. Trujillo, J. E. Beckman (2008). *Cosmic Evolution of Stellar Disk Truncations: From $z \sim 1$ to the Local Universe*. ApJ, 684.2, 1026–1047. arXiv: [0805.2259](#) [astro-ph].
- Xu, Dewang, Si-Yue Yu (2024). *JWST reveals a high fraction of disk breaks at $1 \leq z \leq 3$* . A&A, 682, L17. arXiv: [2402.04233](#) [astro-ph.GA].
- Erwin, Peter, John E. Beckman, Michael Pohlen (2005). *Antitruncation of Disks in Early-Type Barred Galaxies*. ApJ, 626.2, L81–L84. arXiv: [astro-ph/0505216](#) [astro-ph].
- Pohlen, M., P. Erwin, I. Trujillo, J. E. Beckman (2008). *Three Types of Galaxy Disks. B: Pathways Through an Eclectic Universe*. Под ред. J. H. Knapen, T. J. Mahoney, A. Vazdekis. Т. 390. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 247. arXiv: [0706.3830](#) [astro-ph].
- Bakos, Judit, Ignacio Trujillo, Michael Pohlen (2008). *Color Profiles of Spiral Galaxies: Clues on Outer-Disk Formation Scenarios*. ApJ, 683.2, L103. arXiv: [0807.2776](#) [astro-ph].
- van der Kruit, P. C. (1987). *The radial distribution of surface brightness in galactic disks*. A&A, 173, 59–80.
- (1988). *The three-dimensional distribution of light and mass in disks of spiral galaxies*. A&A, 192, 117–127.
- Schaye, Joop (2004). *Star Formation Thresholds and Galaxy Edges: Why and Where*. ApJ, 609.2, 667–682. arXiv: [astro-ph/0205125](#) [astro-ph].
- Elmegreen, Bruce G., Deidre A. Hunter (2006). *Radial Profiles of Star Formation in the Far Outer Regions of Galaxy Disks*. ApJ, 636.2, 712–720. arXiv: [astro-ph/0509190](#) [astro-ph].
- Debattista, Victor P. *et al.* (2006). *The Secular Evolution of Disk Structural Parameters*. ApJ, 645.1, 209–227. arXiv: [astro-ph/0509310](#) [astro-ph].
- Foyle, Kelly, Stéphane Courteau, Robert J. Thacker (2008). *An N-body/SPH study of isolated galaxy mass density profiles*. MNRAS, 386.4, 1821–1844. arXiv: [0803.2716](#) [astro-ph].
- Minchev, I., B. Famaey (2010). *A New Mechanism for Radial Migration in Galactic Disks: Spiral-Bar Resonance Overlap*. ApJ, 722.1, 112–121. arXiv: [0911.1794](#) [astro-ph.GA].
- Roškar, Rok *et al.* (2008). *Beyond Inside-Out Growth: Formation and Evolution of Disk Outskirts*. ApJ, 675.2, L65. arXiv: [0710.5523](#) [astro-ph].
- Sánchez-Blázquez, P., S. Courty, B. K. Gibson, C. B. Brook (2009). *The origin of the light distribution in spiral galaxies*. MNRAS, 398.2, 591–606. arXiv: [0905.4579](#) [astro-ph.CO].
- Younger, Joshua D., T. J. Cox, Anil C. Seth, Lars Hernquist (2007). *Antitruncated Stellar Disks via Minor Mergers*. ApJ, 670.1, 269–278. arXiv: [0707.4481](#) [astro-ph].
- Borlaff, Alejandro *et al.* (2014). *Formation of S0 galaxies through mergers. Antitruncated stellar discs resulting from major mergers*. A&A, 570, A103. arXiv: [1407.5097](#) [astro-ph.GA].
- Kazantzidis, Stelios, Andrew R. Zentner, Andrey V. Kravtsov, James S. Bullock, Victor P. Debattista (2009). *Cold Dark Matter Substructure and Galactic Disks. II. Dynamical Effects of Hierarchical Satellite Accretion*. ApJ, 700.2, 1896–1920. arXiv: [0902.1983](#) [astro-ph.GA].
- Laine, J. *et al.* (2014). *Morphology and environment of galaxies with disc breaks in the S⁴G and NIRS0S*. MNRAS, 441.3, 1992–2012. arXiv: [1404.0559](#) [astro-ph.GA].
- Wang, Jing *et al.* (2018). *The prevalence of type III disc breaks in H I-rich and low-spin galaxies*. MNRAS, 479.4, 4292–4306. arXiv: [1806.09353](#) [astro-ph.GA].
- Herpich, J., G. S. Stinson, H. -W. Rix, M. Martig, A. A. Dutton (2017). *How to bend galaxy disc profiles - II. Stars surfing the bar in Type-III discs*. MNRAS, 470.4, 4941–4955. arXiv: [1511.04442](#) [astro-ph.GA].
- Vogelsberger, Mark, Federico Marinacci, Paul Torrey, Ewald Puchwein (2020). *Cosmological simulations of galaxy formation*. *Nature Reviews Physics*, 2.1, 42–66. arXiv: [1909.07976](#) [astro-ph.GA].

- Schaye, Joop *et al.* (2015). The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *MNRAS*, 446.1, 521–554. arXiv: 1407.7040 [astro-ph.GA].
- Nelson, Dylan *et al.* (2019). The IllustrisTNG simulations: public data release. *Computational Astrophysics and Cosmology*, 6.1, 2. arXiv: 1812.05609 [astro-ph.GA].
- Pfeffer, Joel L., Kenji Bekki, Duncan A. Forbes, Warrick J. Couch, Bärbel S. Koribalski (2022). Using the EAGLE simulations to elucidate the origin of disc surface brightness profile breaks as a function of mass and environment. *MNRAS*, 509.1, 261–271. arXiv: 2110.03856 [astro-ph.GA].
- Crain, Robert A. *et al.* (2015). The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations. *MNRAS*, 450.2, 1937–1961. arXiv: 1501.01311 [astro-ph.GA].
- Planck Collaboration *et al.* (2014). Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *A&A*, 571, A16. arXiv: 1303.5076 [astro-ph.CO].
- Springel, Volker (2005). The cosmological simulation code GADGET-2. *MNRAS*, 364.4, 1105–1134. arXiv: astro-ph/0505010 [astro-ph].
- Furlong, M., R. G. Bower, T. Theuns *et al.* (2015). Evolution of galaxy stellar masses and star formation rates in the EAGLE simulations. *MNRAS*, 450.4, 4486–4504. arXiv: 1410.3485 [astro-ph.GA].
- Furlong, M., R. G. Bower, R. A. Crain *et al.* (2017). Size evolution of normal and compact galaxies in the EAGLE simulation. *MNRAS*, 465.1, 722–738. arXiv: 1510.05645 [astro-ph.GA].
- Trayford, James W. *et al.* (2017). Optical colours and spectral indices of $z = 0.1$ eagle galaxies with the 3D dust radiative transfer code skirt. *MNRAS*, 470.1, 771–799. arXiv: 1705.02331 [astro-ph.GA].
- Bignone, Lucas A, Susana E Pedrosa, James W Trayford, Patricia B Tissera, Leonardo J Pellizza (2019). Non-parametric morphologies of galaxies in the eagle simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 491.3, 3624–3642. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/491/3/3624/31502752/stz3014.pdf>.
- Davis, M., G. Efstathiou, C. S. Frenk, S. D. M. White (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *ApJ*, 292, 371–394.
- Springel, Volker, Simon D. M. White, Giuseppe Tormen, Guinevere Kauffmann (2001). Populating a cluster of galaxies - I. Results at $z=0$. *MNRAS*, 328.3, 726–750. arXiv: astro-ph/0012055 [astro-ph].
- McAlpine, S. *et al.* (2016). The EAGLE simulations of galaxy formation: Public release of halo and galaxy catalogues. *Astronomy and Computing*, 15, 72–89. arXiv: 1510.01320 [astro-ph.GA].
- Correa, Camila A., Joop Schaye *et al.* (2017). The relation between galaxy morphology and colour in the EAGLE simulation. *MNRAS*, 472.1, L45–L49. arXiv: 1704.06283 [astro-ph.GA].
- Thob, Adrien C. R. *et al.* (2019). The relationship between the morphology and kinematics of galaxies and its dependence on dark matter halo structure in EAGLE. *MNRAS*, 485.1, 972–987. arXiv: 1811.01954 [astro-ph.GA].
- Correa, Camila A., Joop Schaye (2020). The dependence of the galaxy stellar-to-halo mass relation on galaxy morphology. *MNRAS*, 499.3, 3578–3593. arXiv: 2010.01186 [astro-ph.GA].
- Pontzen, Andrew, Rok Roškar, Greg Stinson, Rory Woods (2013). *pynbody: N-Body/SPH analysis for python*. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1305.002. ascl: 1305.002.
- Wendland, Holger (1995). Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 4.1, 389–396.
- Baes, Maarten, Jonathan I. Davies *et al.* (2003). Radiative transfer in disc galaxies - III. The observed kinematics of dusty disc galaxies. *MNRAS*, 343.4, 1081–1094. arXiv: astro-ph/0304501 [astro-ph].
- Baes, Maarten, Joris Verstappen *et al.* (2011). Efficient Three-dimensional NLTE Dust Radiative Transfer with SKIRT. *ApJS*, 196.2, 22. arXiv: 1108.5056 [astro-ph.CO].
- Camps, P., M. Baes (2015). SKIRT: An advanced dust radiative transfer code with a user-friendly architecture. *Astronomy and Computing*, 9, 20–33. arXiv: 1410.1629 [astro-ph.IM].
- Baes, Maarten, Andrea Gebek *et al.* (2024). The TNG50-SKIRT Atlas: Post-processing methodology and first data release. *A&A*, 683, A181. arXiv: 2401.04224 [astro-ph.GA].

- Kapoor, Anand Utsav *et al.* (2021). High-resolution synthetic UV-submm images for simulated Milky Way-type galaxies from the Auriga project. MNRAS, 506.4, 5703–5720. arXiv: 2107.06595 [astro-ph.GA].
- Bruzual, G., S. Charlot (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. MNRAS, 344.4, 1000–1028. arXiv: astro-ph/0309134 [astro-ph].
- Chabrier, Gilles (2003). Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. PASP, 115.809, 763–795. arXiv: astro-ph/0304382 [astro-ph].
- Gonzalez-Perez, V. *et al.* (2014). How sensitive are predicted galaxy luminosities to the choice of stellar population synthesis model? MNRAS, 439.1, 264–283. arXiv: 1309.7057 [astro-ph.CO].
- Lupton, Robert *et al.* (2004). Preparing Red-Green-Blue Images from CCD Data. PASP, 116.816, 133–137. arXiv: astro-ph/0312483 [astro-ph].
- Rosas-Guevara, Yetli *et al.* (2022). The evolution of the barred galaxy population in the TNG50 simulation. MNRAS, 512.4, 5339–5357. arXiv: 2110.04537 [astro-ph.GA].
- Erwin, Peter (2015). IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting. ApJ, 799.2, 226. arXiv: 1408.1097 [astro-ph.IM].
- Levenberg, Kenneth (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. en. *Quart. Appl. Math.*, 2.2, 164–168.
- Marquardt, Donald W (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11.2, 431–441.
- Jedrzejewski, Robert I. (1987). CCD surface photometry of elliptical galaxies - I. Observations, reduction and results. MNRAS, 226, 747–768.
- Freeman, K. C. (1970). On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. ApJ, 160, 811.
- Sérsic, J. L. (1963). Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 6, 41–43.
- Ferrers, N. M. (1877). On the Potentials, Ellipsoids, Ellipsoidal Shells, Elliptic Laminae, and Elliptics Rings, of Variable Densities. *The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, 14, 1–22.
- Gutiérrez, Leonel, Peter Erwin, Rebeca Aladro, John E Beckman (2011). The outer disks of early-type galaxies. II. Surface-brightness profiles of unbarred galaxies and trends with Hubble type. *Astron. J.*, 142.5, 145.
- Mondelin, M., F. Bournaud, J-C. Cuillandre, P. Hennebelle (2025). The role of environment on the evolution of disc galaxies density profiles New insights from simulations and comparison to Euclid data. *arXiv e-prints*, arXiv:2506.18413. arXiv: 2506.18413 [astro-ph.GA].
- Erwin, Peter, Leonel Gutiérrez, John E. Beckman (2012). A Strong Dichotomy in S0 Disk Profiles between the Virgo Cluster and the Field. ApJ, 744.1, L11. arXiv: 1111.5027 [astro-ph.CO].
- Algorry, David G. *et al.* (2017). Barred galaxies in the EAGLE cosmological hydrodynamical simulation. MNRAS, 469.1, 1054–1064. arXiv: 1609.05909 [astro-ph.GA].
- Martín-Navarro, Ignacio *et al.* (2012). A unified picture of breaks and truncations in spiral galaxies from SDSS and S⁴G imaging. MNRAS, 427.2, 1102–1134. arXiv: 1208.2893 [astro-ph.CO].

Galactic disks in EAGLE: how do their breaks form and evolve?

A.D. Panasyuk¹, A.A. Smirnov¹¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 3 October 2025 / Accepted 12 October 2025

Abstract

A large number of observed disk galaxies in the near and distant Universe exhibit breaks in their radial profiles of surface brightness and/or stellar mass. Over the past two decades, extensive and deep sky surveys have accumulated a substantial observational database on the statistics, diversity, and parameters of disk breaks. However, there is still no consensus among astronomers regarding the period in a galaxy's life when these breaks form or how they evolve over long timescales (several Gyr). In recent years, cosmological simulations have been actively employed to study the long-term evolution of galaxies. These simulations, by implementing a cosmological model and the physics of dark and baryonic matter interactions, succeed in reproducing and tracing the evolution of model galaxies that are morphologically and dynamically similar to observed ones. In this study, a two-dimensional decomposition of the surface brightness and stellar density profiles was performed for 32 model galaxies from the high-resolution Recal-L025N0752 run of the EAGLE cosmological simulation at various redshifts up to $z = 3$. The average time step was approximately ~ 700 million years. Statistical distributions of break types, lifetimes, formation epochs, positions, and strengths were obtained. Furthermore, it was established that breaks can form and dissipate over the course of galactic evolution. A comparative analysis of model galaxies with and without bars revealed that the presence or absence of a break is not correlated with the presence of a bar in a galaxy.

key words: galaxies, stellar disks, cosmological simulations