



Исследование усреднённых азимутальных профилей поверхностной яркости спиральных рукавов при помощи декомпозиции

И.В. Чугунов^{1*}, А.А. Марчук^{1,2}

¹ ГАО РАН, ²СПбГУ

Аннотация

В данной работе впервые проделана декомпозиция 29 галактик из обзора S⁴G с учётом спирального узора как отдельного компонента. С помощью моделей, полученных в результате декомпозиции, был проанализирован вклад спиральных рукавов в азимутально усреднённые профили поверхностной яркости галактик. Показано, что вклад спиральных рукавов в поверхностную яркость распределён сильно неравномерно, в среднем достигая наибольшего значения на радиусе около 1,5 экспоненциальных масштабов диска и снижаясь до нуля в центре галактики и на периферии. Получены характерные значения высоты «горба» на азимутально усреднённом профиле, обусловленного наличием спиральных рукавов. Исследован также вклад спиральных рукавов в полную светимость галактики, в частности, подтверждена его связь с морфологическим типом галактики. Полученные результаты могут применяться для грубой оценки вклада осесимметричных составляющих галактики исходя из морфологического типа, что важно, например, для оценки параметров диска по азимутально усреднённому профилю поверхностной яркости, или для анализа спектрального распределения яркости в галактике.

Введение

Спиральные рукава — элемент крупномасштабной структуры, который встречается в дисках большинства дисковых галактик (Díaz-García и др., 2019). Спиральные рукава располагаются в диске и выделяются повышенной яркостью, активностью звездообразования и могут вносить значительный вклад в светимость.

Один из методов, который потенциально может прояснить многие нерешённые вопросы, связанные с происхождением и эволюцией спиральной структуры — это декомпозиция. Декомпозицией называют выделение отдельных подсистем в галактике и моделирование их аналитическими функциями. Декомпозиция может проводиться, например, на основе двумерного изображения галактики, одномерного среза или азимутально усреднённого профиля поверхностной яркости. Полученные таким образом параметры моделей можно считать характеристиками самих подсистем (Erwin, 2015; Méndez-Abreu и др., 2017). Однако сами спиральные рукава очень редко моделируются при декомпозиции из-за их внешнего разнообразия, сложности функции распределения яркости в них, и, следовательно, отсутствия устоявшихся моделей такого распределения.

Встречаются немногочисленные примеры работ, где производится моделирование спиральных рукавов, на небольших выборках галактик. Например, в программе GALFIT (Peng и др., 2010) одна из возможных функций позволяет строить несимметричные модели, включая спиральные рукава; в той же работе показан пример использования этой функции для моделирования галактики M 51. Хотя этот способ действительно позволяет воспроизводить сложную спиральную структуру, он с трудом применим на практике, поскольку соответствующая модель содержит 103

*e-mail:chugunov21@list.ru

свободных параметра, которые по отдельности не имеют особого физического смысла. Кроме того, спиральные рукава в данной модели оказываются симметричными относительно поворота, в то время как в реальных галактиках спиральные рукава могут заметно отличаться друг от друга. Поэтому такой подход применялся лишь для небольших выборок галактик, как, например, в Läsker, Ferrarese и van de Ven (2014) и Gao и Ho (2017). Кроме того, в упомянутых работах лишь часть выборки составляли спиральные галактики, а исследование спиральной структуры не было их основной задачей. Другим примером может служить работа Lingard и др. (2020), в которой была проведена декомпозиция 198 галактик, и, хотя спиральные рукава в ней моделировались по отдельности, они описывались очень простой моделью, в частности, имели форму логарифмической спирали, а распределение яркости вдоль и поперёк рукава имело фиксированный вид. Существуют и другие аналитические модели распределения яркости в спиральных рукавах (например, Cox и Gómez 2002; Fridman и Poltorak 2010), но примеры использования моделей из данных работ для декомпозиции неизвестны. Также есть работы, в которых производится создание искусственных изображений галактик со спиральными рукавами, а затем производится их моделирование классическим образом с целью определить ошибки измерения параметров, например Sonnenfeld (2022), однако подобный подход может дать лишь приблизительное представление об ошибках, возникающих при анализе реальных галактик. Наконец, в работе Davis, Graham и Cameron (2019) проводилась одномерная декомпозиция изображений, и в ней вклад различных компонент в радиальный профиль поверхностной яркости, включая спиральные рукава, моделируется функцией Гаусса.

Для проведения декомпозиции с учётом спиральной структуры необходимо разработать модель спиральных рукавов и провести декомпозицию с её использованием для определённой выборки галактик. Такой подход позволяет получить свойства самих спиральных рукавов, выводимые из параметров их моделей. Одно из преимуществ данного метода состоит в том, что при подборе модели в ходе декомпозиции распределение поверхностной яркости внутри спирального рукава учитывается целиком.

Получаемые в результате декомпозиции параметры позволяют извлечь большое количество разнообразной информации о спиральных рукавах, включая угол закрутки, ширину, асимметрию, вклад в полную светимость галактики для каждого отдельного рукава, и многие другие параметры. В данной работе будет рассмотрен только вклад спиральной структуры в азимутально усреднённый профиль поверхностной яркости галактики.

1 Описание модели

Для того, чтобы проделать декомпозицию галактик с учётом спиральной структуры, необходимо разработать соответствующую модель и обосновать её. С учётом разнообразия и сложности внутреннего устройства спирального рукава следует ожидать, что такая модель будет иметь большое число параметров.

Поскольку спиральная структура галактики часто оказывается асимметричной, а отдельные рукава могут сильно отличаться друг от друга, было решено моделировать каждый рукав по отдельности, со своим набором параметров, не зависящим от параметров других рукавов и от параметров диска, хотя следует помнить, что физически спиральные рукава являются его частью. Это значит, что модели, создающие несколько одинаковых симметричных рукавов, например, из GALFIT (Peng и др., 2010), не подойдут.

Для простоты в модели рассматриваются три свойства спирального рукава по отдельности: форма рукава в целом, распределение поверхностной яркости вдоль спирального рукава и поперёк него. Эти свойства моделируются независимыми друг от друга наборами параметров и задают двумерное распределение поверхностной яркости в спиральном рукаве. Опишем их сперва качественно, а затем приведем подробности.

Форма рукава в модели будет представлена как функция в полярных координатах $r(\varphi)$, где r — галактоцентрическое расстояние, а φ — азимутальный угол. Наиболее распространённым пред-

ставлением формы рукава в целом является логарифмическая спираль, которая характеризуется постоянным углом закрутки μ на протяжении всей спирали и может быть задана формулой $r(\varphi) = r_0 \times \exp(\varphi \times \tan \mu)$, где r_0 — радиус начала спирали. Однако измерения углов закрутки спиральных рукавов в реальных галактиках показывают, что эта величина редко остаётся постоянной на протяжении рукава (S. S. Savchenko и Reshetnikov, 2013).

Распределение яркости вдоль спирального рукава далее будет обозначаться функцией I_{\parallel} , которая задаёт яркость вдоль кривой $r(\varphi)$, которая, в свою очередь, задаёт форму спирального рукава. Таким образом, функцию можно обозначить как $I_{\parallel}(r(\varphi), \varphi)$. Естественно ожидать, что такое распределение будет похожим на распределение яркости в диске, которое обычно моделируется экспоненциальной функцией от радиуса. При этом, поскольку спиральные рукава начинаются не из самого центра диска, в начале рукава необходима область, где происходит плавное возрастание поверхностной яркости от нуля до максимального значения, после которого идёт экспоненциальный спад. Кроме того, для моделирования относительно резкого окончания рукавов во внешних частях, в конце рукава экспоненциальное убывание должно заменяться более быстрым спадом до нулевого значения, где оканчивается рукав.

Распределение яркости поперёк спирального рукава далее будет обозначаться функцией I_{\perp} , которая задаёт распределение яркости в радиальном направлении от центра галактики. Можно обозначить ρ как расстояние от точки до кривой, задающей спиральный рукав, в радиальном направлении, так что для координат (r, φ) будет $\rho = r - r(\varphi)$. Поскольку известно, что спиральные рукава в реальных галактиках могут менять свою ширину, то I_{\perp} также должно зависеть от φ . Кроме того, поперечный профиль спиральных рукавов может быть асимметричным. Использование величин (ρ, φ) проще, чем применение кратчайшего расстояния до рукава в каждой точке вместо ρ , но направление, в котором φ постоянно, идёт не перпендикулярно спиральному рукаву.

В конечном итоге, можно объединить отдельные части формулы и записать её в общем виде (формула (1)). Величина I_0 в формуле — максимальная яркость в рукаве, также задаваемая отдельным параметром. Далее будут приведены точные формулы для $r(\varphi)$, I_{\parallel} и I_{\perp} .

$$I(r(\varphi), \rho, \varphi) = I_0 \times I_{\parallel}(r, \varphi) \times I_{\perp}(\rho, \varphi) \quad (1)$$

Для $r(\varphi)$ была выбрана функция, в которой угол закрутки меняется как полином третьей степени от азимутального угла. Это даёт возможность значительно варьировать угол закрутки на протяжении рукава, при этом оставляя вид функции достаточно простым. Параметры модели m_0, m_1, m_2, m_3 задают коэффициенты этого полинома. Для однозначного задания формы рукава также нужно определить координаты начала спирального рукава r_0, φ_0 и направление, в котором он идёт: по часовой стрелке или против часовой стрелки. Здесь и далее азимутальный угол φ отсчитывается от φ_0 в направлении, соответствующем направлению хода спирального рукава. Таким образом, форма в простом случае задается формулой (2):

$$r(\varphi) = r_0 \times \exp\left(\varphi \sum_{i=0}^3 m_i \left(\frac{\varphi}{2\pi}\right)^i\right) \quad (2)$$

Для функции $r(\varphi)$, которая задаётся формулой (2), угол закрутки μ на азимутальном угле φ можно выразить формулой (3).

$$\mu = \arctan\left(\sum_{i=0}^3 (i+1) m_i \left(\frac{\varphi}{2\pi}\right)^i\right) \quad (3)$$

Таким образом, часть модели, отвечающая за $r(\varphi)$, содержит 7 параметров.

Для I_{\parallel} распределение состоит из трёх частей, разделённых и ограниченных азимутальными углами $\varphi_{\max}, \varphi_{\text{cutoff}}, \varphi_{\text{end}}$. В диапазоне $\varphi \leq \varphi_{\max}$ происходит рост яркости от нуля в начале спирали ($\varphi = 0$) до максимального значения на φ_{\max} . Затем в диапазоне $\varphi_{\max} < \varphi \leq \varphi_{\text{cutoff}}$ происходит спад яркости, близкий к экспоненциальному с радиальным масштабом h_s . Наконец, на азимутальных углах $\varphi_{\text{cutoff}} < \varphi \leq \varphi_{\text{end}}$ то же экспоненциальное распределение домножается

на функцию, линейно убывающую от 1 на φ_{cutoff} до 0 на φ_{end} . Таким образом, на φ_{end} яркость спирального рукава достигает нуля и он заканчивается. Формула 4 содержит точное выражение для I_{\parallel} :

$$I_{\parallel}(r(\varphi), \varphi) = \frac{1}{\bar{I}} (h_s \times \varrho(\varphi))^{\varrho(\varphi_{\text{max}})} \exp(-\varrho(\varphi)), \quad \varphi \leq \varphi_{\text{cutoff}} \quad (4)$$

Величина $\varrho(\varphi)$ задаётся формулой (5) и вводится для упрощения вида формулы (4):

$$\varrho(\varphi) = (r(\varphi) - r_0)/h_s \quad (5)$$

\bar{I} — параметр нормализации, такой, чтобы максимальное значение функции составляло 1 на φ_{max} . Он определяется формулой (6):

$$\bar{I} = (\varrho(\varphi_{\text{max}}) \times h_s)^{\varrho(\varphi_{\text{max}})} \exp(-\varrho(\varphi_{\text{max}})) \quad (6)$$

В диапазоне $\varphi_{\text{cutoff}} < \varphi \leq \varphi_{\text{end}}$ к функции из формулы (4) добавляется множитель $\left(1 - \frac{\varphi - \varphi_{\text{cutoff}}}{\varphi_{\text{end}} - \varphi_{\text{cutoff}}}\right)$. Таким образом, формула имеет 4 параметра: φ_{max} , φ_{cutoff} , φ_{end} , h_s .

Следует отметить, что I_{\parallel} описывается как функция от r и φ , хотя r сама является функцией φ . Такая запись была выбрана для удобства, чтобы экспоненциальный масштаб спирального рукава h_s имел сходный смысл с экспоненциальным масштабом диска h .

Для моделирования поперечного распределения яркости в спиральном рукаве I_{\perp} используется функция Серсика по причине её гибкости и применимости к распределению яркости в различных компонентах галактики. Например, в работе Davis, Graham и Cameron, 2019 вклад спиральных рукавов в радиальный профиль поверхностной яркости моделируется функцией Гаусса, которую можно рассматривать как частный случай функции Серсика. Поскольку реальные спиральные рукава могут быть асимметричными, для распределения яркости в разные стороны от положения максимума используются распределения с разными параметрами. Для внутренней и внешней части рукава свободными параметрами являются эффективная полуширина $w_e^{\text{in/out}}$ и индекс Серсика n , определяющий форму распределения. Чтобы учесть возможность увеличения ширины спирального рукава от центра к периферии, используется параметр ξ , который задаёт скорость роста эффективной ширины с ростом φ . Точное выражение для I_{\perp} представляется формулой 7:

$$I_{\perp}^{\text{in/out}}(\rho, \varphi) = \exp\left(-b_n^{\text{in/out}} \times \left(\frac{\rho}{\sqrt{w_e^2 + (\varphi \times \xi)^3}}\right)^{\frac{1}{n^{\text{in/out}}}}\right) \quad (7)$$

Здесь b_n — величина, однозначно определяемая из n исходя из определения эффективного радиуса: внутри эффективного радиуса содержится половина светимости галактики. Следует отметить, что это верно лишь для двумерного распределения Серсика, но в данном случае одномерного распределения используется то же значение b_n . Таким образом, в этой модели эффективная полуширина не ограничивает часть рукава, в которой сосредоточена половина его светимости, а лишь сохраняет вид функции Серсика.

Список параметров модели спирального рукава представлен в Таблице 1. В ней не представлены ещё 4 «общих» параметра, которые для большинства двумерных моделей, в том числе и для спиральных рукавов, используются одинаковым образом — координаты центра, а также наклон плоскости диска к картинной плоскости и позиционный угол. Таким образом, модель спирального рукава описывается суммарно 21 параметром. Для сравнения, модель балджа описывается 7 параметрами, 4 из которых относятся к «общим». Такой набор параметров делает модель достаточно гибкой, при этом она остаётся более простой, чем, например, использованная в работе Peng и др., 2010. Ещё одно преимущество разработанной модели в том, что практически все параметры в ней имеют определённый физический смысл и достаточно предсказуемым образом влияют на вид рукавов.

Таблица 1: Параметры модели спирального рукава

Часть модели	Параметр	Описание
Нормализация	I_0	Максимальная яркость в рукаве
$r(\varphi)$	m_0, m_1, m_2, m_3 r_0, φ_0 is_clockwise	Параметры полинома Координаты начала рукава Направление закрутки рукава
I_{\parallel}	φ_{\max} φ_{cutoff} φ_{end} h_s	Азимутальный угол максимума яркости Азимутальный угол начала резкого спада Азимутальный угол конца рукава Экспоненциальный масштаб рукава
I_{\perp}	$w_e^{\text{in}}, w_e^{\text{out}}$ $n^{\text{in}}, n^{\text{out}}$ ξ	Эффективная полуширина Индекс Серсика Темп расширения рукава

2 Декомпозиция

В этом разделе будет описана выборка галактик, использованных для декомпозиции, а также её процесс. Также будет описан процесс валидации моделей.

2.1 Выборка галактик

Для выполнения декомпозиции необходимо составить выборку подходящих галактик. В качестве источника изображений галактик был выбран каталог S⁴G (Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies, Sheth и др. 2010), который предоставляет изображения с инфракрасного космического телескопа Spitzer на длине волны 3,6 мкм. Этот каталог был выбран по нескольким причинам. Во-первых, изображения в этом каталоге имеют сравнительно высокое разрешение, а его размер велик — более чем 2800 галактик. Во-вторых, изображения в ближнем инфракрасном диапазоне имеют то преимущество, что в них основной вклад вносит старое звёздное население. На этих изображениях спиральная структура выглядит относительно гладкой и проще всего моделируется аналитическими моделями.

В каталог S⁴G вошли достаточно близкие (ближе 40 Мпк), яркие (ярче 15,5^{mag} в полосе B) и протяжённые на небе ($D_{25} > 1'$) галактики, расположенные вдали от галактического экватора ($|b| > 30^\circ$). При этом далеко не все галактики в этой выборке пригодны для анализа в рамках данной работы, поскольку в ней присутствуют не только спиральные галактики, а кроме того, потребовалось отобрать те из них, плоскость диска которых не слишком наклонена к картинной плоскости — чтобы минимизировать эффекты проекции. Ещё одно требование состоит в том, что спиральная структура галактик должна отчётливо наблюдаться и не быть флоккулентной, чтобы каждый отдельный рукав можно было смоделировать.

За основу была взята выборка приблизительно 400 спиральных галактик из работы Díaz-García и др. (2019), частично удовлетворяющих указанным критериям. Из неё были исключены галактики с углом наклона к картинной плоскости более 50°, а из оставшихся галактик выбраны для дальнейшего анализа те, в которых спиральная структура прослеживается наиболее чётко. В выборку вошли 29 галактик, характеристики которых представлены в Таблице 2.

2.2 Процесс декомпозиции

Для декомпозиции был использован пакет программ IMFIT (Erwin, 2015), модифицированный для целей данной работы. В оригинальной версии он содержит лишь распространённые модели, используемые при декомпозиции галактик, но в нём предусмотрена возможность добавления новых функций, так что в модифицированной версии добавлена модель спиральных рукавов, описанная в Разделе ??.

Таблица 2: Параметры выбранных галактик из обзора S⁴G

Название	$i, ^\circ$	d , Мпк	T	АС	B^{mag}	$D_{25},'$
ESO508-024	31,5	42,9	5,0	G	-19,3	2,1
IC0769	41,8	34,5	3,5	G	-19,3	2,2
IC1993	21,3	13,6	2,0	M	-18,2	2,8
IC2627	17,4	33,2	4,0	G	-19,9	2,4
IC4237	46,1	40,1	3,0	M	-19,8	2,1
NGC0895	44,3	27,8	5,0	M	-19,9	3,3
NGC0986	26,0	24,8	2,0	G	-20,4	4,0
NGC2460	45,7	20,7	1,0	M	-19,0	1,8
NGC3507	29,8	17,9	3,0	G	-19,2	3,0
NGC3596	21,4	20,9	4,0	M	-19,8	3,6
NGC3683A	47,8	35,3	4,0	M	-20,0	2,0
NGC3684	47,3	20,4	5,0	M	-19,2	2,3
NGC3686	35,2	20,3	4,0	M	-19,5	2,9
NGC3687	18,0	37,9	1,5	M	-19,9	1,4
NGC4067	41,9	37,4	2,0	M	-19,5	1,1
NGC4165	48,3	29,9	2,5	G	-18,1	1,2
NGC4314	20,4	17,0	1,0	G	-19,8	3,7
NGC4548	39,0	11,0	1,5	G	-19,3	5,5
NGC4680	39,3	38,3	3,0	G	-19,7	1,3
NGC4902	21,6	40,6	2,5	M	-21,2	2,7
NGC5194	32,9	8,6	4,0	G	-21,1	13,8
NGC5240	47,2	33,1	3,0	M	-18,7	1,8
NGC5247	29,8	22,5	5,0	G	-21,0	5,4
NGC5364	47,9	21,0	3,5	M	-20,4	3,8
NGC5427	25,2	39,2	4,0	G	-21,0	3,6
NGC7167	26,1	30,8	5,5	G	-19,7	1,8
NGC7661	43,2	26,3	7,5	G	-18,0	1,8
NGC7798	31,9	27,9	2,5	G	-19,2	1,4
PGC028380	46,0	38,9	8,0	G	-18,1	1,3

В данной таблице обозначения столбцов следующие: i — наклон, d — расстояние, T — морфологический тип, АС — тип рукавов (G — гранд-дизайн галактики, M — многорукавные).

B^{mag} — абс. зв. величина в полосе B , D_{25} — оптический диаметр галактики.

Данные о наклоне взяты из работы Salo и др. (2015), о Хаббловском типе и типе рукавов — из работы Buta и др. (2015), где эти параметры определялись визуально. Звёздная величина и оптический диаметр получены из базы данных HyperLeda (Makarov и др., 2014), расстояния — с использованием базы данных NASA Extragalactic Database (NED).

IMFIT может проводить поиск оптимальных параметров модели с заданными компонентами различными методами. Из-за сложности моделей со спиральными рукавами быстрота метода имеет значение, так что из реализованных в IMFIT методов был использован метод Левенберга — Марквардта для поиска минимума функции (Moré, 1978). В применении этого алгоритма к декомпозиции производится поиск минимального значения статистики хи-квадрат для модели как функции от её параметров. Для исполнения этого метода необходимо начальное приближение модели, достаточно близкое к оптимальному набору параметров, и, при необходимости — задание границ возможных значений для параметров.

Для исследованной выборки галактик в качестве начальных приближений были использованы параметры, полученные при декомпозиции без учета спиральных рукавов в работе Salo и др. (2015). Однако для многих галактик в данной работе был изменен набор компонент в модели, а также во всех случаях добавлялись спиральные рукава, так что для новых компонент начальные параметры подбирались вручную, чтобы модель в начальном приближении имела визуальное сходство с реальным изображением.

Для того, чтобы уменьшить число свободных параметров модели и ускорить процесс сходимости, часть параметров спиральных рукавов определялась заранее и была зафиксирована в процессе подгонки — это параметры, задающие форму спирального рукава $r(\varphi)$. Для этого при помощи программы ds9 (Joye и Mandel, 2003) на реальном изображении галактики визуально отмечались точки вдоль спирального рукава, после чего при помощи программы на языке Python их положение аппроксимировалось функцией $r(\varphi)$, после чего параметры оставались фиксированными.

В качестве примера, на Рис. 1 приведено изображение галактики NGC 5247, две модели — «классическая» и включающая спиральные рукава, а также остаточные изображения для обеих моделей. По ссылке <https://github.com/IVChugunov/S4G/tree/main/Decomposition%20images> можно найти аналогичные изображения для всей выборки галактик.

2.3 Валидация моделей

Хотя на Рис. 1 можно видеть результат декомпозиции для одной из галактик, полученные результаты нуждаются в некоторой проверке на разумность и качество. Нет общепринятого определённого способа сделать это. Тем не менее, существуют отдельные способы убедиться в качестве полученных моделей.

Во-первых, можно определить визуально, что во всех случаях использованная модель спиральных рукавов выглядит похожей на спиральный узор реальной галактики, хотя и не может в полной мере воспроизвести мелкие детали, такие как многочисленные области звездообразования. Кроме того, на разностных изображениях не наблюдается крупномасштабных структур, которые могут быть связаны со спиральными рукавами. Азимутальные срезы изображений и моделей также сравнивались, и было подтверждено, что серьёзных отклонений не наблюдается.

Кроме этого, можно проверить, воспроизводятся ли в результатах хорошо установленные соотношения между параметрами. На Рис. 2 показан средний угол закрутки спиральных рукавов в зависимости от морфологического типа для исследованных галактик. Между этими параметрами наблюдается чёткая корреляция, что соответствует определению морфологического типа и может служить определённым подтверждением качества проведенной декомпозиции. Более того, в данной работе наблюдается более тесная корреляция, чем во многих других, приведённых на Рис. 13 в работе S. Savchenko и др. (2020).

3 Азимутально усреднённые профили поверхностной яркости

Под азимутально усреднённым профилем поверхностной яркости будем понимать функцию $F(r)$, выражающую среднюю поверхностную яркость F в галактике для всех точек, расположенных на расстоянии r от центра, с поправкой на эффекты проекции. Азимутально усреднённый профиль можно определить как для галактики целиком, так и для отдельных её компонент. Для этого

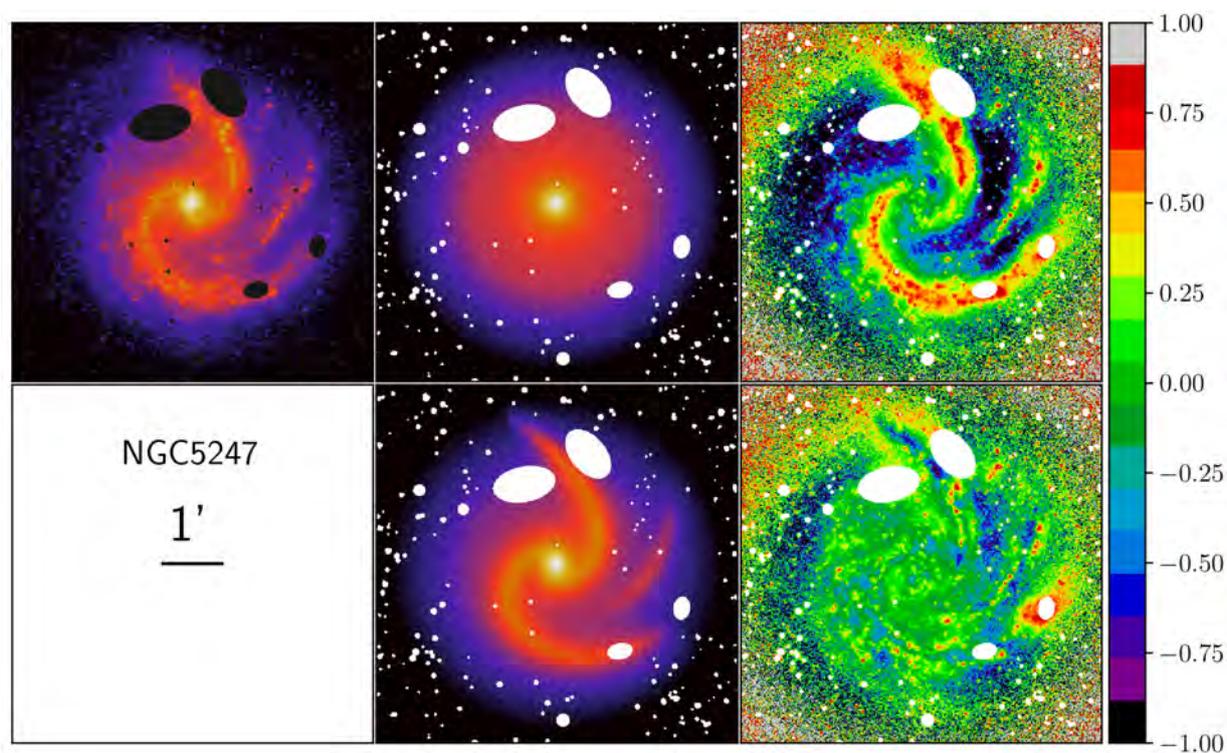


Рис. 1: Декомпозиция галактики NGC 5247. В верхней левой части — исходное изображение; в среднем столбце сверху модель без спиральных рукавов («классическая»), снизу — модель со спиральными рукавами. В правой части — соответствующие изображения относительной разности. Зелёным цветом отмечено хорошее сходство модели и изображения, красным и синим — соответственно, заниженные и завышенные потоки в модели по сравнению с изображением.

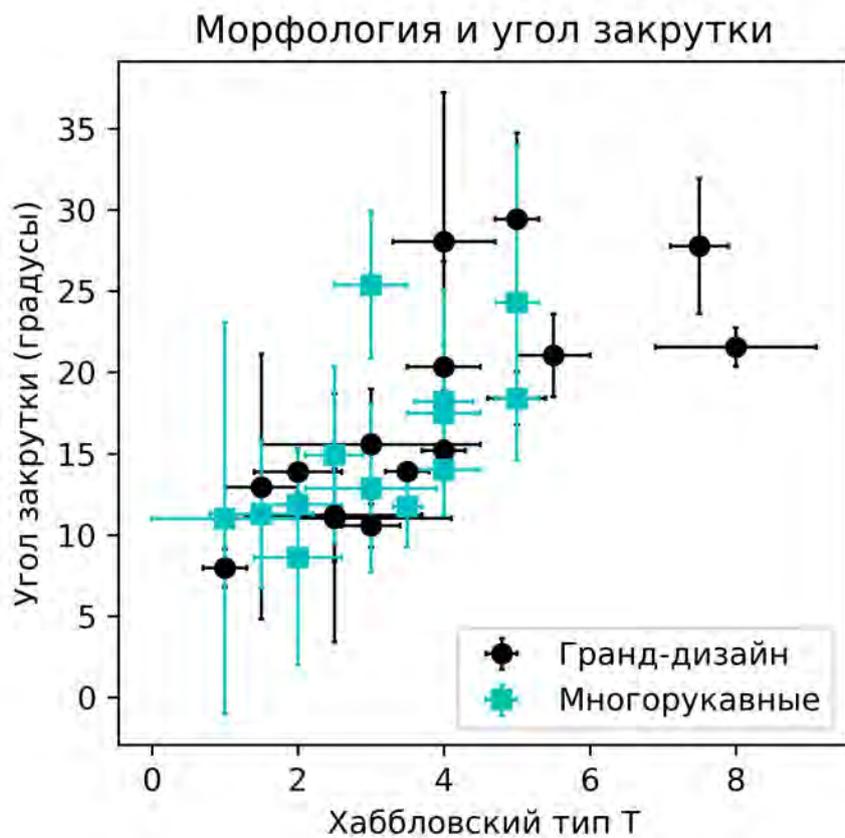


Рис. 2: Средний угол закрутки спиральных рукавов в зависимости от морфологии в обзоре S⁴G.

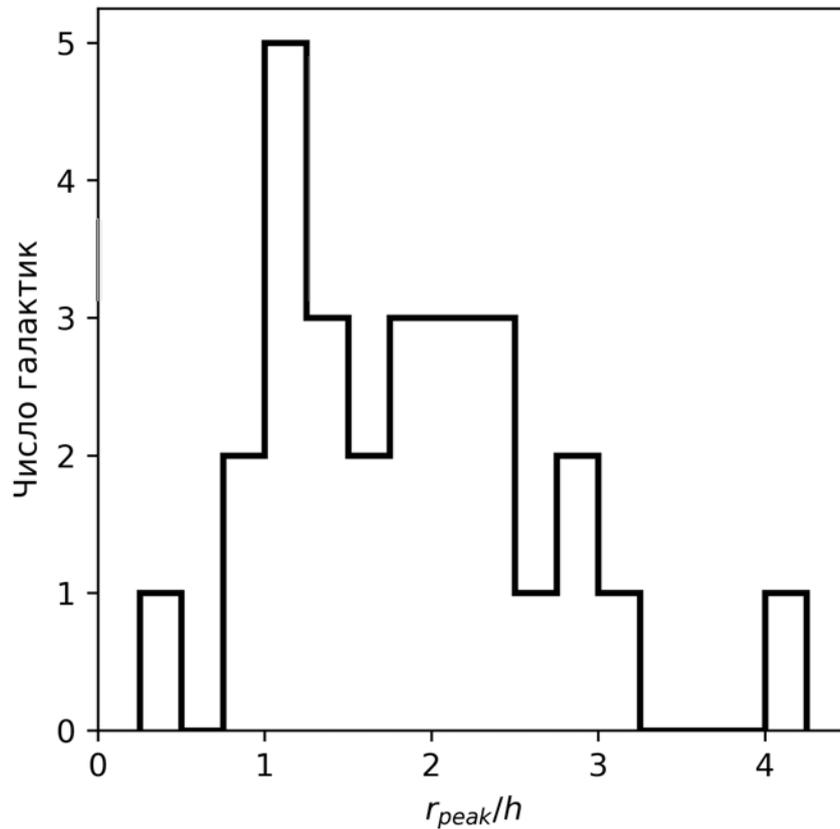


Рис. 3: Гистограмма распределения галактик из обзора S⁴G по отношению r_{peak}/h .

можно использовать модели каждой компоненты, полученные при декомпозиции. Далее соотношение азимутально усреднённого профиля спиральной структуры к азимутально усреднённому профилю галактики целиком будем обозначать $S/T_{\text{az}}(r)$ и называть вкладом спиральной структуры в азимутально усреднённый профиль.

Для галактик из исследованной выборки обнаружено, что в большинстве случаев $S/T_{\text{az}}(r)$ достигает максимума на определённом радиусе r_{peak} , в среднем составляющем около 1,5 экспоненциальных масштаба диска h (см. Рис. 3). Как правило, и во внутренних частях галактики, и на её периферии вклад спиральных рукавов доходит до нуля — последнее, в частности, означает, что яркость спиралей во внешних частях галактики убывает быстрее яркости диска. Из всех галактик выборки только одна демонстрирует иное поведение — NGC 2460, у которой вклад спиралей в азимутально усреднённый профиль возрастает практически до единицы, после чего мало меняется. Таким образом, только у неё модельные спиральные рукава простираются дальше, чем диск: возможно, такую особенность можно объяснить тем, что на небольшом угловом расстоянии от неё расположена галактика IC 2209, и возможное взаимодействие между ними могло сформировать протяжённые приливные рукава у NGC 2460. При этом поведение вклада спиральных рукавов вблизи максимума у разных галактик отличается: это может быть как единственный выраженный пик, так и протяжённое «плато» или несколько локальных максимумов, которые могут возникать из-за немонотонности модели спирального рукава и переменности его угла закрутки, а также из-за того, что вклады отдельных спиральных рукавов могут иметь максимумы на разном расстоянии от центра. На Рис. 4 показано, как выглядит вклад спиральной структуры в азимутально усреднённый профиль для трёх разных галактик. По ссылке <https://github.com/IVChugunov/S4G/tree/main/Azimuthally-averaged%20profiles> можно найти аналогичные изображения для остальных галактик выборки.

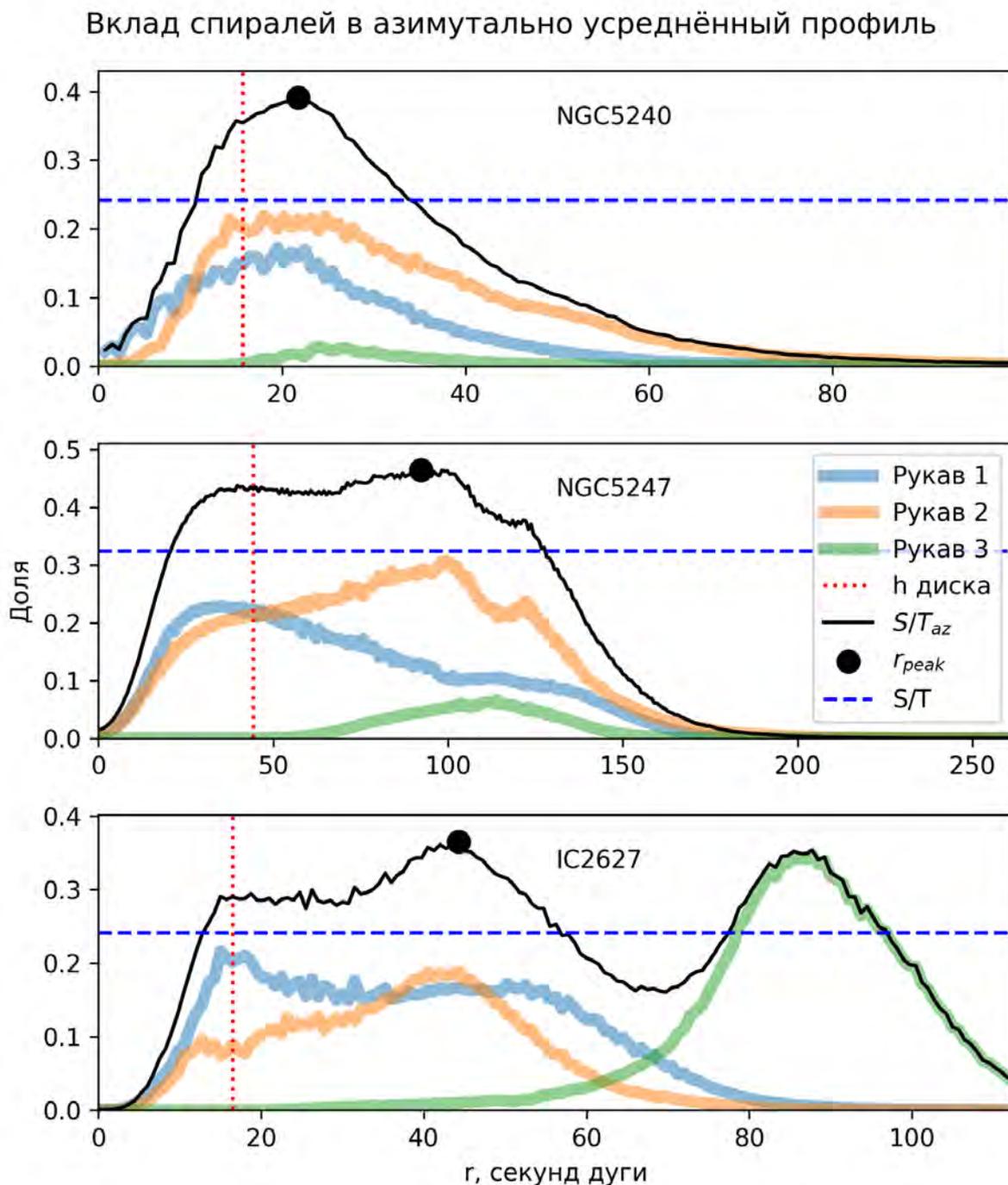


Рис. 4: Вклад спиральных рукавов в азимутально усреднённый профиль от радиуса для галактик NGC 5240, NGC 5247 и IC 2627. Показан вклад рукавов по отдельности (в каждой галактике по три рукава) и в сумме и положение его максимума. Вертикальной линией из точек показана величина экспоненциального масштаба диска h . Горизонтальной пунктирной линией отмечен вклад спиральных рукавов в полную светимость S/T .

Аналогично $S/T_{az}(r)$, для каждой галактики можно определить функцию $T/D_{az}(r)$, которая представляет собой отношение азимутально усреднённого профиля полной модели галактики к азимутально усреднённому профилю диска, и взять значение $T/D_{az}(r_{peak})$. Эта величина характеризует, насколько поверхностная яркость всей модели галактики в азимутальном усреднении выше, чем поверхностная яркость только её диска на том расстоянии, где вклад спиральных рукавов наиболее велик. Учитывая, что на периферии галактик практически во всех случаях излучение диска без рукавов становится доминирующим и T/D_{az} приближается к единице, значение $T/D_{az}(r_{peak})$ показывает, насколько поверхностная яркость галактики на определённом радиусе превышает поверхностную яркость, создаваемую только диском. Иными словами, эта величина должна характеризовать размер «горба» на азимутально усреднённом профиле яркости галактики над профилем яркости лишь одного диска. Появление этого «горба» объясняется вкладом остальных компонент, кроме диска, а в первую очередь — спиральных рукавов, поскольку берётся радиус, на котором их вклад наиболее велик. Учитывая, что величина $T/D_{az}(r_{peak})$ безразмерна и представляет собой отношение поверхностных яркостей, её можно перевести в звёздные величины и выразить в них, что и будет сделано далее.

Можно ожидать, что $T/D_{az}(r_{peak})$ будет зависеть от вклада спиралей в полную светимость S/T . На Рис. 5 приведена диаграмма, по осям которой отмечены эти две величины. На ней прослеживается явная зависимость между параметрами, но вместе с тем наблюдаются и выбросы — три галактики имеют существенно более высокие $T/D_{az}(r_{peak})$, чем остальные при сходных значениях S/T . Одна из галактик — NGC 2460 — уже упомянута выше: в ней рукава простираются значительно дальше диска, поэтому во внешних областях поверхностная яркость полной модели создаётся в основном рукавами и значительно превышает поверхностную яркость диска. Ещё два выброса связаны с галактиками NGC 986 и NGC 4314. Обе эти галактики имеют довольно яркие центральные компоненты и кольца, и, как следствие, доля диска в их светимости заметно ниже, чем у других галактик. В то же время, спиральные рукава в этих галактиках образуют внешние псевдокольца, так что их вклад проявляется на большом расстоянии от центра, где яркость диска мала. Таким образом, при небольшом вкладе в полную светимость рукава в этих галактиках на определённом радиусе оказываются довольно яркими по сравнению с диском.

Оставшиеся галактики демонстрируют достаточно чёткую зависимость между $T/D_{az}(r_{peak})$ и S/T . Данные, в которых были исключены выбросы, были аппроксимированы линейной функцией, получено следующее соотношение: $T/D_{az}(r_{peak}) = (2,87 \pm 0,11) S/T$ в звёздных величинах. Таким образом, учитывая, что для большинства галактик выборки S/T составляет 10–25%, характерные значения $T/D_{az}(r_{peak})$ будут находиться в диапазоне 0,3–0,7^{mag}, хотя для некоторых галактик может достигать и 1,4^{mag}.

На Рис. 6 показано распределение величины $\frac{S/T_{az}(r_{peak})}{S/T}$, то есть, соотношения между максимальным вкладом спиральных рукавов в азимутально усреднённый профиль и их вкладом в общую светимость. В большинстве случаев эта величина попадает в диапазон 1,5–2,5.

На Рис. 7 показан вклад спиральных рукавов в светимость галактики (S/T) в зависимости от её морфологического типа. Здесь не наблюдается чёткого тренда, однако можно отметить, что галактики с наибольшим вкладом спиральных рукавов имеют промежуточные морфологические типы, причём данное наблюдение согласуется с результатом работы S. Savchenko и др. (2020). Этот результат можно связать с тем, что в галактиках ранних морфологических типов (низкие значения T) меньше газа, в их дисках не происходит значительного звездообразования, и можно сделать вывод, что ярких спиральных рукавов в них также нет (Roberts и Haynes, 1994). В области малых T происходит переход к линзовидным галактикам ($T = 0$), в дисках которых спиральные рукава отсутствуют. В то же время, высокие значения T соответствуют поздним морфологическим типам и переходу к неправильным галактикам, звездообразование в которых происходит без появления спиральных рукавов. В спиральных галактиках поздних морфологических типов спиральные рукава многочисленные и клочковатые, и не охватываются использованной моделью, воспроизводящей крупные, упорядоченные рукава.

На Рис. 8 показаны зависимости между долей спиральных рукавов в общей светимости и долей балджа в ней же, а также абсолютной звёздной величиной диска. Как для многорукавных, так

Высота «горба» и вклад спиральных рукавов

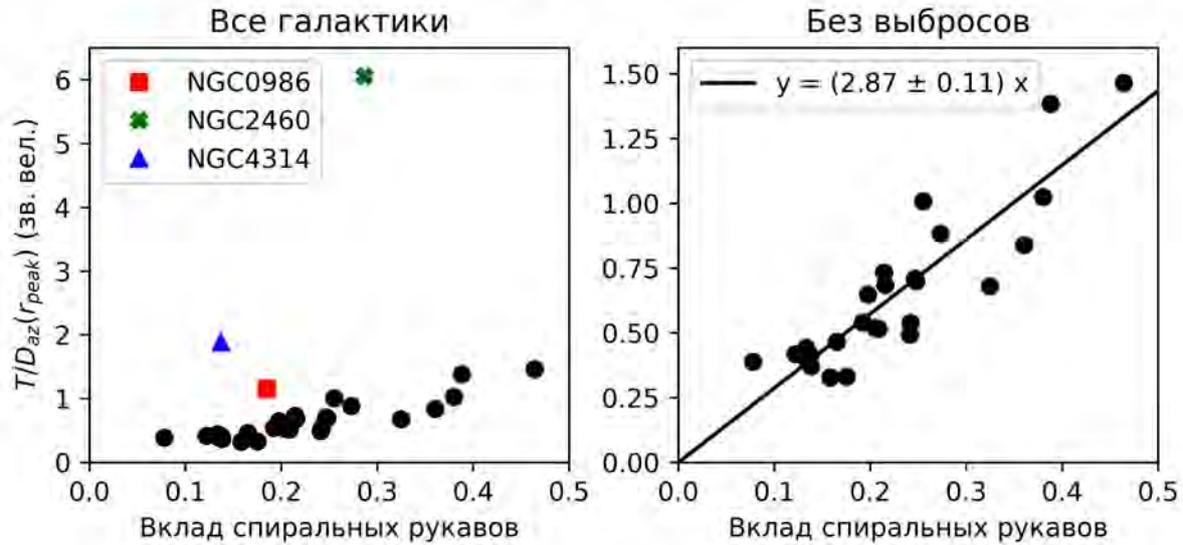


Рис. 5: Зависимость величины $T/D_{az}(r_{\text{peak}})$ (в звёздных величинах) от вклада рукавов в общую светимость. Слева показаны данные для всех галактик выборки, включая те, что выбиваются из зависимости (отмечены некруглыми символами). Справа показаны те же данные без выбросов в более крупном масштабе и их линейная аппроксимация.

и для гранд-дизайн галактик наблюдается повышение доли балджа с ростом доли спиральных рукавов. Подобная зависимость найдена в работе Bittner и др., 2017 для галактик с небольшой долей балджа в полной светимости. Для гранд-дизайн галактик также наблюдается повышение вклада спиральных рукавов для дисков с более высокой абсолютной светимостью. Это наблюдение согласуется с тем фактом, что неправильные галактики, для которых характерны низкие светимости дисков, вообще не имеют спиральных рукавов.

Обсуждение и выводы

В данной работе продемонстрированы возможности применения декомпозиции для исследования спиральных рукавов только на одном примере. Полученные результаты отражают лишь первые шаги в анализе спиральных рукавов при помощи декомпозиции.

Показано, что вклад спиральных рукавов в светимость галактики распределён по радиусу диска сильно неравномерно. Его максимальное значение чаще всего достигается на расстоянии приблизительно $1,5 h$ от центра, и практически во всех галактиках на периферии яркость спиральных рукавов убывает быстрее яркости диска. Впервые найдена линейная зависимость между величиной «горба» на азимутально усреднённом профиле поверхностной яркости, обусловленном вкладом спиральных рукавов, и вкладом рукавов в полную светимость галактики, с коэффициентом $2,87 \pm 0,11$, измерено характерное значение величины такого «горба» — $0,3\text{--}0,7^{\text{mag}}$.

Найденная зависимость между морфологическим типом и вкладом спиральных рукавов в полную светимость (S/T) позволяет из морфологического типа получить грубую оценку S/T , а из неё — оценку высоты «горба» на азимутально усреднённом профиле. Эту величину можно использовать, например, в качестве поправки при оценке параметров диска из азимутально усреднённых профилей галактик. Кроме того, подобная зависимость явно связывает формирование спиральной структуры с эволюцией галактик и должна быть тщательно исследована. Оценка самой величины S/T также может быть полезна при анализе спектрального распределения энергии в галактике или при моделировании другого рода, где важен вклад именно осесимметричной

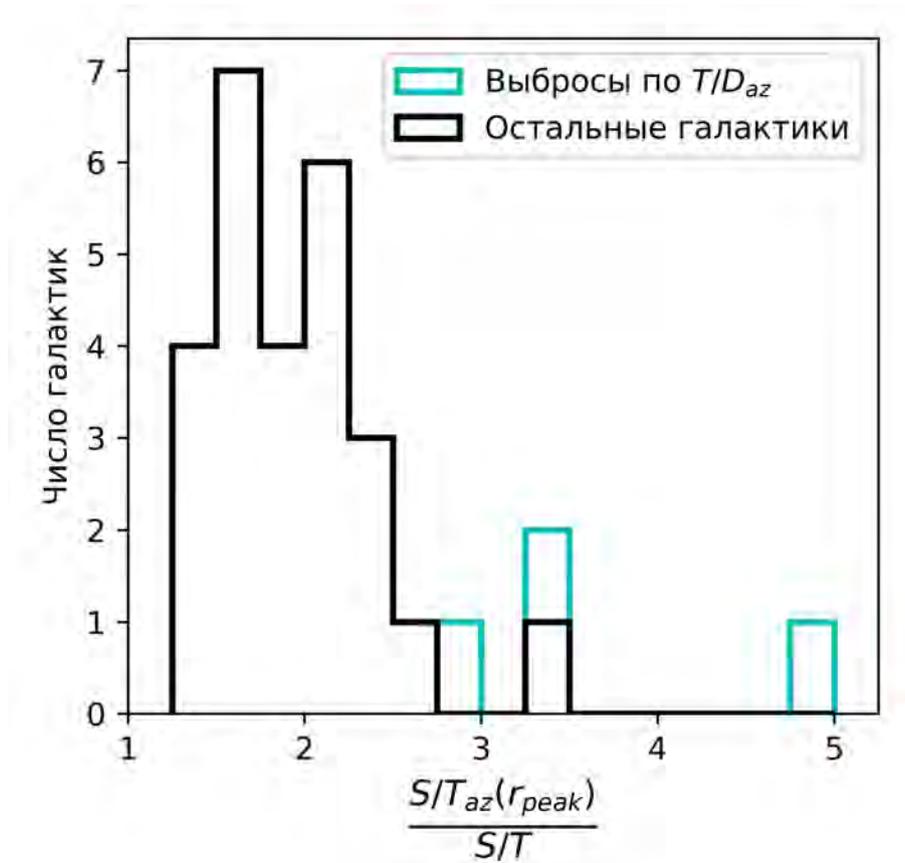


Рис. 6: Гистограмма распределения величины $\frac{S/T_{az}(r_{peak})}{S/T}$. Бирюзовыми столбцами показаны значения для галактик NGC 986, 2460 и 4314, которые выбиваются из зависимости между $T/D_{az}(r_{peak})$ и S/T .

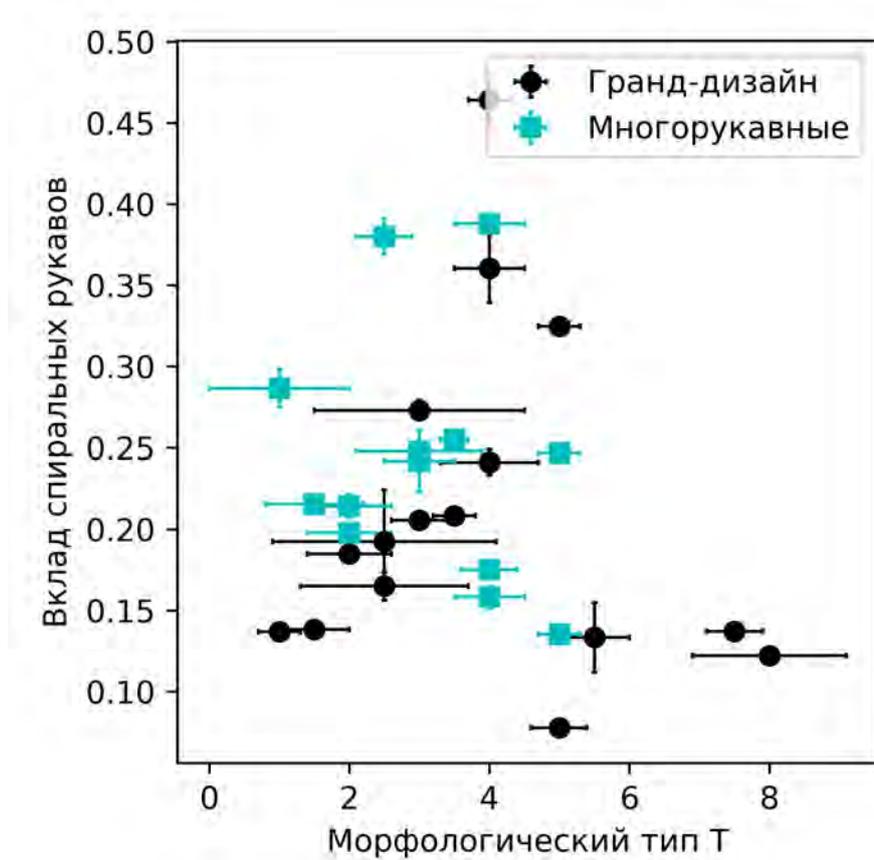


Рис. 7: Вклад спиральных рукавов в общую светимость в зависимости от морфологии.

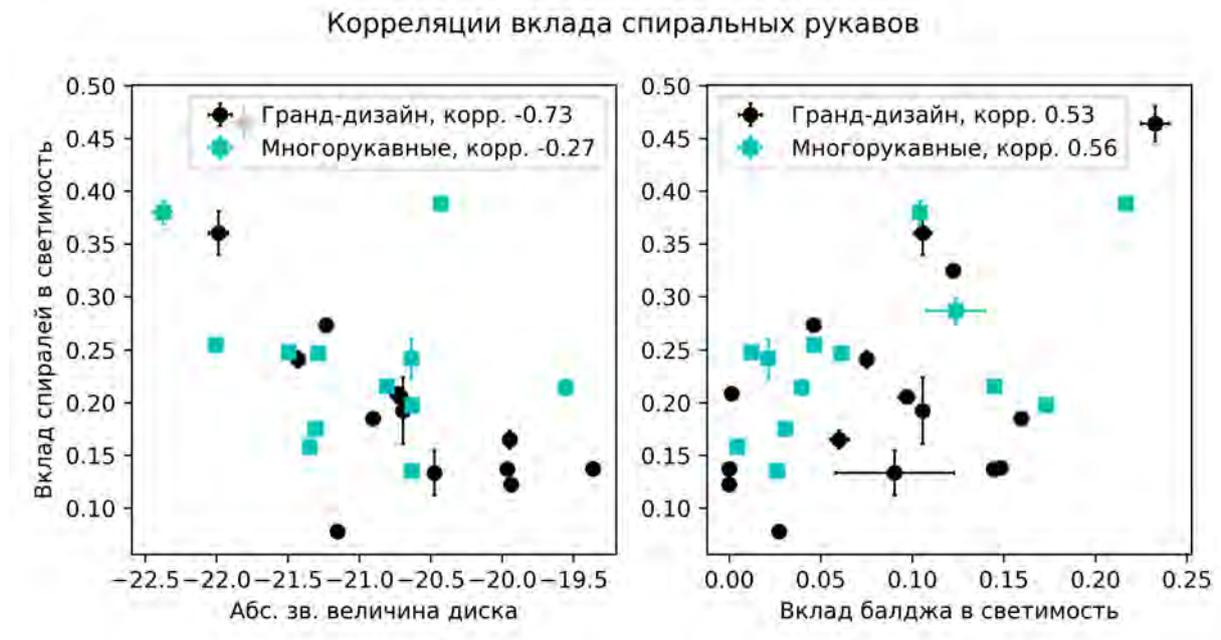


Рис. 8: Вклад спиральных рукавов в общую светимость в зависимости от вклада балджа в общую светимость и от абсолютной звёздной величины диска.

составляющей галактики. Также найденная связь между S/T и абсолютная светимостью диска галактики позволяет использовать полученные значения S/T для грубых оценок светимости диска.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант 22–22–00483.

Список литературы

- Díaz-García, S., H. Salo, J. H. Knapen и M. Herrera-Endoqui (2019). The shapes of spiral arms in the S⁴G survey and their connection with stellar bars. *A&A* 631, A94.
- Erwin, Peter (2015). *IMFIT: A Fast, Flexible New Program for Astronomical Image Fitting*. *ApJ* 799.2, с. 226.
- Méndez-Abreu, J. и др. (2017). Two-dimensional multi-component photometric decomposition of CALIFA galaxies. *A&A* 598, A32.
- Peng, Chien Y., Luis C. Ho, Chris D. Impey и Hans-Walter Rix (2010). Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models. *AJ* 139.6, с. 2097—2129.
- Läscher, Ronald, Laura Ferrarese и Glenn van de Ven (2014). Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. I. Bulge Luminosities from Dedicated Near-infrared Data. *ApJ* 780.1, с. 69.
- Gao, Hua и Luis C. Ho (2017). An Optimal Strategy for Accurate Bulge-to-disk Decomposition of Disk Galaxies. *ApJ* 845.2, с. 114.
- Lingard, Timothy K. и др. (2020). Galaxy Zoo Builder: Four-component Photometric Decomposition of Spiral Galaxies Guided by Citizen Science. *ApJ* 900.2, с. 178.
- Cox, Donald P. и Gilberto C. Gómez (2002). Analytical Expressions for Spiral Arm Gravitational Potential and Density. *ApJS* 142.2, с. 261—267.
- Fridman, A. M. и S. G. Poltorak (2010). Using an assumption about the monotony of spiral arms to determine the orientation angles of galaxies. *MNRAS* 403.3, с. 1625—1632.
- Sonnenfeld, Alessandro (2022). The effect of spiral arms on the Sérsic photometry of galaxies. *A&A* 659, A141.
- Davis, Benjamin L., Alister W. Graham и Ewan Cameron (2019). Black Hole Mass Scaling Relations for Spiral Galaxies. I. $M_{BH}-M_{*,sph}$. *ApJ* 873.1, с. 85.
- Savchenko, S. S. и V. P. Reshetnikov (2013). Pitch angle variations in spiral galaxies. *MNRAS* 436.2, с. 1074—1083.
- Sheth, Kartik и др. (2010). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G). *PASP* 122.898, с. 1397.
- Salo, Heikki и др. (2015). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S⁴G): Multi-component Decomposition Strategies and Data Release. *ApJS* 219.1, с. 4.
- Buta, Ronald J. и др. (2015). A Classical Morphological Analysis of Galaxies in the Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S4G). *ApJS* 217.2, с. 32.
- Makarov, Dmitry, Philippe Prugniel, Nataliya Terekhova, Hélène Courtois и Isabelle Vauglin (2014). HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances. *A&A* 570, A13.
- Moré, Jorge J. (1978). *The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory*. B: Numerical Analysis. Под ред. G. A. Watson. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, с. 105—116.
- Joye, W. A. и E. Mandel (2003). *New Features of SAOImage DS9*. B: Astronomical Data Analysis Software and Systems XII. Под ред. H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski и R. N. Hook. Т. 295. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, с. 489.
- Savchenko, Sergey, Alexander Marchuk, Aleksandr Mosenkov и Konstantin Grishunin (2020). A multiwavelength study of spiral structure in galaxies. I. General characteristics in the optical. *MNRAS* 493.1, с. 390—409.
- Roberts, Morton S. и Martha P. Haynes (1994). Physical Parameters Along the Hubble Sequence. *ARA&A* 32.1, с. 115—152.
- Bittner, Adrian и др. (2017). How do spiral arm contrasts relate to bars, disc breaks and other fundamental galaxy properties? *MNRAS* 471.1, с. 1070—1087.

Examination of azimuthally-averaged surface brightness profiles of the spiral arms using decomposition

I.V. Chugunov¹, A.A. Marchuk^{1,2}

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

Abstract

For the first time we perform the decomposition of 29 galaxies from S⁴G survey considering spiral arms as a separate component. We analyze the contribution of spiral arms to the azimuthally-averaged profiles of galaxies' surface brightness using our models, using models obtained with decomposition. We show that spiral arms' contribution varies strongly with distance to the center, usually reaching its highest value at the radius of about 1,5 exponential scale of the disk and decreasing to zero at the center and on the periphery of the galaxy. We obtain the characteristic values of the «bump» height on the galaxy's azimuthally-averaged profile which is caused by the spiral arms. Spiral arms' contribution to the overall luminosity of the galaxy is investigated, its connection with the Hubble type is also confirmed. Our results can be applied, for the rough estimates of axisymmetric components' share in galaxy's light, which is important for determination of disk parameters based on azimuthally-averaged surface brightness profiles, or for analysis of the spectral energy distribution in galaxy.