

Структурные свойства хозяйских галактик легковесных сверхмассивных черных дыр на основе новых данных космического телескопа «Хаббл»

Л. Г. Осипова^{1,*}, К. А. Гришин^{2,†}, И. В. Чилингарян^{1,‡}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет космических исследований
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52

²Государственный астрономический институт имени Штернберга
Россия, 119991, Москва, Университетский проспект, 13

(Поступила в редакцию 10.06.2025; подписана в печать 15.09.2025)

В настоящей работе было проведено двумерное и одномерное фотометрическое моделирование новых данных с космического телескопа им. Хаббла для галактик с IMBH и для объектов из расширенной выборки с ограничением по массе ЧД до миллиона масс Солнца. При помощи полученных моделей была оценена звездная масса балджа галактики и установлено положение галактик на масштабном соотношении «масса черной дыры – масса балджа». Их расположение на данном соотношении позволяет наложить ограничения на процессы роста черных дыр в режиме малых масс.

PACS: 98.62.Js, 98.62.Ai, 98.52.Eh УДК:

Ключевые слова: черные дыры промежуточных масс, механизмы образования черных дыр промежуточных масс, фотометрическое моделирование галактик, масса балджа, квазары.

ВВЕДЕНИЕ

Черные дыры — это объекты, гравитационное поле которых настолько сильно, что ни вещество, ни электромагнитное излучение не могут покинуть их пределы. Такие объекты описываются наличием горизонта событий — области, за которой никакие сигналы не могут достигнуть внешнего наблюдателя. Современные наблюдения показывают, что сверхмассивные черные дыры располагаются в центрах почти всех массивных галактик, где их наличие подтверждается данными о движении звезд, газа и активных ядрах [1] [2]. Вопрос об их происхождении остаётся открытым.

Черные дыры классифицируют по массе: черные дыры звездной массы, сверхмассивные черные дыры (SMBH) и черные дыры промежуточной массы (IMBH). В современной науке мы достаточно хорошо понимаем механизм образования черных дыр звездных масс: они возникают в результате гравитационного коллапса массивных звезд на последних стадиях эволюции. А вот сценарий формирования и эволюции SMBH в центрах галактик остаётся недостаточно изученным и является одной из важных тем в современной астрофизике. В рамках этой проблемы особый интерес вызывают IMBH. Черные дыры промежуточной массы — это черные дыры, масса которых значительно больше черных дыр звездных масс (до $100M_{\odot}$) и значительно меньше сверхмассивных черных дыр (от $10^6M_{\odot}$) [3], хотя остается открытым вопрос о степени их распространенности, на сегодняшний день надежно наблюдаются в основном ВН с массами $\gtrsim 10^4M_{\odot}$. Тогда как существование менее

массивных остается предметом теоретических моделей. Они являются ключевым элементом в объяснении существования квазаров на этапе ранней Вселенной.

Одной из важнейших проверок наших представлений о формировании и эволюции черных дыр является объяснение существования квазаров в ранней Вселенной — активных ядер галактик — SMBH, имеющих большое красное смещение ($z > 6.3$, всего 700 – 900 млн лет после Большого взрыва) [4]. По современным представлениям за столь короткое время с момента Большого взрыва ни аккрецией вещества, ни слияниями вырасти до SMBH черные дыры звездных масс не могли, так как в среднем ВН удваивает свою массу за 35 млн лет и 700–900 млн лет не хватает для набора необходимой массы. Существует две гипотезы, в рамках которых эта проблема может быть решена:

- звезды поколения III, которые образовались в плотных звездных скоплениях, затем сколлапсировали в черные дыры звездных масс, которые затем слились в IMBH, а те, в свою очередь, в SMBH;
- газовые облака, которые сколлапсировали в массивные IMBH, которые за 700–900 млн лет успевают эволюционировать в SMBH. Эта гипотеза предполагает, что сейчас мы почти не должны видеть IMBH, что не подтверждается наблюдениями.

Помимо этого остаются открытыми вопросы: как и когда образовались черные дыры промежуточных масс? Путем аккреции вещества или слиянием? В каких типах галактик?

Существуют данные, указывающие на то, что сверхмассивные черные дыры (SMBH) эволюционируют в тесной взаимосвязи с балджами (сфероидальными

* liana.osipova28@gmail.com

† grishin@voxastro.org

‡ igor.chilingarian@cfa.harvard.edu

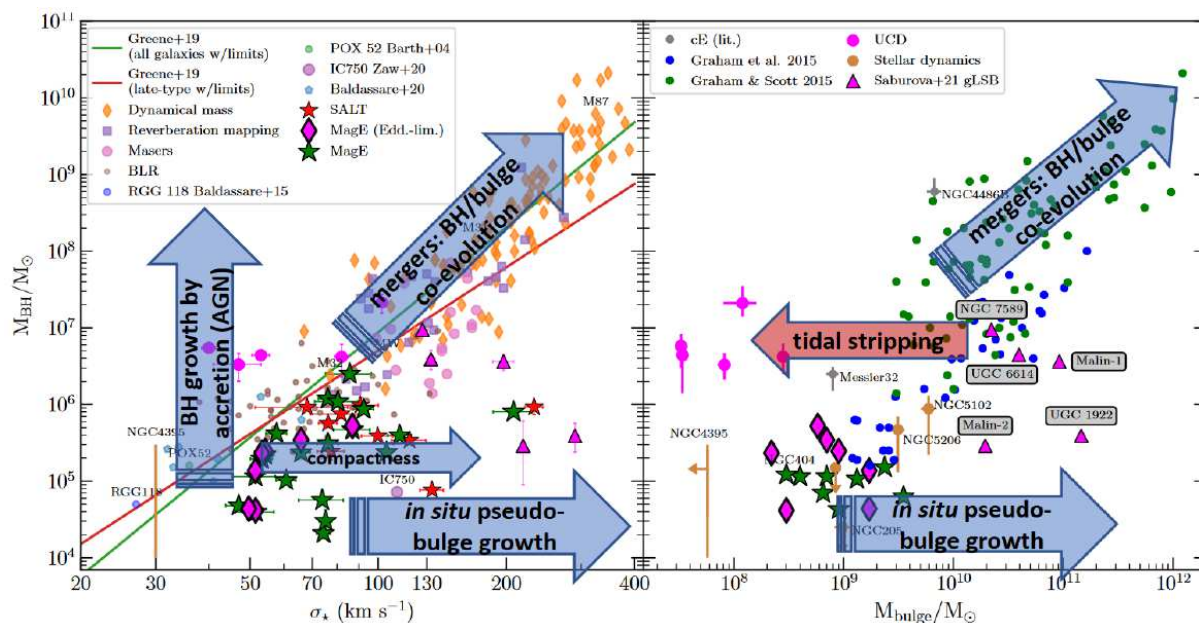


Рис. 1. Масштабное соотношение «масса чёрной дыры – масса балджа»

компонентами) своих галактик-хозяев: [1, 5]. В процессе слияния галактик их центральные чёрные дыры также могут сливаться, формируя новую чёрную дыру. Данный процесс рассматривается в качестве одного из основных механизмов увеличения массы центральных чёрных дыр в галактиках [6]. Кроме того, существенный вклад в рост массы чёрных дыр вносит аккреция газового вещества [7]. То есть известно два основных канала роста массы центральной черной дыры: путем аккреции вещества на нее и путем слияния с другой черной дырой.

Центральные чёрные дыры демонстрируют тесную связь с массой балджа, а также с дисперсией скоростей звёзд в балджах [8, 9] (рис. 1). Эти наблюдаемые зависимости обычно интерпретируются как следствие сопряжённой эволюции балджа и центральной сверхмассивной чёрной дыры. Важно понять, насколько эти соотношения сохраняются в диапазоне меньших масс — выполняются ли они также для промежуточных по массе чёрных дыр (IMBH). Соотношение между массой чёрной дыры и массой балджа считается более точным, поэтому далее будем рассматривать его.

Расположение галактик на данной зависимости позволяет наложить ограничения на процессы роста черных дыр в режиме малых масс.

- Если галактика попадает в область верхней правой синей стрелочки, значит черная дыра в ее центре образовывалась путем слияния с центральными черными дырами других галактик — масса балджа галактики и масса черной дыры увеличиваются пропорционально друг другу.
- Если галактика попадает в область нижней синей стрелочки, значит рост балджа этой галактики

происходит за счет натекания на него вещества, в то время как масса черной дыры не растет.

- Если галактика попадает в область красной стрелочки — происходит приливное обдирание. Масса балджа галактики уменьшается, а масса черной дыры не изменяется.
- Если галактика попадает в область левой верхней синей стрелочки, значит масса ее центральной черной дыры увеличивается за счет аккреции на нее вещества, в то время как масса балджа не меняется.

Недавно путем анализа узких и широких компонент эмиссионных линий в спектрах более чем 800 000 галактик из каталога RCSED было отобрано 305 кандидатов в IMBH. Из них в результате наблюдений на орбитальных рентгеновских обсерваториях у 24 объектов было подтверждено наличие активного ядра с чёрной дырой в центре [10].

В данной работе было проведено фотометрическое моделирование данных Хаббловского космического телескопа для галактик с IMBH и для объектов из расширенной выборки с ограничением по массе ЧД до миллиона масс Солнца. Моделирование при помощи соотношения между звездной массой и светимостью позволяет рассчитать массу балджа галактики. Зная массу балджа и массу черной дыры можем установить положение галактик на масштабном соотношении «масса черной дыры – масса балджа».

Галактики в нашей выборке получились очень разнообразными. Среди галактик часто встречаются спиральные и нерегулярные, а также галактики с пылевыми полосами. Эти особенности затрудняют двумерный

(2D) метод декомпозиции из-за нестабильности модели при наличии нерегулярных структур. В этих случаях более надёжным оказывается одномерный (1D) подход, основанный на аппроксимации радиального профиля яркости.

Данная работа основана на результатах, накопленных за три года. За это время были опробованы разные подходы к анализу изображений, включая 2D-моделирование, автоматизацию предобработки и одномерное моделирование. Нами использована наиболее надёжная комбинация этих методов, позволяющая устойчиво моделировать структуру галактик с чёрными дырами промежуточной массы, что позволило провести фотометрический анализ ~ 30 галактик по данным телескопа им. Хаббла.

1. ДАННЫЕ

1.1. Формирование выборки

Данная работа основана на галактиках из специально сформированной выборки. Наблюдения для галактик из этой выборки были получены по результатам успешной заявки на наблюдательное время на космическом телескопе им. Хаббла.

Предварительная выборка объектов была сформирована на основе спектроскопических данных из каталога [10], где были отобраны галактики с признаками активного галактического ядра (AGN). По следующим критериям был составлен список объектов съёмки для заявки на космический телескоп им. Хаббла:

- масса центральной черной дыры до 1 млн масс Солнца;
- подтвержденное активное рентгеновское ядро;

- еще нет данных с космического телескопа им. Хаббла.

Данные именно с космического телескопа им. Хаббла нужны, так как необходимо высокое разрешение изображения для точного моделирования галактики и дальнейшего точного подсчёта массы балджа. В рамках заявки для каждой галактики были получены данные в трех фильтрах: в F814W, в F475W и в ультрафиолете.

В новых данных, полученных с космического телескопа им. Хаббла присутствуют галактики совершенно разного строения и формы, начиная от эллиптических, анализ которых не так затруднителен, и заканчивая галактиками совершенно нерегулярных форм, моделирование которых вызывало большие трудности и, к сожалению, увеличивало неопределённость оценок, полученных для этих галактик.

1.2. Источник данных и используемые наблюдения

В рамках данной работы используются изображения с космического телескопа им. Хаббла с использованием камеры Wide Field Camera 3 (WFC3). Эта камера является одним из ключевых инструментов HST. Она имеет высокое угловое разрешение (порядка 0.04 секунды дуги на пиксель) и стабильные фотометрические характеристики. Благодаря своему широкому полю зрения ($162'' \times 162''$) и высокой чувствительности, WFC3 подходит для исследования как морфологии центральных областей галактик, так и структур на внешних границах. Основной фильтр, использовавшийся в наблюдениях, F814W — красная часть оптического диапазона. Он был выбран, так как необходимо минимизировать влияние пыли — она поглощает излучение, которое нам необходимо учитывать, но в то же время нам важно высокое разрешение изображения, то есть оптический диапазон.

Таблица 1: Рассмотренные галактики

№	Название	α	δ	m_r	z	$M_{BH}, 10^5 M_\odot$
1	J004413.95+010914.5	11.05812	1.15402	17.656	0.112	3.78
2	J005541.55-002052.6	13.92311	- 0.34791	17.172	0.0752	0.76
3	J005640.40-002311.5	14.16835	-0.38655	15.135	0.0449	13.04
4	J011634.77-000242.6	19.14489	-0.04517	18.99	0.207	6.17
5	J022318.36-083705.8	35.82657	-8.61821	17.058	0.109	6.78
6	J022849.51-090153.7	37.20629	-9.03159	17.641	0.0722	2.02
7	J032041.39+424814.9	50.17251	42.80410	14.08	0.0227	6.53
8	J032043.19-010008.2	50.17997	-1.00230	14.725	0.0361	9.14
9	J080359.97+095846.9	120.99980	9.97970	16.796	0.0339	0.27
10	J084200.56+114020.2	130.50232	11.67232	15.508	0.0663	8.53
11	J084715.69+184635.2	131.81528	18.77652	17.702	0.0781	5.58
12	J085224.89+511210.1	133.10380	51.20282	16.549	0.0729	4.63
13	J090602.28+561044.8	136.50951	56.17911	17.089	0.141	4.67
14	J090713.10-000322.9	136.80456	-0.05632	15.897	0.0937	8.32
15	J090746.92+003430.5	136.94545	0.57511	16.482	0.0534	0.33
16	J091424.76+115625.6	138.60311	11.94038	16.278	0.0313	1.89
17	J091958.79+333750.0	139.99491	33.63053	17.609	0.163	6.7
18	J092348.96+005912.5	140.95398	0.98679	17.214	0.0872	2.58

Продолжение на следующей странице

№	Название	α	δ	m_r	z	$M_{BH}, 10^5 M_\odot$
19	J100510.52+543255.5	151.29394	54.54877	16.793	0.0499	2.18
20	J102213.41+213041.7	155.55585	21.51153	16.733	0.0545	5.63
21	J112545.35+240824.0	171.43893	24.13997	13.92	0.0237	6.76
22	J112825.08+510142.1	172.10445	51.02841	14.648	0.0337	6.7
23	J115916.58-010630.1	179.81906	-1.10837	15.84	0.0603	1.89
24	J121314.27+025555.9	183.30947	2.93227	17.446	0.133	9.05
25	J121328.62+140124.8	183.36935	14.02351	17.156	0.092	1.38
26	J123548.75+291138.9	188.95331	29.19386	14.665	0.0635	9.2
27	J125027.42+001345.6	192.61429	0.22938	15.339	0.0468	8.25
28	J132101.83-030943.5	200.25768	-3.16212	17.09	0.0865	2.2
29	J132544.52-003849.1	201.43544	-0.64692	15.557	0.0545	21.6
30	J140514.58+091633.0	211.31069	9.27566	15.887	0.0694	6.75
31	J140812.75+521956.5	212.05312	52.33241	16.812	0.0813	5.66
32	J140855.27+534919.0	212.23023	53.82196	17.712	0.078	2.15
33	J141558.96+520303.0	213.99565	52.05087	16.532	0.0761	2.1
34	J141611.50+545319.6	214.04796	54.88879	16.302	0.0886	2.83
35	J141738.88+072412.3	214.41197	7.40346	15.92	0.0288	1.16
36	J142107.34-010726.0	215.28062	-1.12384	17.691	0.13	8.92
37	J145835.99+445301.0	224.64991	44.88358	13.487	0.0362	9.8
38	J151634.45+205837.9	229.14362	20.97721	16.569	0.0398	9.62
39	J152442.58+292701.7	231.17746	29.45051	16.105	0.034	9.8
40	J153036.60+424301.7	232.65246	42.71716	13.291	0.0198	2.59
41	J155831.99+272824.2	239.63302	27.47316	16.909	0.0306	1.12
42	J160301.09+194613.7	240.75450	19.77046	16.633	0.105	9.65
43	J162539.87+404804.3	246.41604	40.80112	17.108	0.0286	1.25
44	J164027.63+471256.5	250.11504	47.21568	17.18	0.11	2.6
45	J205337.51+005350.4	313.40632	0.89736	18.902	0.107	2.04
46	J220159.23+115124.4	330.49670	11.85677	18.506	0.169	5.8
47	J221344.07+124240.6	333.43360	12.71129	16.002	0.0676	2.15
48	J230525.42+002414.0	346.35588	0.40390	18.542	0.225	24.06
49	J234807.14-091202.7	357.02976	-9.20076	17.686	0.0776	9.7

№ — номер галактики, используемый в работе в дальнейшем вместо названия, α — прямое восхождение в градусах, δ — склонение в градусах, m_r — звездная величина, z — красное смещение, M_{BH} — масса центральной черной дыры.

Таблица 2: Используемые к ним данные

№	ID датасета	Фильтр	Детектор	t_{exp} , sec	Кол-во flc файлов
1	IEYF01	F814W	WFC3	634	2
2	IEYF02	F814W	WFC3	634	2
3	IEYF03	F814W	WFC3	634	2
4	IEYF05	F814W	WFC3	634	2
5	IEYF07	F814W	WFC3	637	2
6	IEYF08	F814W	WFC3	637	2
7	IEYF10	F814W	WFC3	708	2
8	IEYF11	F814W	WFC3	634	2
9	IEYF13	F814W	WFC3	637	2
10	IEYF14	F814W	WFC3	641	2
11	IEYF15	F814W	WFC3	648	2
12	IEYF16	F814W	WFC3	740	2
13	IEYF19	F814W	WFC3	758	2
14	IEYF20	F814W	WFC3	634	2
15	IEYF21	F814W	WFC3	634	2
16	IEYF22	F814W	WFC3	674	2
17	IEYF24	F814W	WFC3	673	2
18	IEYF25	F814W	WFC3	634	2
19	IEYF26	F814W	WFC3	740	2
20	IEYF27	F814W	WFC3	649	2
21	IEYF37	F814W	WFC3	649	2

Продолжение на следующей странице

№	ID датасета	Фильтр	Детектор	t_{exp} , sec	Кол-во flc файлов
22	IEYF38	F814W	WFC3	740	2
23	IEYF39	F814W	WFC3	634	2
24	IEYF40	F814W	WFC3	634	2
25	IEYF41	F814W	WFC3	641	2
26	IEYF45	F814W	WFC3	657	2
27	IEYF47	F814W	WFC3	634	2
28	IEYF50	F814W	WFC3	634	2
29	IEYF52	F814W	WFC3	634	2
30	IEYF58	F814W	WFC3	637	2
31	IEYF59	F814W	WFC3	740	2
32	IEYF60	F814W	WFC3	740	2
33	IEYF62	F814W	WFC3	740	2
34	IEYF63	F814W	WFC3	740	2
35	IEYF65	F814W	WFC3	637	2
36	IEYF66	F814W	WFC3	634	2
37	IEYF72	F814W	WFC3	708	2
38	IEYF74	F814W	WFC3	649	2
39	IEYF75	F814W	WFC3	657	2
40	IEYF76	F814W	WFC3	708	2
41	IEYF77	F814W	WFC3	657	2
42	IEYF78	F814W	WFC3	648	2
43	IEYF79	F814W	WFC3	634	2
44	IEYF80	F814W	WFC3	724	2
45	IEYF82	F814W	WFC3	634	2
46	IEYF83	F814W	WFC3	641	2
47	IEYF84	F814W	WFC3	641	2
48	IEYF85	F814W	WFC3	634	2
49	IEYF86	F814W	WFC3	637	2

№ — номер галактики (см. табл. 1), ID датасета — ID датасета из архива HLA, используемого в этой работе, Фильтр — фильтр, в котором сделано используемое изображение, Детектор — детектор телескопа им. Хаббла с которого получено изображение, t_{exp} — время экспозиции в секундах.

2. МЕТОДЫ

2.1. Очистка изображения от космических лучей

На изображениях, полученных с телескопа им. Хаббла, часто встречаются следы от высокоэнергичных частиц. Они попадают на матрицу детектора и формируют яркие искажения на итоговом изображении. Встроенный алгоритм обработки данных от космического телескопа им. Хаббла достаточно плохо очищает изображения от космиков, если в датасете мало кадров. Эти артефакты, называемые «космическими», могут проявляться как изолированные точечные всплески, а также в виде вытянутых структур. Важно удалить эти артефакты на этапе предобработки, так как они способны существенно исказить фотометрический профиль галактики.

В данной работе реализована многоступенчатая процедура автоматизированного удаления космиков. Этот процесс включает в себя как классические методы обработки, так и специально написанные скрипты на языке Python для адаптивной фильтрации: применялось комбинированное использование алгоритма

LACosmic [11], а далее покадровое сравнение наблюдений, полученных с телескопа Hubble в рамках одного сеанса съёмки. Метод сочетает в себе как локальную фильтрацию резких градиентов яркости, так и глобальную статистическую проверку согласованности между несколькими изображениями одного и того же объекта.

2.1.1. Алгоритм

Был написан автоматизированный код очистки изображения. Ему на вход подается ID датасета в архиве Хаббла, скрипт скачивает сырые данные, вычищает космики, а потом запускает дальнейший скрипт хаббловской обработки и сохраняет итоговый файл.

Для одного объекта в архиве доступны два изображения формата FLC, снятых с небольшим смещением. Это позволяет эффективно использовать дифференциальное сравнение пикселей в разных кадрах. Поскольку космики проявляются как случайные яркие пятна, их локализация на каждом кадре различается. Астрономические же объекты (ядра галактик, звёзды и др.) при сведении кадров остаются на постоянных координатах.

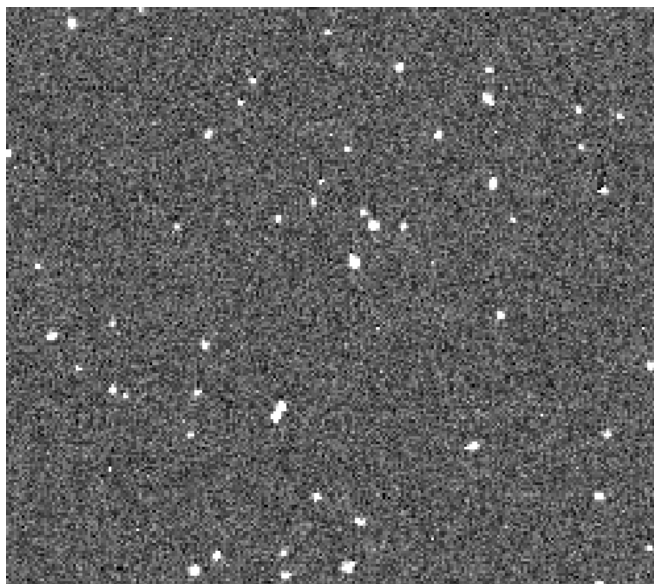


Рис. 2. Изображение снятое на космическом телескопе им. Хаббла имеет белые точки — следы от космических лучей, так называемые «космики»

натах. Такая разница в поведении позволяет выделять аномалии.

Первым этапом является применение алгоритма LAcosmic к двум кадрам по отдельности. Он работает на основе лапласовского фильтра. Фильтр позволяет выделить резкие скачки яркости, свойственные именно космикам, при этом он наименее чувствителен к плавным градиентам. Конкретно используется свёртка с ядром

$$L = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

После первичной фильтрации каждый кадр подвергается билинейной интерполяции и приводится к общей сетке координат. Затем происходит поэлементное сравнение двух изображений по критерию отклонения более чем на 3σ от фонового уровня:

$$I1_{x,y} - I2_{x,y} > 3\sigma_{x,y},$$

где I — изображение, σ — ошибка измерений изображения, x, y — координаты пикселя. Проводится также обратная проверка, где сравнение ведётся в противоположном направлении ($I1_{x,y} - I2_{x,y}$). Таким образом, выделяются не только наиболее яркие всплески, но и более тусклые, устойчивые искажения, часто остающиеся незамеченными при использовании только LAcosmic.

Эта часть процесса лучше работает с более тусклыми космиками, так как в процессе репроекции одного изображения на другое (см рис. 3) происходит размытие изображения билинейной интерполяцией. Особенно чувствительны к этому центры звезд и галактик —

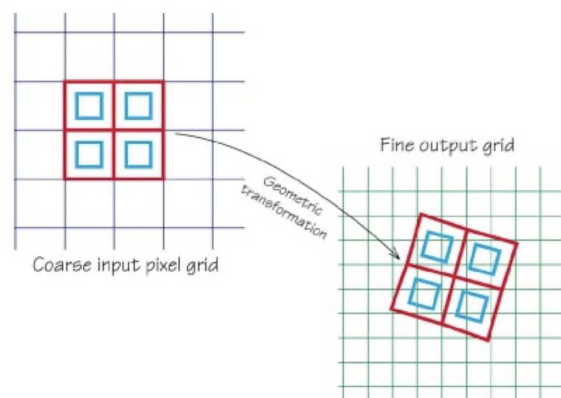


Рис. 3. Проецирование одного изображения на другое

там происходит резкий всплеск яркости. Это приводит к тому, что центры звезд и галактик также могут детектироваться этой частью алгоритма. В данной работе эта проблема разрешена путем установления искусственного порога сверху (пиковые яркости центров звезд и галактик в большинстве случаев сильно превышают яркость космиков).

2.1.2. Результаты предобработки

Такой гибридный подход сочетает чувствительность к одиночным и слабым космикам с устойчивостью к ложным срабатываниям. Визуальная проверка каждой пары изображений подтверждает, что алгоритм удаляет космики, не нарушая целостности астрономического сигнала. Этот подход был успешно применён ко всей выборке из более чем 50 галактик, обеспечив надёжность последующего фотометрического моделирования и расчёта параметров балджа.

Также на изображении наблюдаются черные артефакты, обусловленные эффектами коррекции переноса заряда при считывании данных с матрицы. С целью их удаления изображение было сегментировано на квадратные участки, в пределах которых исключались пиксели с интенсивностью, существенно отклоняющейся в сторону понижения — ниже порогового значения, определяемого как медианное значение яркости минус три величины стандартного отклонения.

2.2. Расчет кадра ошибок

Изображение галактик, как любое физическое измерение имеет погрешность, это нужно учитывать при моделировании — чем больше ошибка потока в пикселе, тем меньший статистический вес он имеет при моделировании. Мы считаем, что процесс регистрации фотонов на детекторе — пуассоновский. Следовательно можем считать, что ошибка — это корень из количества измерений (количества фотонов). Также нужно

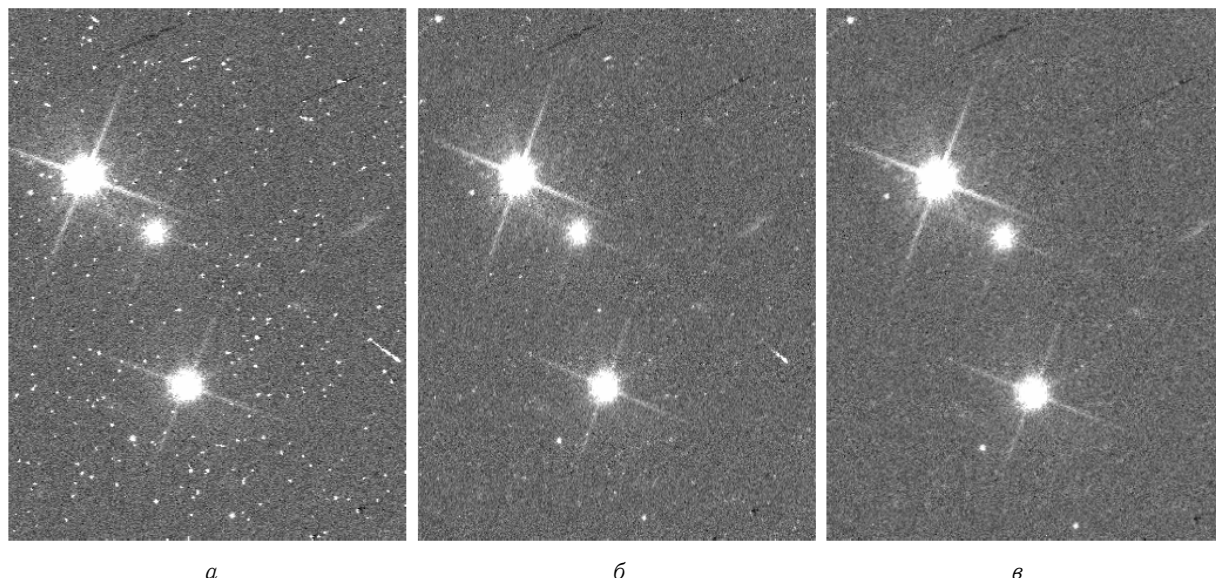


Рис. 4. Результат очистки от космиков: *а* — сырое изображение, *б* — после применения метода лакосмик к данному изображению, *в* — после вычищения космиков, при помощи сравнения со вторым изображением

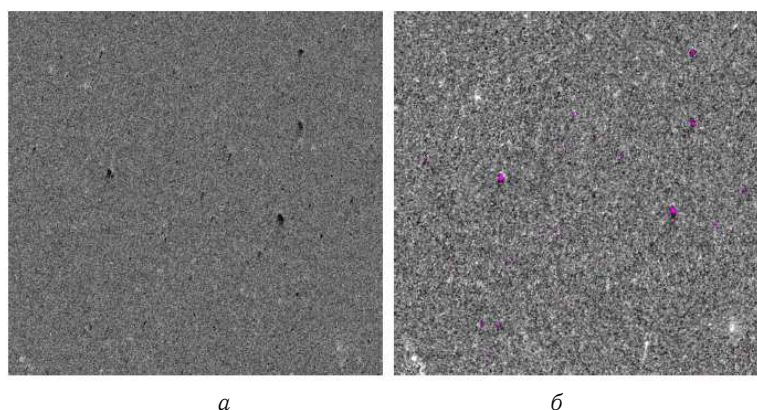


Рис. 5. Результат очистки от черных точек

учесть, что кадр мы берем с уже вычтенным фоном неба, а он тоже дает вклад в ошибку.

Ошибка кадра считается по формуле, нормированной на время экспозиции:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sigma_{RDN}^2 + \sigma_F^2}}{t_{exp}},$$

где σ_{RDN} — шум считывания, t_{exp} — время экспозиции, $\sigma_F = img * wgt + mdsky$, $mdsky$ — вычтенный фон неба, img — кадр изображения, wgt — кадр весов.

Для создания `fits` файла с ошибками использовался код на языке `Python`, на вход ему подавался кадр с изображением галактики.

Полученная карта ошибок используется на всех этапах анализа: как при построении профилей яркости, так и при расчёте χ^2 в процессе подбора модели. При переходе к изофотной системе координат значения σ усредняются по кольцам и масштабируются в соответ-

ствии с числом пикселей в каждом кольце, что позволяет отразить изменение точности с ростом радиуса.

2.3. Преобразование потоков в кадре в физические величины

Для того чтобы из измеренного фотометрического потока перейти к физическим характеристикам галактики, таким как её светимость и, в дальнейшем, масса балджа, необходимо корректно выполнить преобразование из физических измерений сначала в наблюдаемую яркость, а затем и в абсолютную яркость. Это требует учёта фотометрических параметров прибора.

ZP (zero point) — коэффициент преобразования потоков в кадре в звездные величины. Общая формула: $m = ZP - 2.5 \log_{10} f$, где f — количество фотонов в единицу времени, которые падают на единичную площадь,

m — наблюдаемая звездная величина.

В данной работе расчет нуля-пункта производился по следующей формуле [12]:

$$ZP = -2.5 \log_{10} \text{PHOTFLAM} - 21.1 - 5 \log_{10} \text{PHOTPLAM} + 18.6921.$$

Значения PHOTFLAM и PHOTPLAM были взяты из заголовков файла кадра.

2.4. Функция рассеяния точки

На входной апертуре телескопа происходит дифракция, поэтому при получении изображения любой точечный объект становится размытым. Функция рассеяния точки (Point Spread Function, PSF) описывает отклик телескопа на точечный источник света и играет критическую роль при фотометрическом моделировании, особенно в центральных областях галактик, где вклад ядра или активного галактического ядра (AGN) может быть значительным. Без точного учёта PSF модель может либо переоценить яркость центрального компонента, либо некорректно интерпретировать её как часть балджа.

Камера WFC3, использовавшаяся в наблюдениях, имеет хорошо изученную и относительно стабильную PSF, которая, тем не менее, зависит от положения на детекторе, длины волны (фильтра) и временных факторов. Для фильтра F814W характерна достаточно узкая центральная часть PSF ($0.07''$), с выраженными крыльями, которые могут вносить вклад в периферию балджа.

Для создания этой функции использовалась программа TinyTim [13]. Ей на вход подается:

- инструмент и детектор в нем,
- координаты объекта на детекторе,
- фильтр,
- размер функции (обычно используется $3'' \times 3''$).

На выходе мы получаем файл с изображением функции рассеяния точки (PSF).

Точный учёт PSF позволил более надёжно отделить вклад ядра от балджа и обеспечил корректность итоговых фотометрических параметров, используемых в последующих расчетах массы балджа и анализе масштабных зависимостей.

2.5. Маскирование лишних объектов в кадре

Важным этапом подготовки изображений к фотометрическому анализу является маскирование — удаление из рассмотрения всех нежелательных источников света, которые могут исказить извлекаемый профиль яркости. К таким объектам относятся звёзды на переднем плане, фоновые галактики, артефакты от ярких

пикселей и любые другие структуры, не относящиеся к основной галактике. Если не выполнить это корректно, фитирование будет учитывать чужие световые компоненты, что приведёт к неправильной интерпретации структуры балджа и занижению точности оценки его параметров.

Маскирование проводилось в два этапа: автоматический и ручной. На первом этапе использовалась процедура детектирования источников с помощью специального программного обеспечения SExtractor. SExtractor — стандартный инструмент для детектирования объектов на изображениях. Программа выделяет источники на основе превышения порога сигнала над уровнем фона, формирует карту объектов. Результатом является бинарная маска, где все внешние объекты за пределами основной галактики помечаются как исключённые. Следующий этап — ручная проверка и доработка маски. Используется визуальный просмотр в DS9 с наложением сегментационной карты на исходное изображение. При необходимости добавляются маски на объекты, не выделенные автоматически.

Готовая маска сохранялась как бинарный массив и использовалась на всех этапах анализа. Благодаря этому удавалось значительно повысить точность моделирования и избежать ложных компонент, возникающих из-за неучтённых внешних объектов.

2.6. Фотометрическое моделирование: методология

Фотометрическое моделирование представляет собой ключевой этап анализа в данной работе. Моделирование позволяет получить количественные характеристики структурных компонентов галактик и, в первую очередь, определить вклад балджа в общее распределение яркости. Это необходимо для последующего расчёта массы балджа и построения масштабных соотношений между его параметрами и характеристиками центральной чёрной дыры. Ранее использовалось только двумерное моделирование (2D), реализованное в программном обеспечении Galfit. Однако в рамках данной работы круг методик был расширен: основной упор сделан на применение одномерного (1D) подхода, который оказался более устойчивым и адаптируемым к разнообразной морфологии исследуемых объектов. Такой подход был реализован с помощью набора скриптов на языке Python, что также позволило автоматизировать значительную часть анализа и упростить его масштабирование.

Применение сразу двух методик — 2D и 1D — даёт возможность кросс-проверки полученных параметров и позволяет использовать преимущества каждого из подходов в зависимости от особенностей конкретной галактики. В тех случаях, когда морфология объекта относительно регулярна, а профиль симметричен, метод Galfit позволяет использовать все данные изображения, в том числе пространственную информацию. Однако если галактика имеет пылевые полосы, нере-

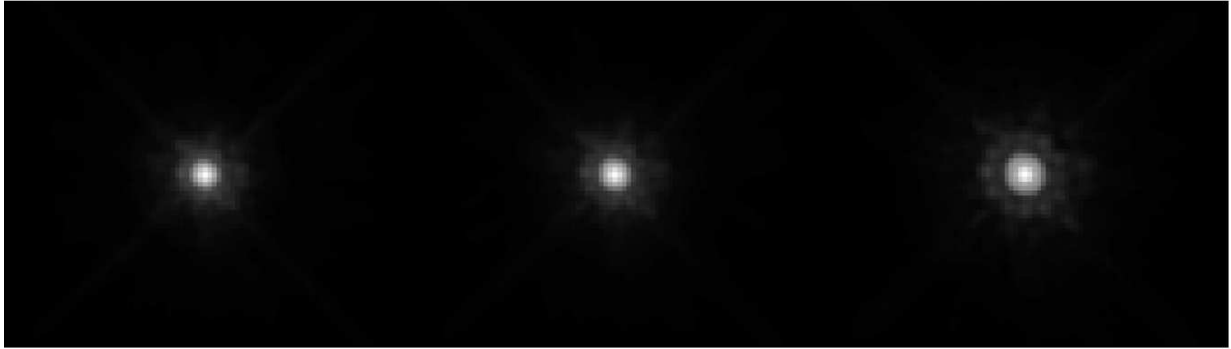


Рис. 6. psf для разных длин волн: 475 нм, 606 нм, 814 нм

гулярности, одномерный подход становится предпочтительным.

2.6.1. 2D-моделирование: *Galfit*

Galfit [14] — программный пакет для двухмерной декомпозиции профилей яркости галактик путем проведения нелинейного метода наименьших квадратов, в ходе которого ищутся значения параметров, которые соответствуют минимуму метрики χ^2 . Используется для моделирования изображения галактики аналитическими функциями. После чего значения получившихся в модели параметров можно использовать в дальнейшем анализе. Выражение для метрики χ^2 , минимизация которой происходит в ходе моделирования (из рассмотрения исключаются замаскированные пиксели):

$$\chi^2 = \frac{1}{N_{\text{dof}}} \sum_{x=1}^{nx} \sum_{y=1}^{ny} \frac{(\text{flux}_{x,y} - \text{model}_{x,y})^2}{\sigma_{x,y}^2},$$

где $\text{model}_{x,y} = \sum_{\nu=1}^n f_{\nu,x,y}(\alpha_1 \dots \alpha_n)$, $\text{flux}_{x,y}$ — поток в пикселе (x, y) , $\sigma_{x,y}$ — ошибка потока в пикселе (x, y) , N_{dof} — количество степеней свободы в модели.

Метод наименьших квадратов применим, так как процесс падения фотонов гауссовский, а все выбросы маскируются и не учитываются при моделировании.

В данной работе фотометрические профили галактик моделируются набором аналитических функций, зачастую профилями Серсика [15]

$$\Sigma(r) = \Sigma_e e^{-\kappa[(r/r_e)^{1/n} - 1]}$$

где $\Sigma(r)$ — поверхностная яркость на расстоянии r от центра, Σ_e — поверхностная яркость на эффективном радиусе r_e , n — индекс Серсика, определяющий крутизну профиля, κ — коэффициент нормировки, зависящий от n и выбираемый таким образом, чтобы радиус r_e охватывал половину полной светимости компоненты. Поскольку интеграл от функции яркости зависит от формы профиля (а значит, от n), параметр $\kappa(n)$

подбирается численно так, чтобы это условие выполнялось. При $n = 1$ (экспоненциальный диск) $\kappa \approx 1.678$, при $n = 4$ (профиль де Вокулёра, характерный для эллиптических галактик) $\kappa \approx 7.669$.

Для дискового компонента обычно $n \approx 1$ (чему соответствует экспоненциальный закон падения яркости), а для балджей галактик различных типов $1 < n < 4$, возрастая (в среднем) с ростом относительной светимости балджа. Балджи невысокой светимости часто сильно сплюснуты, имеют радиальный профиль яркости, близкий к экспоненциальному, и похожи на утолщенные диски (их часто называют псевдобалджами). Для эллиптических галактик, как и для ярких балджей, которыми обладают галактики S0–Sa, обычно $n \approx 4$ (закон, найденный де Вокулером [16] и носящий его имя).

На вход программе *Galfit* подается:

- изображение галактики,
- файл с ошибками,
- функция рассеяния точки (PSF),
- конфигурационный файл с количеством и типом компонент в модели, а также с начальными приближениями для параметров этих моделей.

Galfit складывает все компоненты, получает 2D массив (которому соответствует изображение) и сворачивает с функцией рассеяния точки. Оптимизируя, приближает модель к минимальному значению χ^2 .

На выходе мы получаем:

- изображение самой галактики,
- изображение полученной модели,
- файл с параметрами модели,
- остатки — изображение галактики минус изображение её модели.

По изображению с остатками мы можем судить, насколько хорошо нам удалось промоделировать галактику.

Среди основных сложностей, с которыми приходилось сталкиваться при работе с *Galfit*, можно выделить:

- нестабильность решений при наличии сложной морфологии или значительного фона;
- сильная зависимость результата от начальных условий и качества маски.

Эти сложности обусловили необходимость включения альтернативной стратегии анализа — одномерного подхода, который в ряде случаев демонстрировал более стабильные и интерпретируемые результаты.

2.6.2. 1D-моделирование: профиль яркости

Одномерное моделирование в данной работе применяется как основной инструмент анализа галактик со сложной морфологией, нерегулярной структурой или низким отношением сигнал/шум. Такой подход заключается в построении усреднённого радиального профиля яркости и его последующей аппроксимации аналитическими функциями. Профиль извлекается с помощью специально разработанных скриптов на *Python* с использованием модуля *photutils*. Для каждого изображения центр изофот задавался вручную с точностью до целого пикселя как максимум потока на изображении, а начальные значения эксцентриситета и положения главной оси выбирались визуально. При этом ориентация изофот и их эллиптичность не предполагались постоянными — они определялись на каждом радиусе при помощи адаптивного подбора параметров с использованием алгоритма *Ellipse* из библиотеки *photutils*. Таким образом, фотометрия выполнялась по адаптивным эллипсам, позволяющим моделировать возможные вариации формы галактики с расстоянием от центра.

Профиль представляет собой массив точек вида: эффективный радиус, яркость в данном кольце, соответствующая ошибка, рассчитанная на основе карты шумов. Далее профиль аппроксимируется с помощью комбинаций аналитических моделей: *Sersic*-профиля, экспоненциального диска, *PSF*-компоненты. В отличие от 2D-фита, здесь модель представляет собой одномерную сумму компонент, которая может быть при необходимости дополнительно свёрнута с функцией *PSF*. Аппроксимация проводится методом наименьших квадратов с использованием функции *lmfit*, при этом учитываются индивидуальные веса каждой точки. К преимуществам данного подхода можно отнести:

- устойчивость к нерегулярным структурам и шуму в изображении;
- относительную независимость от формы галактики и ориентации изофот;
- визуальную наглядность и простоту контроля качества моделей;

- возможность автоматизации обработки больших массивов изображений.

Особенно важно, что 1D-модель позволяет напрямую контролировать вклад каждой компоненты в общий профиль и легче диагностировать переоптимизацию или недоучёт структуры. В сложных случаях, когда ядро перекрывает балдж или наблюдаются артефакты на изображении, одномерный профиль часто остаётся единственным надёжным способом количественного анализа.

2.7. Автоматизация

В рамках данной работы был разработан и реализован программный пайплайн, обеспечивающий полную автоматизацию всех ключевых этапов обработки астрономических изображений. Он включает: автоматическую очистку космических лучей, генерацию карты ошибок, создание функции рассеяния точки (*PSF*), автоматическое маскирование посторонних объектов, а также подготовку всех входных файлов для фотометрического анализа как в 2D (*Galfit*), так и в 1D-аппроксимации.

Система написана на языке *Python* и интегрирует специализированные модули обработки изображений, собственные скрипты и инструменты для взаимодействия с архивами *Hubble* (*HLA*). Пайплайн обеспечивает устойчивость к разнообразным форматам данных и позволяет обрабатывать большие массивы изображений с минимальным участием оператора. Благодаря автоматизации удалось значительно сократить время, необходимое для анализа выборки из почти 50 галактик, и обеспечить однородность методики обработки.

2.8. Расчёт массы балджа

Получив в результате моделирования изображения значения звездных величин компонент галактики, мы можем приступить к оценке массы балджа.

2.8.1. Оценка светимости

По красному смещению z можем с помощью закона Хаббла определить d [17]. Использовалась постоянная Хаббла $H_0 = 67.66 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$ из модели [18].

Зная наблюдаемую звездную величину m и расстояние до галактик d в парсеках мы можем рассчитать абсолютную звездную величину M (звездную величину, которая бы имела галактика, если бы она находилась на расстоянии 10 пк.):

$$M = m - 5 \log \frac{d}{10 \text{ pc}}$$

Коррекция на межзвёздное поглощение в данной работе не применялась, поскольку фильтр F814W уже минимизирует влияние пыли, а большинство объектов располагается вне плотных пылевых слоёв Млечного Пути.

После чего мы рассчитываем абсолютную светимость в светимостях солнца:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 10^{-0.4(M-M_{\odot})}$$

$M_{\odot}$ — абсолютная величина Солнца. Для каждого детектора и фильтра она своя, берем данные из табл. [19].

2.8.2. Оценка погрешностей светимости компонент

Параметры, получаемые в ходе фитирования изображений галактик, подвержены как случайным, так и систематическим ошибкам. Особый интерес представляет светимость отдельных компонентов (в частности балджа), так как она напрямую используется в расчёте массы и в последующем анализе масштабных соотношений.

На основе обобщения данных из ряда современных исследований, в которых декомпозиция выполнялась с помощью GALFIT или аналогичных методов, можно выделить характерные диапазоны ошибок.

- Светимость балджа определяется с относительной ошибкой порядка 20–40%, особенно в условиях ограниченного пространственного разрешения, сильного вклада ядра или сложной морфологии.
- Светимость диска, как правило, восстанавливается более надёжно, с типичной ошибкой 10–15%.
- При высоком сигнале/шуме и хорошей маске ошибок (например, $S/N > 100$, фильтр F814W), оценки улучшаются и ошибка светимости может снижаться до 10%.

В работах [20, 21] и [22] проводились подробные симуляции галактик с заданными параметрами, встроенных в реальные фоны. Это позволило оценить максимальные и типичные ошибки светимости. В частности, систематическая ошибка в светимости балджа достигала 0.3–0.4 звёздной величины, что эквивалентно ~30–40% в светимости.

Одномерные подходы (1D), использованные в данной работе параллельно с GALFIT, демонстрируют аналогичный порядок ошибок. При точной аппроксимации профиля, правильном учёте PSF и корректной маске ошибка в светимости компонентов составляет ~15–25%, но может быть выше при нерегулярной морфологии и смешивании компонентов.

Таким образом, с учётом доступных данных и подтверждённых в литературе значений, в данной работе как разумная верхняя граница оценки погрешности светимости балджа принимается значение порядка

30–40%. Это значение используется для последующего анализа неопределённостей в массах балджей и масштабных соотношениях.

2.8.3. Оценка отношения масса-светимость $\frac{M}{L}$

Отношение массы к светимости — это один из ключевых параметров, позволяющий оценить массу звездной системы по ее светимости. Оно зависит от химического состава, возраста звезд, начальной функции масс и фильтра и рассчитывается на основе моделей эволюции звезд и их интегральных свойств. Отношение рассчитывалось с использованием библиотеки звездных населений PEGASE [23] при предположении начальной функции масс Кroupa [24]. Значение M/L определялось как отношение полной массы звездного населения (включая остатки) к его интегральной светимости в заданном фотометрическом диапазоне.

2.8.4. Оценка погрешностей при подсчете $\frac{M}{L}$

На основе анализа современных работ можно установить ориентировочную верхнюю границу типичной ошибки при расчёте $\frac{M}{L}$ с использованием базовых подходов.

По оценкам [25, 26], разброс в оценках $\frac{M}{L}$ при использовании цветовых калибровок может достигать 0.3–0.4 dex, особенно для галактик с активным звездообразованием или сложной морфологией. Аналогичные значения приводятся в работе [27], где подчёркивается, что даже при фиксированной IMF и известной истории звездообразования остаточная систематическая ошибка может достигать фактора 2.5 по массе (т.е. до 0.4 dex).

Таким образом, при использовании упрощённых моделей со стандартным $\frac{M}{L}$ разумно закладывать верхнюю границу погрешности в пределах ~0.4 dex. Однако стоит заметить, что спектральные оценки по параметрам звездных населений несколько точнее, чем цветовые, поэтому значение 0.4 dex представляет собой скорее пессимистическую верхнюю оценку систематической погрешности.

2.8.5. Оценка массы балджа

В ходе фотометрии были получены значения светимости L , также для каждой галактики были оценены соотношения $\frac{M}{L}$. Итоговые массы можем посчитать следующим образом:

$$M^* = L \left(\frac{M}{L} \right),$$

где $\frac{M}{L}$ — отношение масса-светимость для фильтра F814W.

Итоговые ошибки в подсчете массы балджа складываются из ошибок при подсчете светимости балджа и ошибок в оценке массово-светового соотношения. Основной вклад в неопределенность массы балджа вносит определение массово-светового соотношения. Получаем, что верхняя оценка на итоговую величину погрешности оценки массы балджа равна примерно 0.4 dex.

ки, изображения самой галактики, модели и разницы между изображением и моделью. Для каждой галактики отобраны компоненты, из которых состоит балдж, подсчитана суммарная светимость балджа. По формулам из раздела 2 рассчитана масса балджа, после чего все галактики нанесены на масштабное соотношение «масса черной дыры – масса балджа».

А. 3.1. Результаты моделирования

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ФОТОМЕТРИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной главе представлены результаты декомпозиции галактик: параметры компонент каждой галакти-

3.1.1. 2D-фиты

На данных изображениях слева направо: изображение галактики, модель галактики и остатки (изображение минус модель).

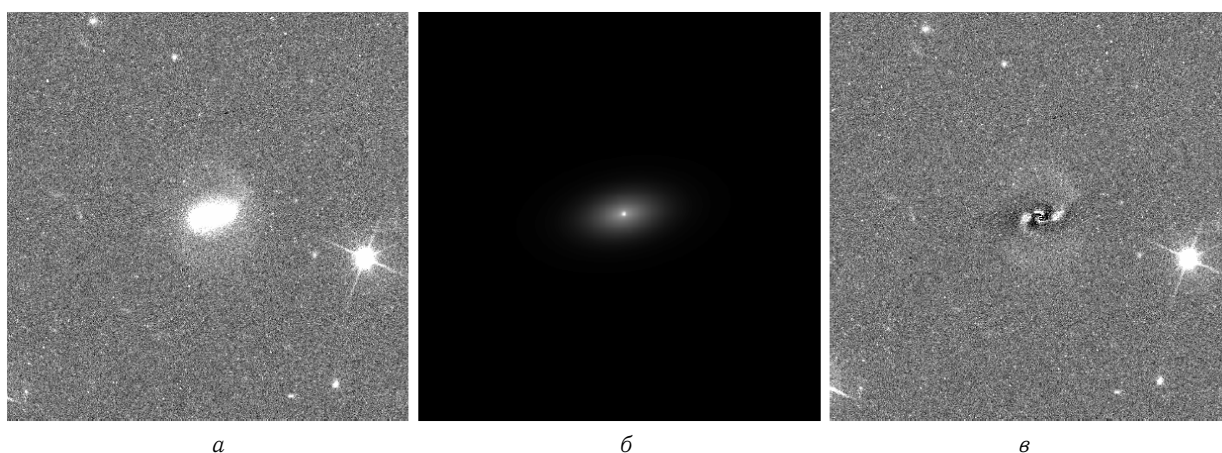


Рис. 7. №1, $J004413.95+010914.5$

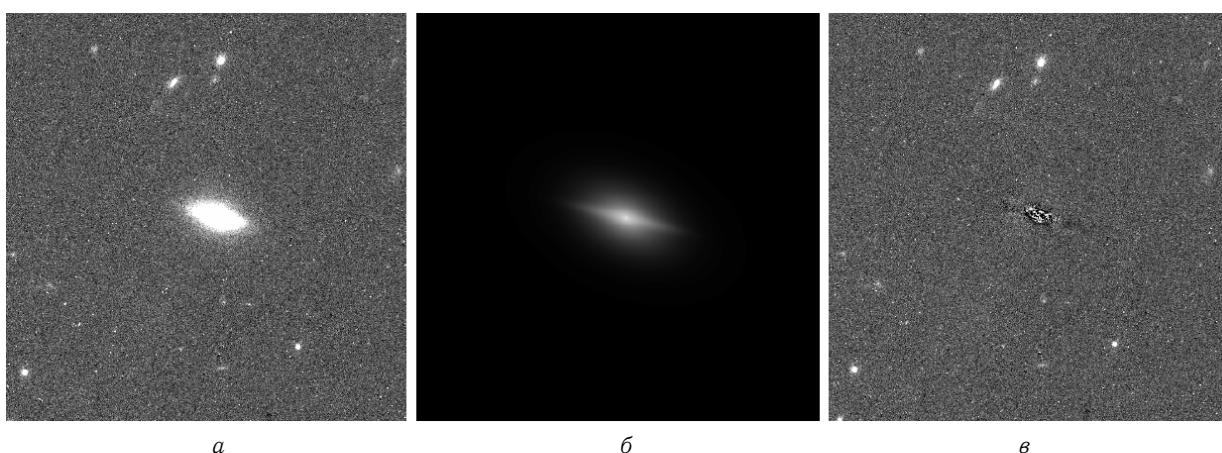
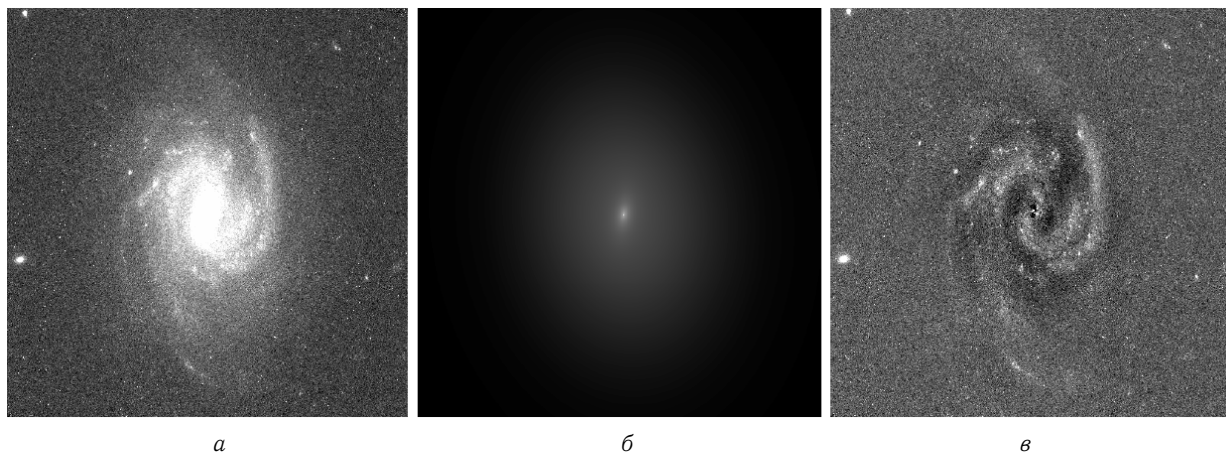
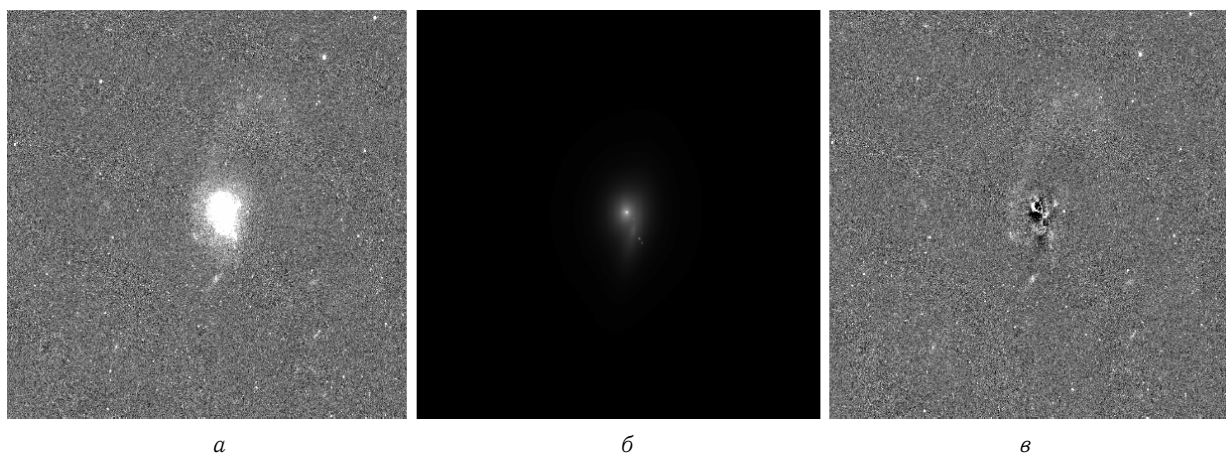
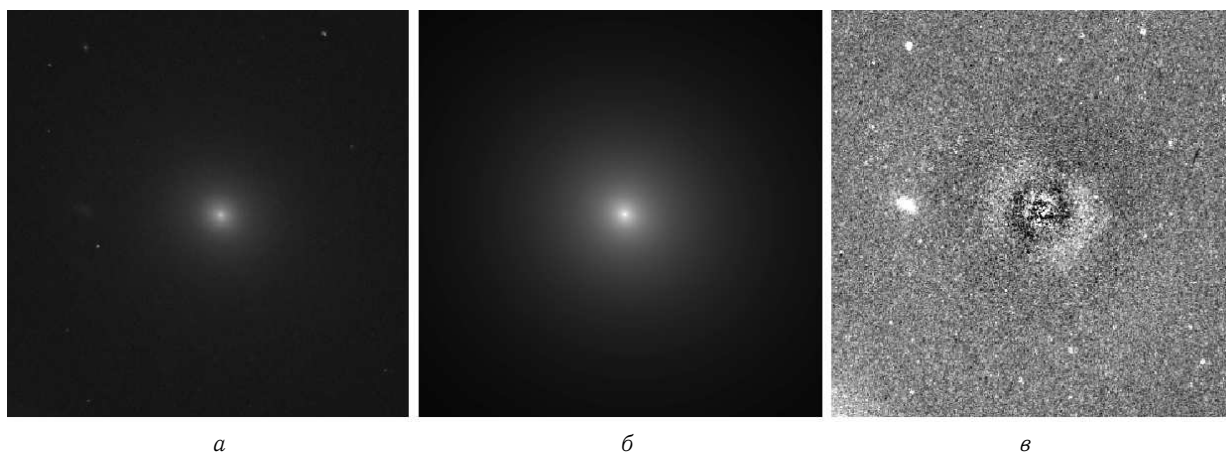


Рис. 8. №9, $J080359.97+095846.9$

Рис. 9. №21, $J112545.35+240824.0$ Рис. 10. №24, $J121314.27+025555.9$ Рис. 11. №27, $J125027.42+001345.6$

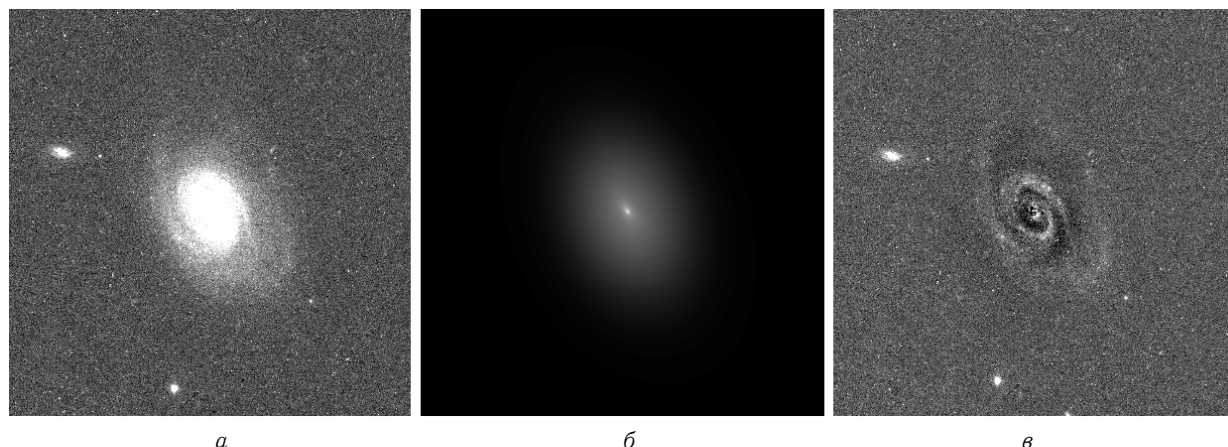


Рис. 12. №29, J132544.52-003849.1

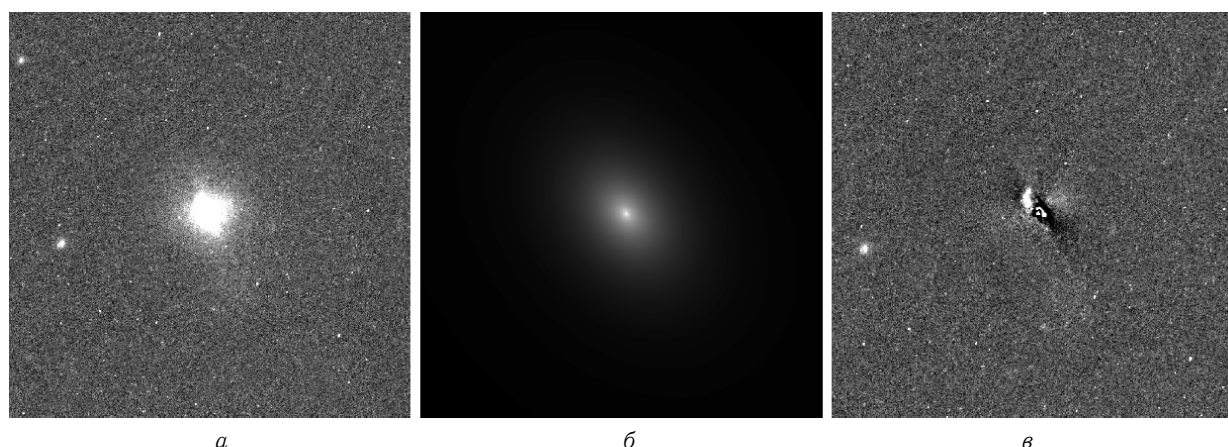


Рис. 13. №36, J142107.34-010726.0

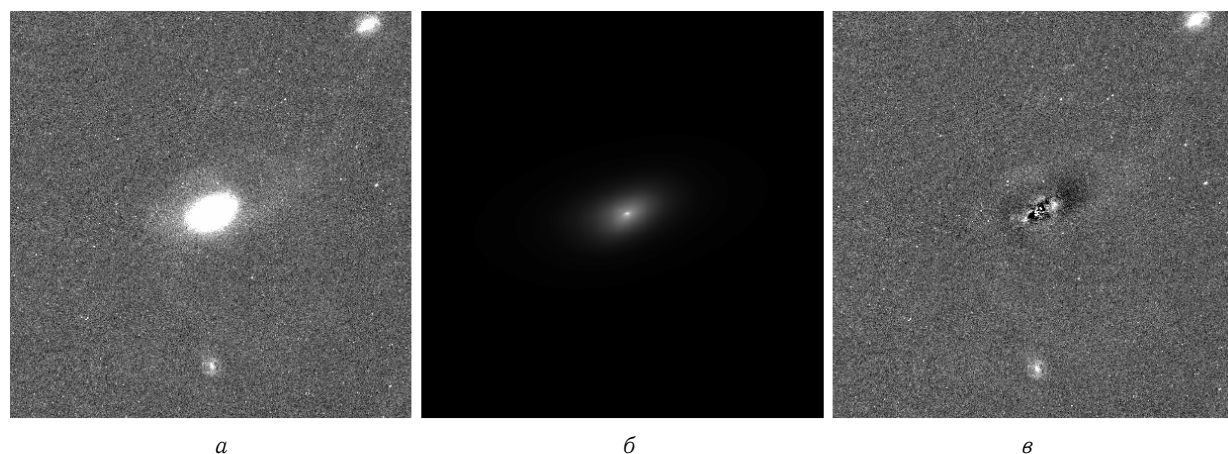


Рис. 14. №42, J160301.09+194613.7

Структура в большинстве случаев оказалась нетривиальной и была описана ядром, несколькими функциями серсика (вплоть до четырех) и иногда баром. Также в некоторых галактиках присутствовали пыле-

вые полосы, которые затрудняли моделирование. Для них, а также для фоновых звезд и дефектов, были созданы маски — отмечены пиксели, которые не учитывались при моделировании.

Таблица 3. Параметры компонент галактик, 2D-фиты

№	Компонента	X	Y	m	R_e	b/a	PA	n
1	psf	1883.7	2371.2	22.4	–	–	–	–
	sersic	1880.4	2368.1	17.6	47.7	0.5	8.5	1.4
	sersic	1881.4	2368.5	19.2	2.4	1.0	111.5	0.7
9	psf	3055.3	3775.3	22.0	–	–	–	–
	sersic	3054.6	3771.2	16.9	61.9	0.6	158.8	1.8
21	psf	3027.6	3761.4	20.1	–	–	–	–
	sersic	3032.2	3755.9	13.8	341.0	0.9	108.0	0.6
	ferrer	3026.9	3761.8	14.7	710.0	0.6	77.9	–
24	psf	2271.1	3364.8	25.1	–	–	–	–
	sersic	2253.8	3379.2	17.4	29.4	0.8	86.8	4.0
	sersic	2270.7	3342.8	19.1	61.0	0.4	76.4	1.4
27	psf	3084.3	3780.9	20.2	–	–	–	–
	sersic	3085.1	3781.2	14.6	221.5	0.8	172.1	4.6
	sersic	3084.0	3780.9	17.2	8.5	0.8	158.8	1.4
29	psf	3807.9	3736.9	24.2	–	–	–	–
	sersic	3802.7	3739.5	17.1	79.3	0.5	128.1	4.1
	sersic	3803.2	3736.0	18.9	5.8	0.8	133.1	3.2
	sersic	3805.2	3732.2	20.8	2.6	0.8	157.1	0.5
	sersic	3805.8	3727.1	15.5	149.4	0.8	120.8	0.7
36	psf	3269.2	3835.4	22.9	–	–	–	–
	sersic	3268.0	3834.9	17.0	65.6	0.7	143.1	4.0
36	psf	2958.3	3737.4	20.8	–	–	–	–
	sersic	2961.0	3733.9	16.8	38.1	0.6	29.4	1.7
	sersic	2942.9	3744.6	17.4	112.3	0.5	10.7	1.8
	sersic	2958.3	3736.4	18.5	3.8	0.5	25.5	1.2

№ — номер галактики (см. табл. 1), X — координата центра компоненты по оси x в секундах, Y — координата центра компоненты по оси Y в секундах, m — полная звездная величина компоненты, R_e — эффективный радиус компоненты в секундах, b/a — отношение малой и большой полуоси, PA — позиционный угол в градусах, N — показатель серсика

3.1.2. 1D-фиты

Таблица 4: Параметры компонент галактик, 1D-фиты

№	Компонента	X	Y	m_{eff}	m_{total}	R_e (кпк)	n
2	sersic	2052	1172	19.74	19.66	0.55	0.40
	sersic	2052	1172	20.15	16.97	2.70	0.46
	psf	2052	1172	–	16.01	–	–
3	sersic	2059	1177	19.07	19.38	0.27	0.65
	sersic	2059	1177	20.82	15.02	4.08	1.53
	psf	2059	1177	–	16.41	–	–
6	sersic	2057	1184	20.72	20.42	0.69	0.52
	sersic	2057	1184	20.38	17.65	2.58	0.45
	sersic	2057	1184	22.91	17.56	10.00	0.19
	psf	2057	1184	–	16.90	–	–
10	sersic	2060	1183	21.79	14.96	10.00	1.73
	sersic	2060	1183	18.58	17.86	0.58	1.43
	psf	2060	1183	–	14.99	–	–

Продолжение на следующей странице

№	Компонента	X	Y	m_{eff}	m_{total}	R_e (кпк)	n
12	sersic	2066	1181	21.40	18.28	2.76	0.16
	sersic	2066	1181	22.71	15.89	7.40	5.73
	psf	2066	1181	–	16.05	–	–
13	sersic	2057	1180	20.69	17.56	0.20	0.41
	sersic	2057	1180	16.43	19.79	0.01	0.36
	sersic	2057	1180	20.64	20.17	0.07	0.11
	sersic	2057	1180	23.57	17.36	0.87	1.29
14	sersic	2064	1177	19.06	18.88	0.55	2.46
	sersic	2064	1177	20.12	17.30	2.58	0.74
	sersic	2064	1177	21.38	15.54	9.94	1.00
	psf	2064	1177	–	17.89	–	–
16	sersic	2057	1180	19.06	19.31	0.04	0.38
	sersic	2057	1180	20.89	16.77	0.24	0.83
	sersic	2057	1180	21.75	15.74	0.71	1.33
	psf	2057	1180	–	16.04	–	–
20	sersic	2059	1178	18.65	18.16	0.70	0.29
	sersic	2059	1178	18.08	18.73	0.30	1.42
	sersic	2059	1178	21.73	17.07	4.43	0.44
	sersic	2059	1178	20.77	17.70	2.32	0.25
22	sersic	2059	1184	20.16	15.40	2.79	0.26
	sersic	2059	1184	17.63	18.04	0.22	0.33
	sersic	2059	1184	22.39	14.75	10.00	0.32
	sersic	2059	1184	18.94	16.19	0.68	2.13
	psf	2059	1184	–	15.03	–	–
23	sersic	2049	1178	22.26	18.09	3.60	0.30
	sersic	2049	1178	17.87	19.47	0.21	0.44
	sersic	2049	1178	22.12	15.29	9.03	1.25
	sersic	2049	1178	20.04	19.11	0.66	0.42
	psf	2049	1178	–	17.43	–	–
25	sersic	2057	1176	22.51	16.93	9.15	1.12
	sersic	2057	1176	22.10	17.88	4.33	1.90
	psf	2057	1176	–	17.16	–	–
29	sersic	2061	1180	20.38	18.60	1.06	0.39
	sersic	2061	1180	18.21	19.63	0.28	0.16
	sersic	2061	1180	13.45	18.93	0.02	6.19
	sersic	2061	1180	21.65	15.57	6.61	0.71
30	sersic	2062	1183	21.74	15.42	9.28	1.71
	sersic	2062	1183	20.73	17.49	3.55	0.16
	sersic	2062	1183	18.45	19.17	0.43	0.48
	psf	2062	1183	–	17.88	–	–
33	sersic	2060	1180	22.56	16.04	9.04	2.87
	sersic	2060	1180	19.84	18.00	1.59	0.52
	psf	2060	1180	–	15.99	–	–
35	sersic	2062	1182	20.13	18.40	0.54	0.44
	sersic	2062	1182	21.21	15.94	3.42	0.34
	sersic	2062	1182	17.72	20.64	0.05	0.95
	psf	2062	1182	–	15.36	–	–
37	sersic	1182	1167	21.56	14.06	9.44	0.37
	sersic	1182	1167	21.41	13.98	5.15	5.08
	sersic	1182	1167	20.46	15.26	4.07	0.12
	sersic	1182	1167	18.65	17.81	0.50	0.14
39	sersic	2057	1178	19.77	17.16	0.88	0.42
	sersic	2057	1178	18.36	17.67	0.39	0.35
	sersic	2057	1178	17.40	20.10	0.08	0.36
	sersic	2057	1178	21.90	16.03	3.98	0.50
49	sersic	2060	1179	23.67	17.06	10.00	1.08
	sersic	2060	1179	19.82	18.18	1.43	0.22
	sersic	2060	1179	22.15	20.15	1.08	2.11
	psf	2060	1179	–	15.99	–	–

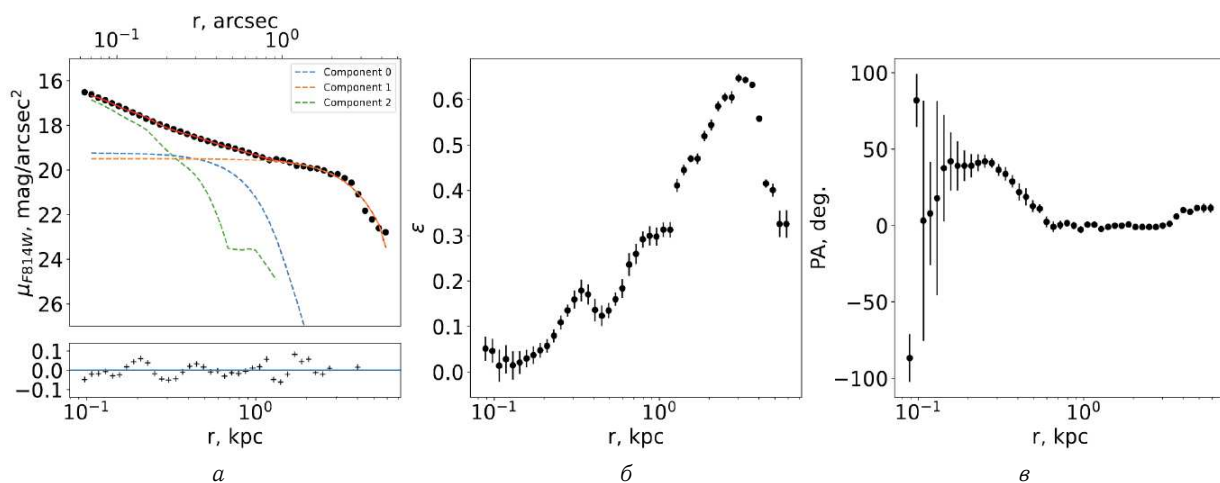


Рис. 15. 2: J005541.55-002052.6

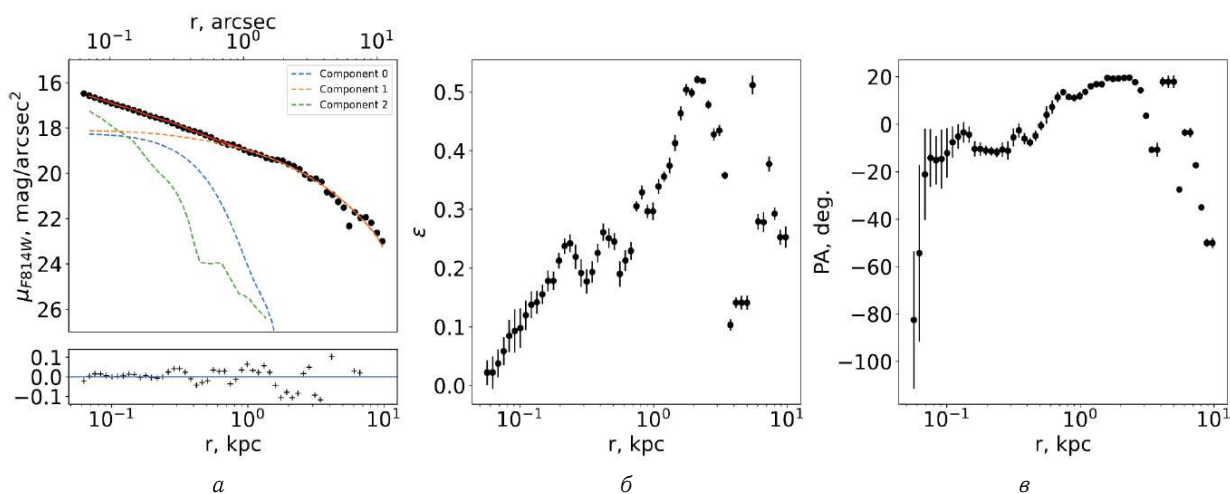


Рис. 16. 3: J005640.40-002311.5

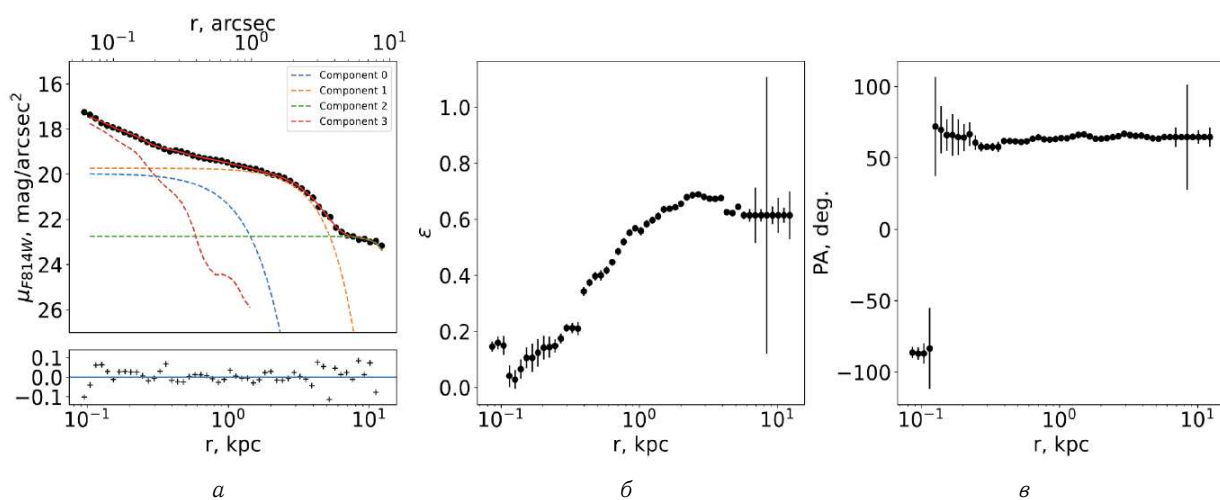


Рис. 17. 6: J022849.51-090153.7 mbox

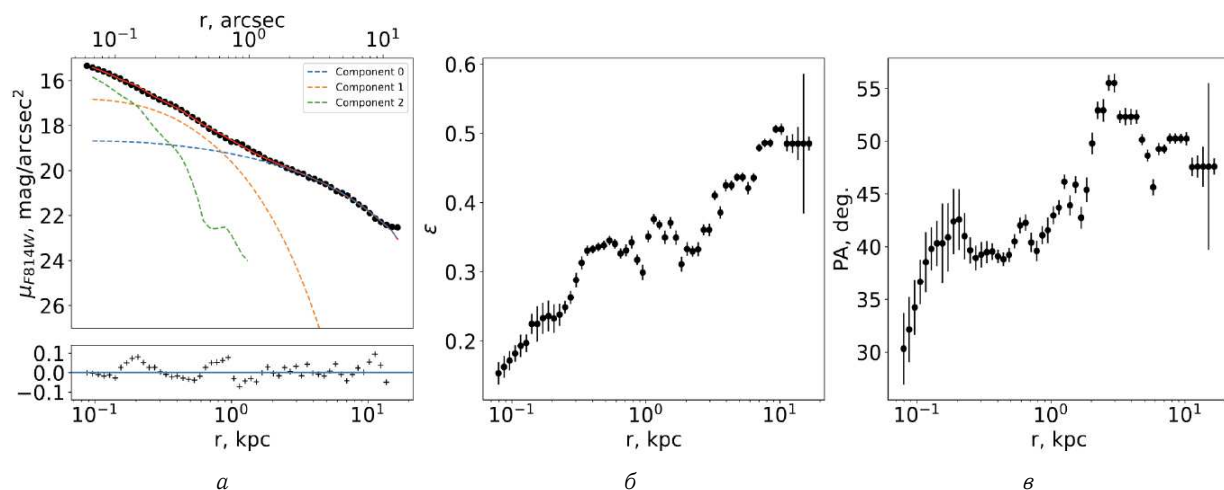


Рис. 18. 10: J084200.56+114020.2

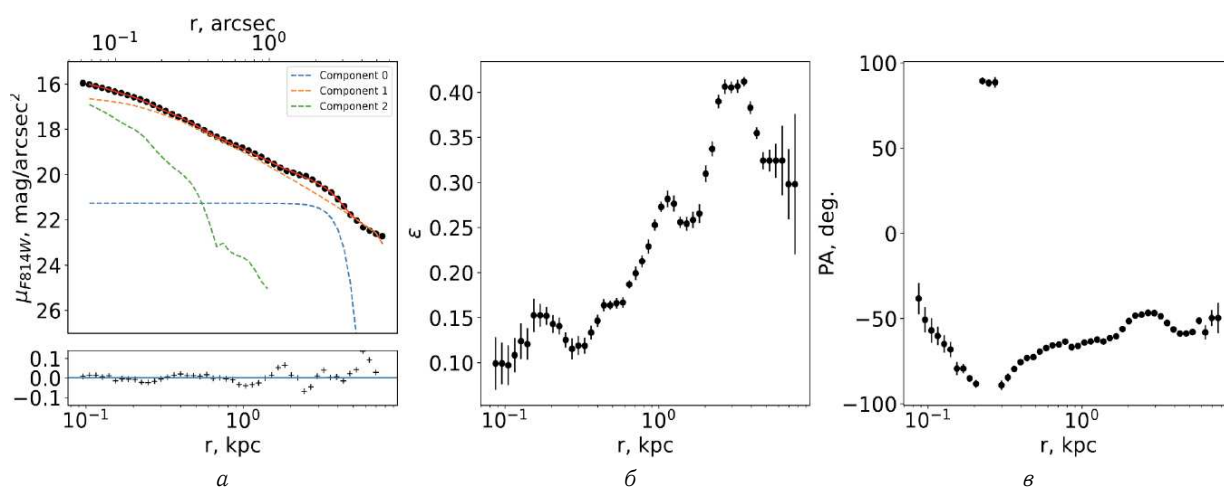


Рис. 19. 12: J085224.89+511210.1

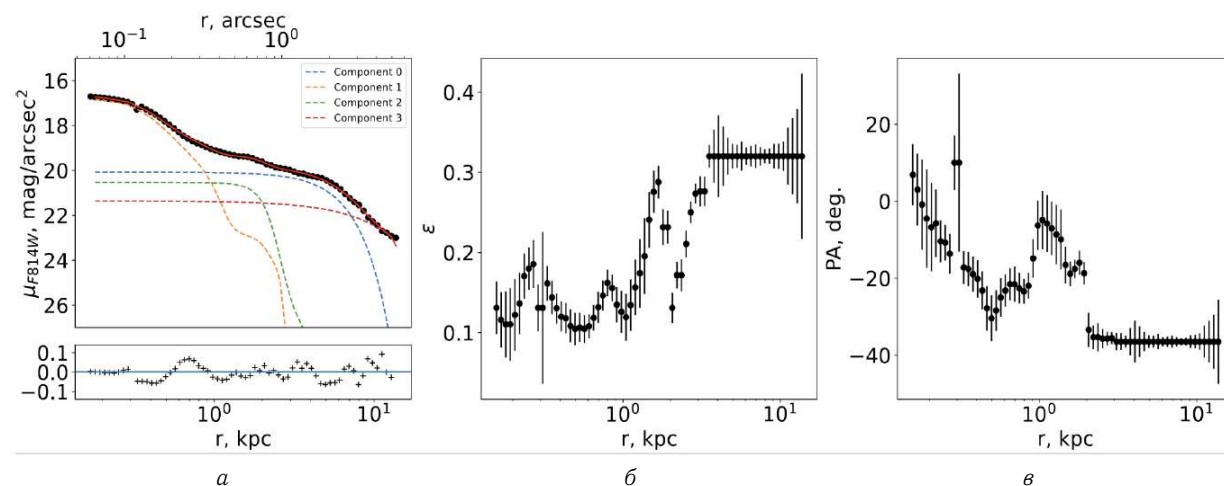


Рис. 20. 13: J090602.28+561044.8

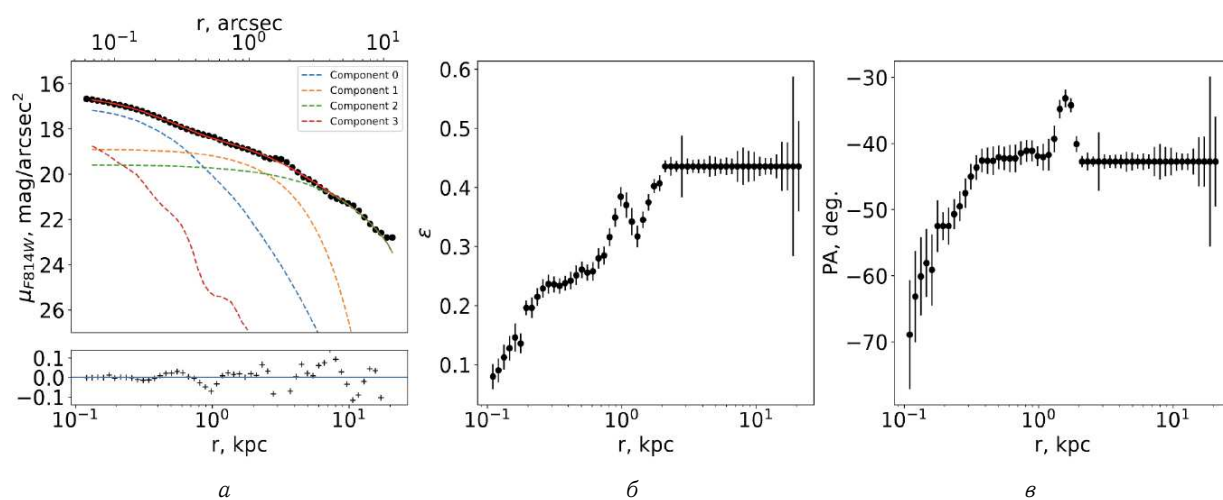


Рис. 21. 14: J090713.10-000322.9

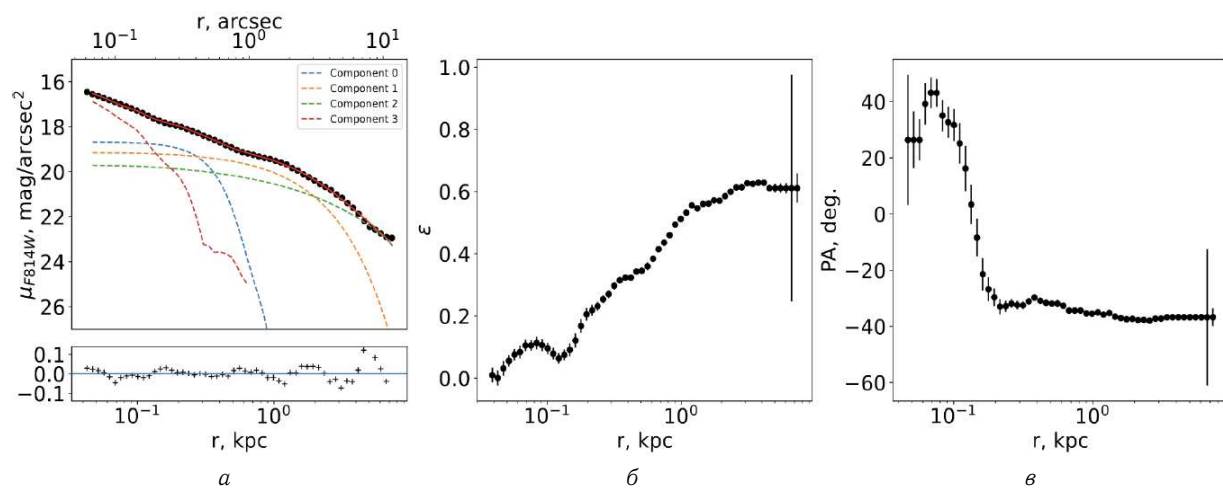


Рис. 22. 16: J091424.76+115625.6

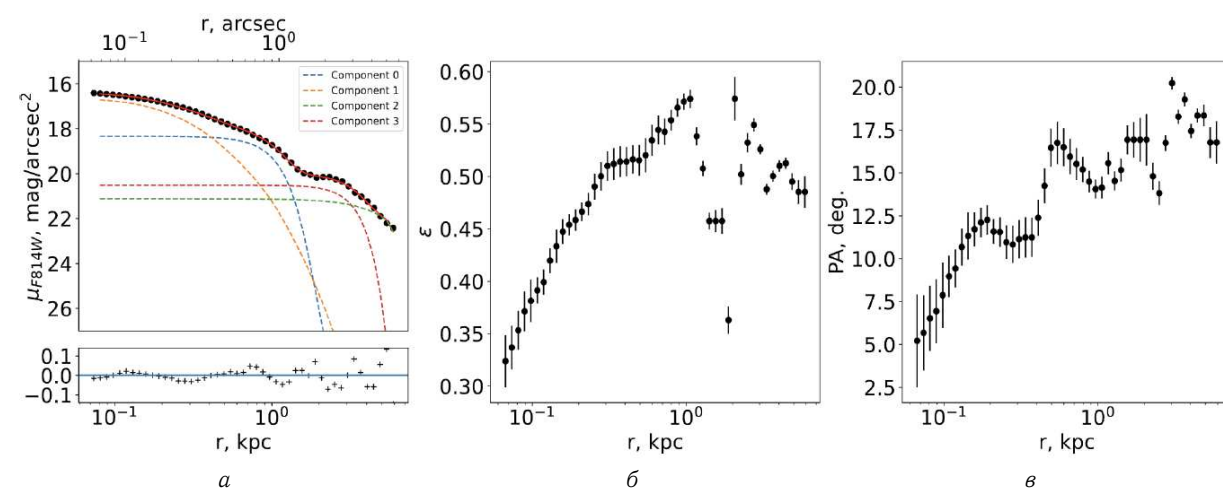


Рис. 23. 20: J102213.41+213041.7

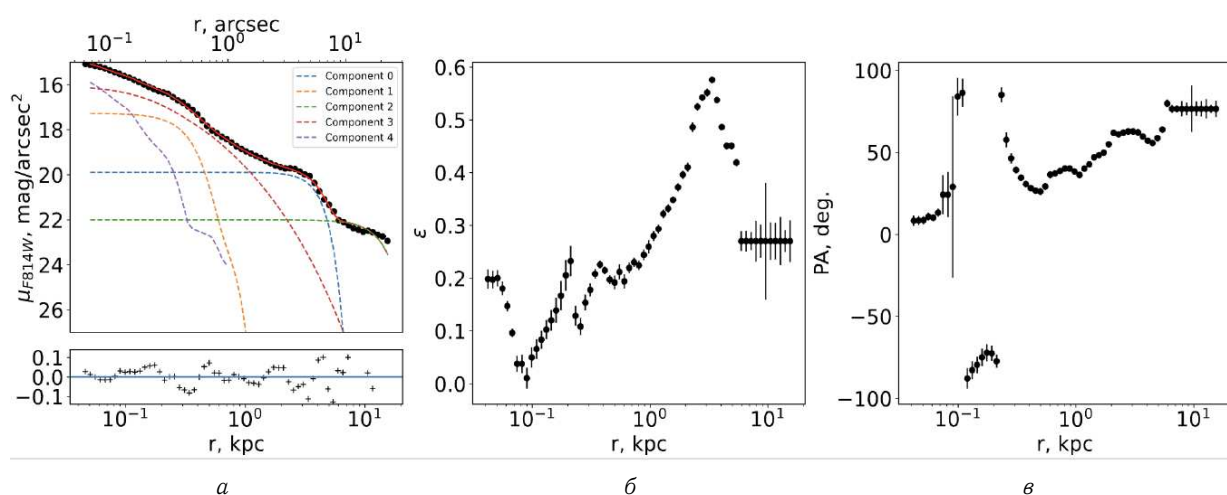


Рис. 24. 22: J112825.08+510142.1

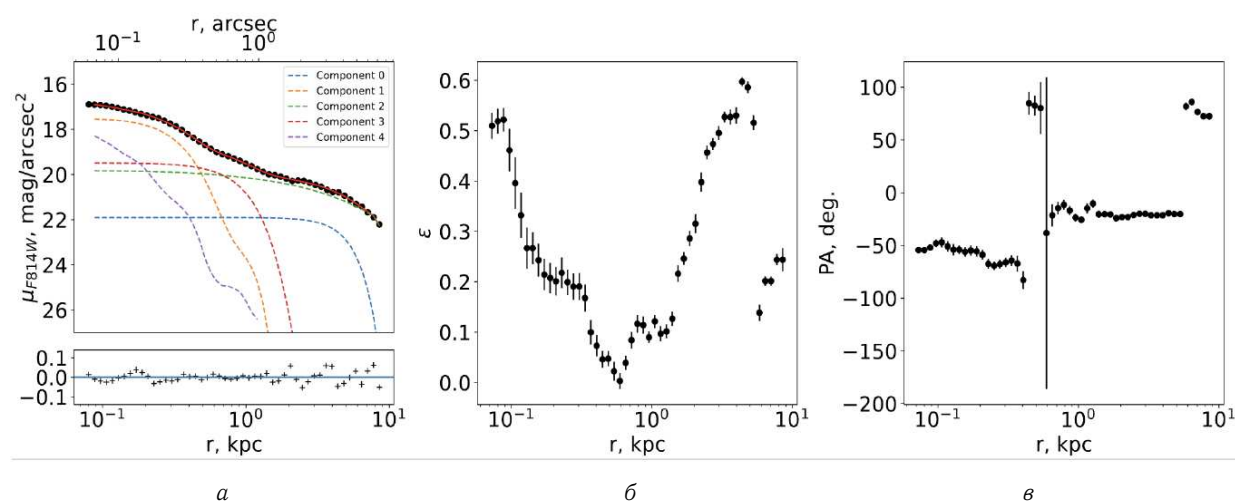


Рис. 25. 23: J115916.58-010630.1

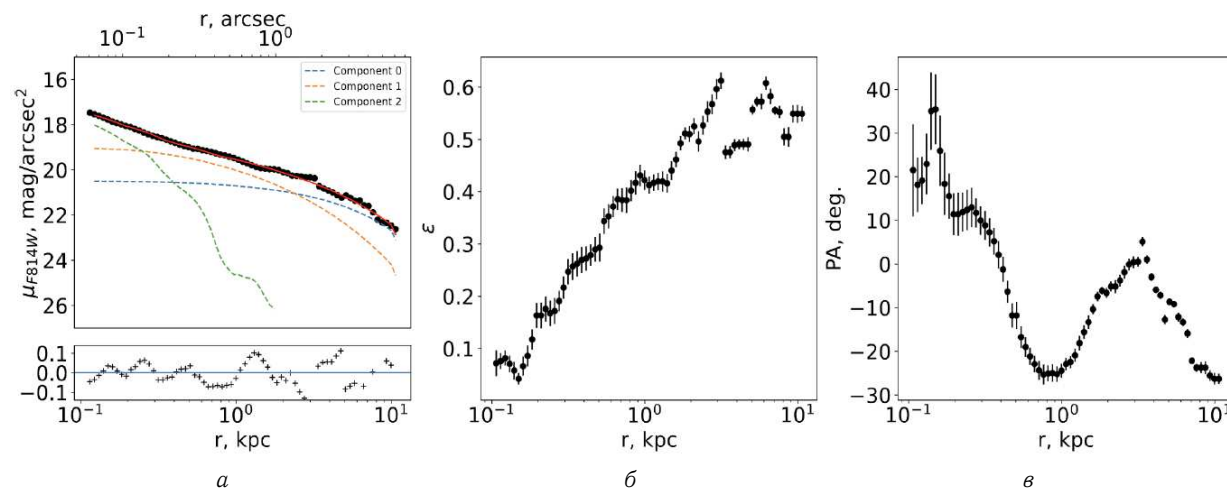


Рис. 26. 25: J121328.62+140124.8

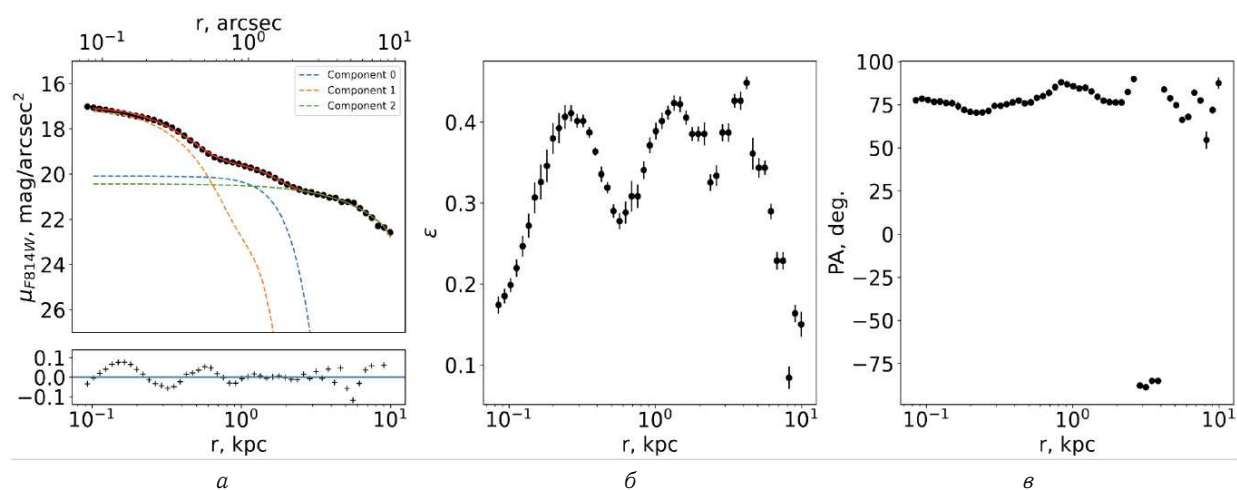


Рис. 27. 29: J132544.52-003849.1

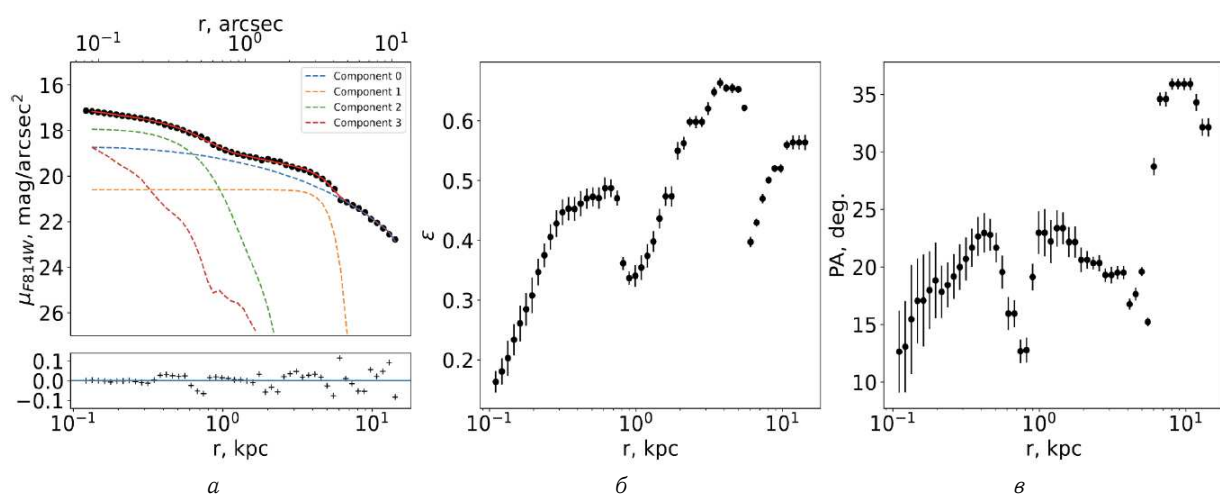


Рис. 28. 30: J140514.58+091633.0

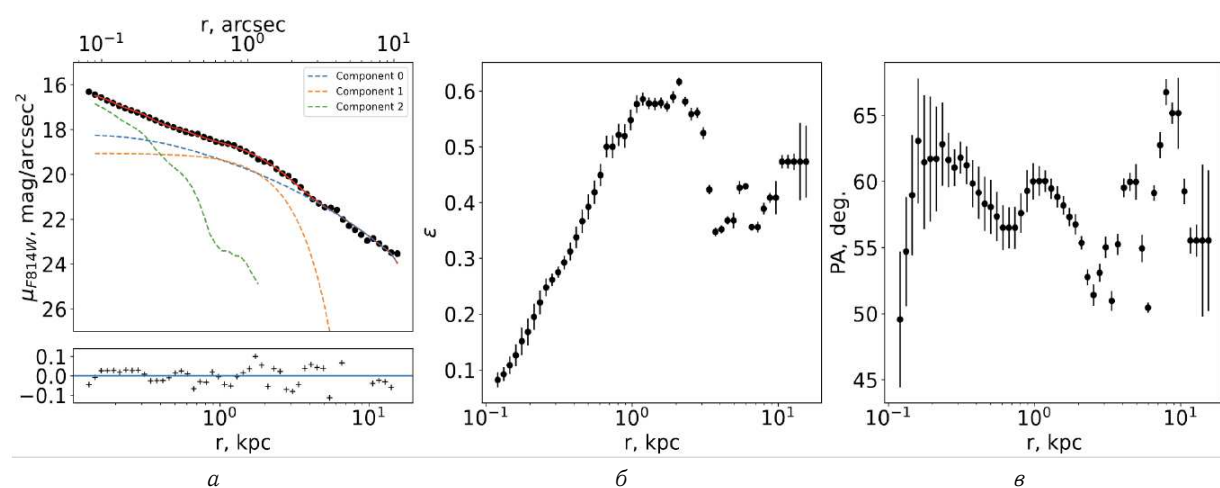


Рис. 29. 33: J141558.96+520303.0

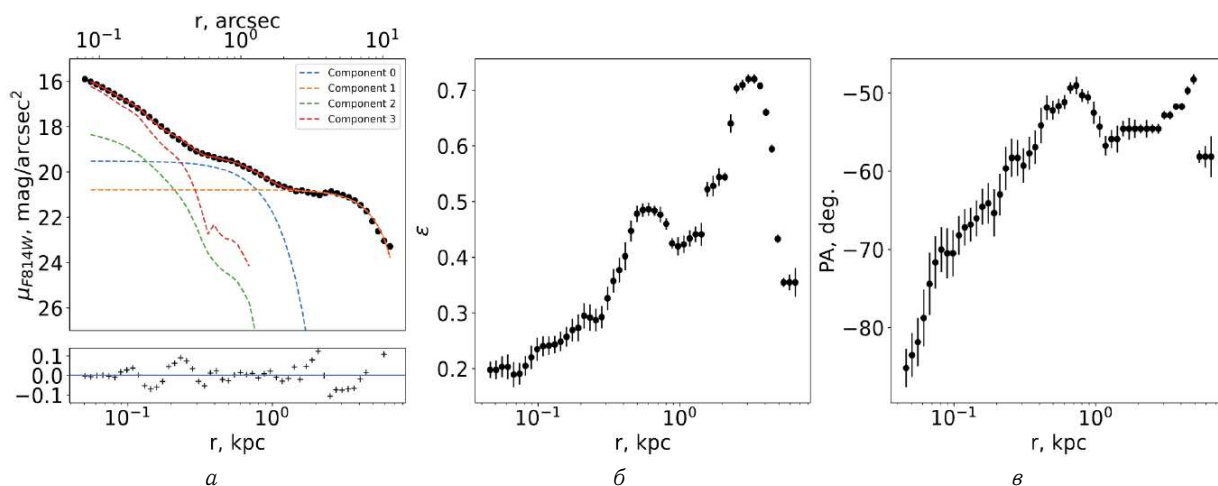


Рис. 30. 35: J141738.88+072412.3

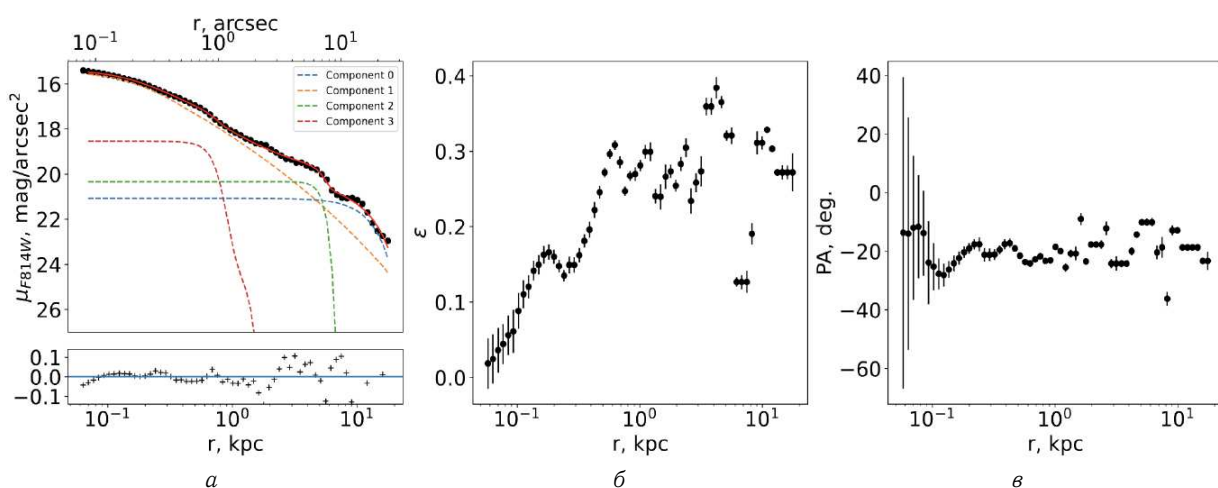


Рис. 31. 37: J145835.99+445301.0

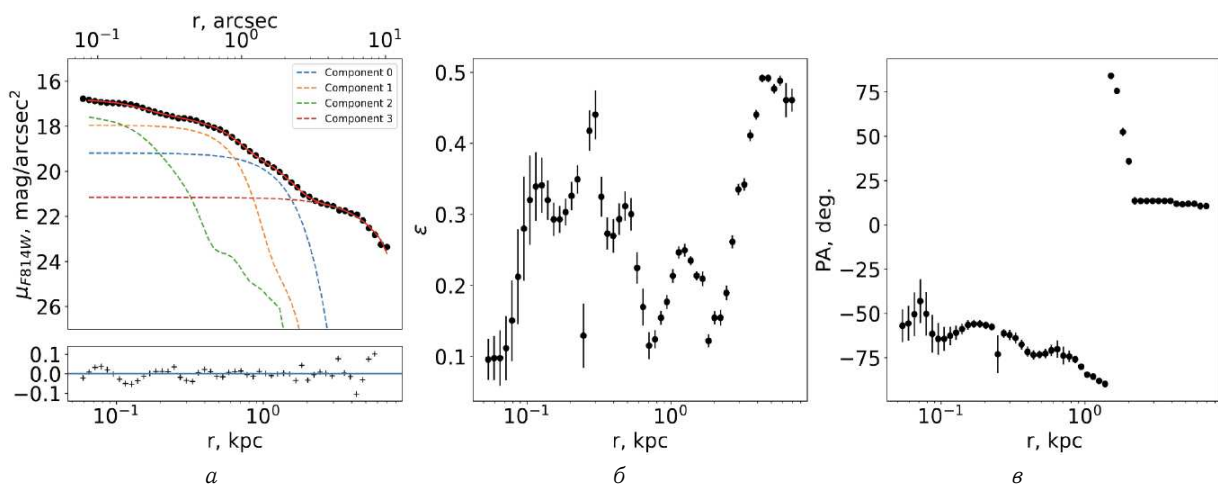


Рис. 32. 39: J152442.58+292701.7

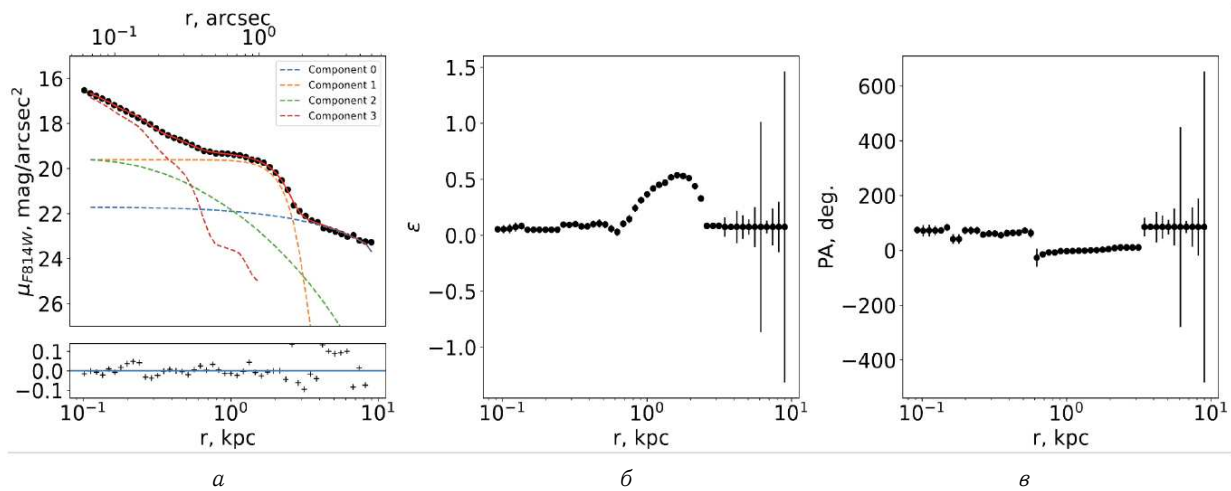


Рис. 33. 49: J234807.14-091202.7

3.2. Массы балджей

Для оценки светимости балджа отбирались компоненты, структурно соответствующие балджу в модели галактики. В таблицах с параметрами моделирования эти компоненты выделены жирным шрифтом. Критериями отбора служили значения эффективного радиуса и индекса Серсика, характерные для балджа.

Таблица 5. Светимости и массы балджей галактик по результатам 2D-фитов

№	L , $10^8 L_\odot$	t_{SSP} , Gyr	[Z/H]	M/L	M_{bulge} , $10^8 M_\odot$
1	38.64	1.99	-0.38	0.55	21.09
9	26.48	2.172	-0.43	0.58	15.42
21	0.67	18.958	-0.68	2.16	1.45
24	293.43	1.582	-0.8	0.37	109.75
27	38.99	19.8	-0.01	3.01	117.24
29	58.7	7.195	-0.16	1.49	87.43
36	401.9	2.823	-1.3	0.57	229.17
42	64.7	1.153	-0.18	0.40	25.75

№ — номер галактики (см. табл. 1), L — светимость балджа в светимостях Солнца, t_{SSP} — параметр звездного населения, характеризующий возраст, [Z/H] — параметр звездного населения, характеризующий металличность, M/L — параметр звездного населения, характеризующий отношение массы к светимости, M_{bulge} — масса балджа в массах Солнца.

3.3. Положение галактик на масштабном соотношении «масса черной дыры – масса балджа»

Теперь, после подсчета массы балджа мы можем поместить наши галактики на масштабное соотношение

Таблица 6. Светимости и массы балджей галактик по результатам 1D-фитов

№	L , $10^8 L_\odot$	t_{SSP} , Gyr	[Z/H]	M/L	M_{bulge} , $10^8 M_\odot$
2	10.88	1.658	-0.55	0.40	4.35
3	4.81	4.047	-0.36	0.96	4.62
6	126.95	19.8	-0.76	2.21	280.56
10	43.86	2.71	0.00	0.75	32.90
12	283.43	4.34	-0.24	1.06	300.44
13	37.0	8.48	-0.54	1.34	49.58
14	35.54	3.77	-0.27	0.92	32.70
16	2.45	5.63	-0.46	1.07	2.62
20	13.08	2.22	-0.11	0.65	8.50
22	9.16	13.16	-0.57	1.75	16.03
23	8.17	4.15	-0.30	1.00	8.17
25	166.66	2.046	-0.55	0.53	88.33
29	10.88	7.195	-0.16	1.49	16.21
30	14.44	1.655	-0.36	0.43	6.21
33	327.85	3.46	-0.60	0.72	236.05
35	4.77	3.508	-0.74	0.70	3.34
37	13.12	1.29	0.04	0.46	6.04
39	13.12	2.28	-0.14	0.66	8.66
49	341.6	4.523	-0.6	0.94	321.10

«масса черной дыры – масса балджа» и сравнить их положение с уже известными нам данными.

Зеленые [28] и синие [29] точки — это выборки объектов со сверхмассивными черными дырами. Они образуют главную последовательность, на которой основным каналом роста черной дыры являются слияния

(масса балджа и масса черной дыры увеличиваются пропорционально друг другу).

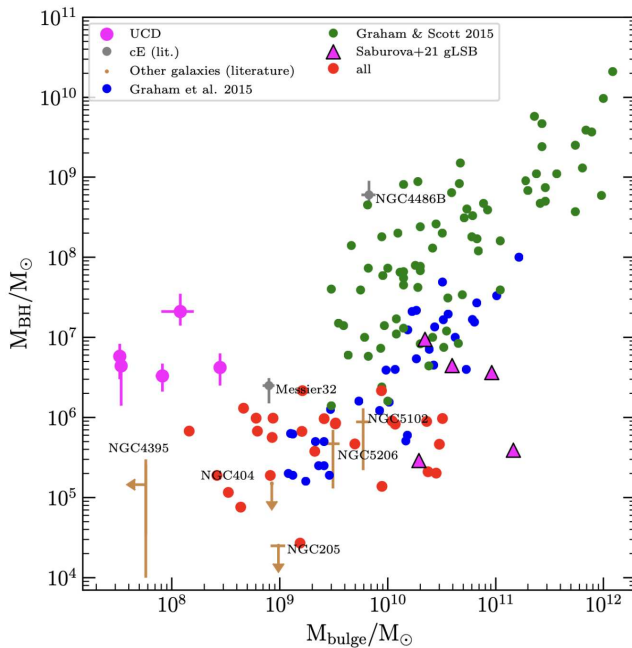


Рис. 34. Расположение галактик на масштабном соотношении «масса черной дыры - масса балджа». Обработанные в этой работе галактики показаны красными точками. Розовые и серые кружочки — ультракомпактные карликовые галактики, которые были ободраны, поэтому на графике мы их видим смещенными влево (масса балджа уменьшилась из-за обдирания, а масса черной дыры не изменилась). Розовые треугольники — гигантские галактики низкой поверхностной яркости. На их балдж натекал газ, поэтому на графике мы видим их смещенными вправо (масса балджа увеличивалась, а масса черной дыры не менялась). Коричневые — другие галактики с IMBH из литературы

3.4. Интерпретация результатов

3.4.1. Распределение исследуемых галактик в пространстве параметров

Для интерпретации результатов проведем еще некоторый анализ: разобьем наши галактики на группы и посмотрим как эти группы по отдельности лягут на наше масштабное соотношение.

Объекты текущей работы были классифицированы по качеству фита (good/bad) и методу оценки балджа (1D/2D). На графиках (рис. 35) видно, что галактики с плохими фитами (чёрные точки) демонстрируют большую рассредоточенность. В то же время галактики с хорошими фитами (красные точки) располагаются ближе к выборкам с объектами со сверхмассивными черными дырами. Это подтверждает, что качество моделирования оказывает влияние на положение объектов на масштабном соотношении. Также не наблю-

дается выраженного различия в положении между 1D и 2D фитом, что может говорить о согласованности результатов между методами.

3.4.2. Сравнение регрессионных зависимостей

Для количественного анализа была построена регрессия по выборке из зеленых и синих точек. Затем была проведена взвешенная регрессия с добавлением объектов из текущей работы. Каждой новой точке был присвоен повышенный вес $N_{blue+green}/N_{red}$, чтобы компенсировать различие в численности выборок. Это позволило избежать доминирования контрольной выборки в итоговом наклоне.

На панели *a* рис. 36 были использованы все доступные галактики, включая объекты с менее надёжными фитами. Несмотря на это, взвешенная регрессионная прямая лишь незначительно отклоняется от исходной, что указывает на устойчивость масштабной зависимости даже при наличии шумных данных. На панели *б* рис. 36 использовались только галактики с хорошими фитами. Полученная регрессионная прямая (красная линия) практически совпадает с исходной (синяя линия), построенной по объектам со сверхмассивными черными дырами, однако наблюдается небольшой сдвиг примерно на 0.4 dex. Хотя это укладывается в пределы погрешностей, можно предположить, что смещение может указывать на начало другого режима зависимости.

3.4.3. Интерпретация и физический смысл

Полученные результаты показывают, что даже при сравнительно малых массах чёрных дыр ($\sim 10^5 - 10^6 M_\odot$), исследуемые галактики в целом следуют той же зависимости $M_{BH}-M_{bulge}$, что и более массивные системы. Это может свидетельствовать о том, что слияния продолжают играть ключевую роль в росте чёрных дыр в данном диапазоне масс.

Однако мы все же видим небольшое смещение в сторону влияния аккреции, как канала роста. Особенно хорошо это можно увидеть на «краевом» случае: объектах с быстроаккрецирующими черными дырами — их смещение в сторону наиболее заметно (рис. 37).

3.4.4. Звездообразование в галактиках

Один из процессов, которые влияют на звездообразование в галактиках к активным ядром, — это обратная связь (фидбек) с аккрецией на центральную черную дыру [31]. Это явление, которое происходит во время аккреции вещества на сверхмассивные черные дыры в центрах галактик. Фидбек стал ключевым компонентом моделирования эволюции галактик [30]. Этот процесс генерирует энергию, которая может останавливать

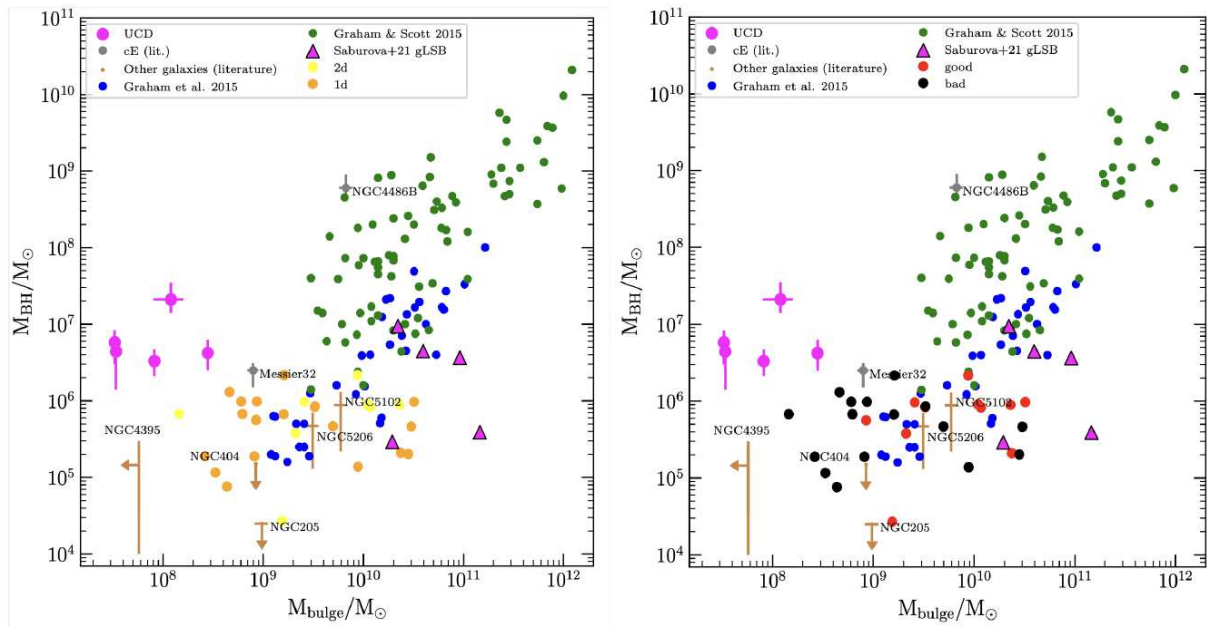


Рис. 35. Расположение галактик на масштабном соотношении «масса черной дыры – масса балджа». *а* — в разбиении на фит в 1d/2d, *б* — в разбиении на «хорошие» и «плохие» фиты

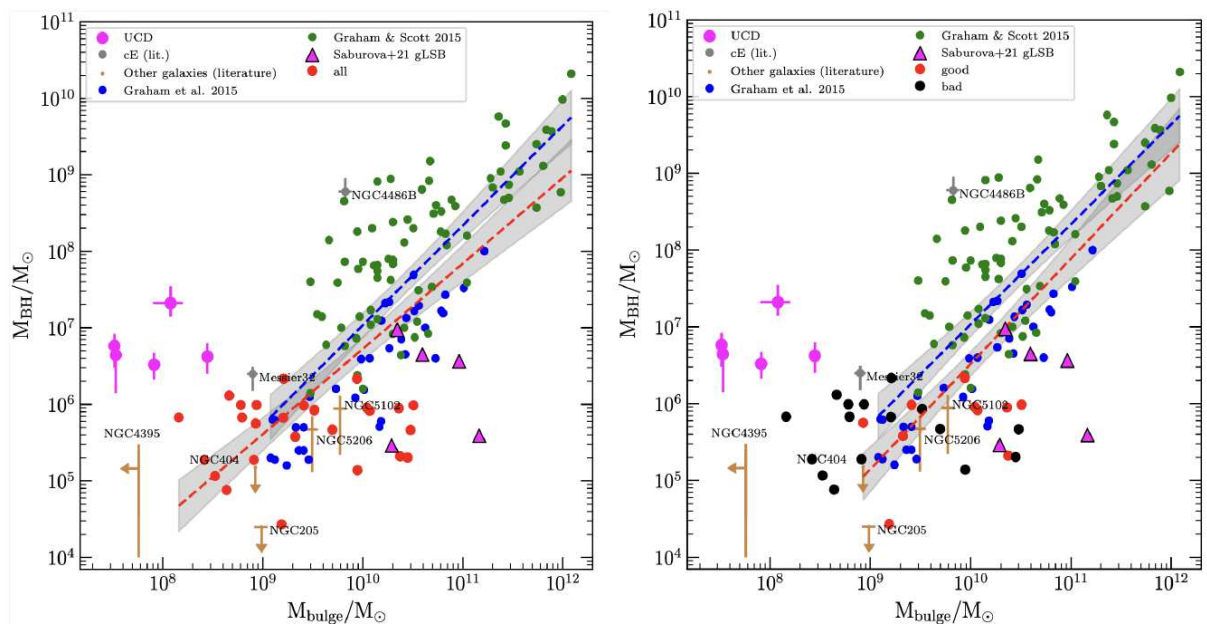


Рис. 36. Регрессионные зависимости, построенные выборке объектов со сверхмассивными черными дырами (синие и зеленые точки, синяя прямая) и объектам из данной работы. Красная линия — взвешенная регрессия. *а* — используются все объекты из данной работы, *б* — объекты с «хорошими фитами»

процесс звездообразование в галактике. Фидбек бывает механический и радиационный.

- Радиационный фидбек: энергия, выделяемая в процессе аккреции, испускается в виде излучения (рентгеновского, ультрафиолетового). Это излучение нагревает окружающий газ, в результате чего он может покинуть галактику за счёт

увеличения тепловой скорости частиц. Такой режим фидбека считается доминирующим в активных ядрах большой мощности, близких к пределу Эддингтона.

- Механический фидбек: энергия выделяемая в процессе аккреции испускается в виде ветра ионизированного газа. Этот режим фидбека счи-

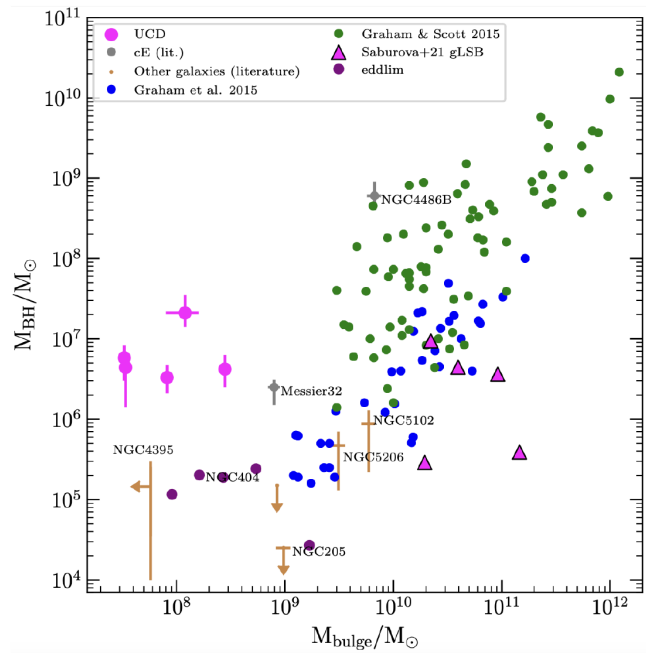


Рис. 37. Расположение галактик с высоким темпом аккреции черной дыры (eddlim) на масштабном соотношении «масса черной дыры – масса балджа»

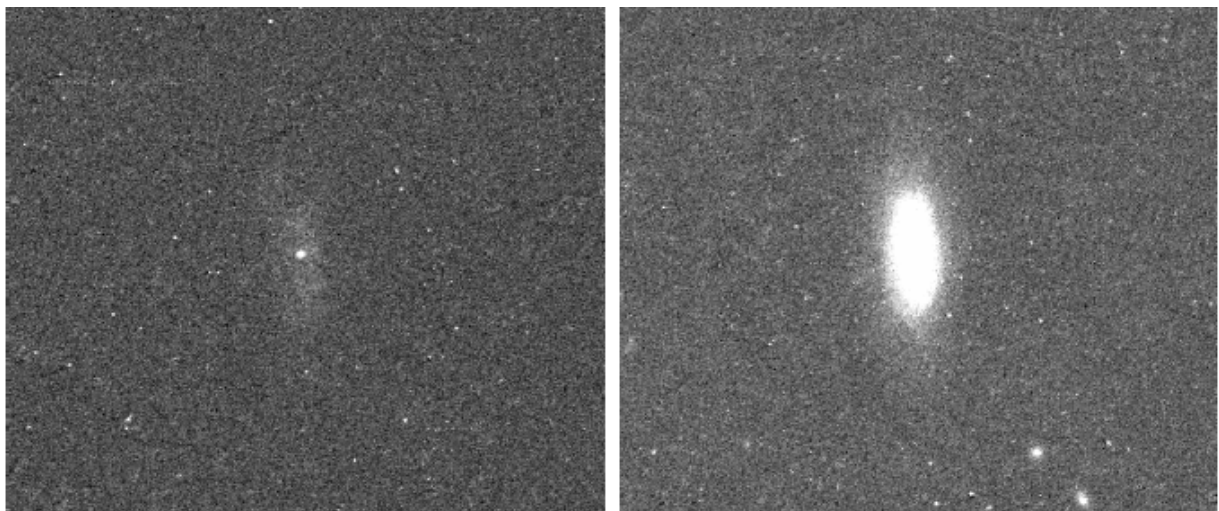


Рис. 38. J022849.51-090153, *a* — изображение в ультрафиолете, *б* — изображение в оптике

тается доминирующим в активных ядрах малой мощности.

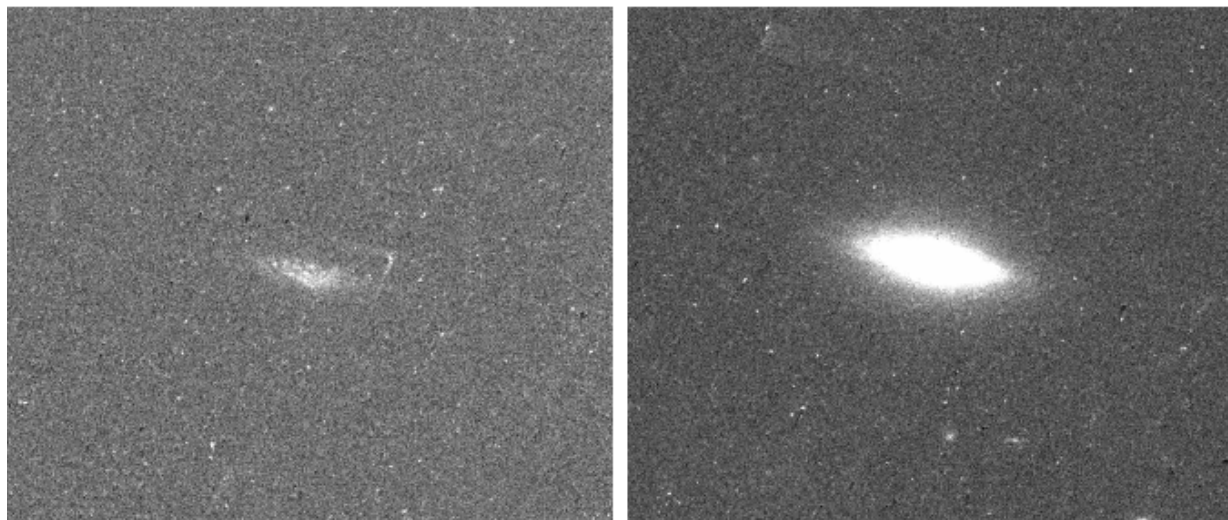
Наши галактики небольших размеров, в основном карликовые, с активным ядром близким к пределу Эддингтона. В них мы ожидаем, что энергии аккреции должно быть достаточно для остановки звездообразования. Однако на новых ультрафиолетовых данных для галактик J022849.51-090153.7 (см. рис. 38) и J080359.97+095846.9 (см. рис. 39) мы наблюдаем обратное — видна протяженная эмиссия диска, которая указывает на текущее звездообразование, то есть зве-

здообразование в галактиках не подавлены фидбеком.

Это может указывать либо на то, что период активности ядра начался недавно, либо на то, что даже энергии эддингтоновской активности не достаточно, чтобы погасить звездообразование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным инструментом в понимании механизмов образования черных дыр, а также в объяснении наблюдения, таких объектов как квазары, является изуче-

Рис. 39. J080359.97+095846, *а* — изображение в ультрафиолете, *б* — изображение в оптике

ние и анализ галактик с черной дырой промежуточной массы в центре. В работе выбраны хозяйские галактики ИМВН, которые были отнаблюдены на космическом телескопе им. Хаббла в рамках заявки научной группы. Произведена двумерная и одномерная декомпозиция профилей яркости этих галактик и определены массы их балджей. Далее галактики были нанесены на масштабное соотношение «масса черной дыры – масса балджа».

Проведенный анализ показал, что галактики с чёрными дырами промежуточной массы, рассмотренные в настоящей работе, в целом следуют масштабной зависимости между массой балджа и массой центральной чёрной дыры, установленной ранее для более массивных галактик.

Попадание галактик с быстроаккрецирующими черными дырами выше последовательности хозяйских галактик сверхмассивных черных дыр означает, что в от-

личие от хозяйских галактик сверхмассивных черных дыр и остальных черных дыр промежуточных масс нанесенных на масштабное соотношение, для хозяйских галактик быстроаккрецирующих черных дыр, слияния уже не доминирующий канал роста черных дыр — мы также видим вклад аккреции.

Также важным техническим результатом является автоматизированный алгоритм чистки изображений с комического телескопа им. Хаббла от космиков — предварительная обработка повышает точность декомпозиции галактик.

В дальнейшем планируется проанализировать оставшиеся ~ 20 хозяйских галактик ИМВН, полученных в рамках заявки, с наиболее сложными структурами. Внимание также планируется уделять повышению точности результатов: использовать данные сразу в двух фильтрах, чтобы повысить точность определения параметра ($\frac{M}{L}$).

-
- [1] Kormendy J., Ho L.C. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **51**. 511 (2013).
 - [2] Greene J.E., Strader J., Ho L.C. // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **58**. 257 (2020).
 - [3] Schawinski K. et al. // *Nature*. **419**. 694 (2002).
 - [4] Wu X.-B. et al. // *Nature*. **518**. 512 (2015).
 - [5] Haring N., Rix H.-W. // *ApJ*. **604**. L89 (2004).
 - [6] Maoz E. // *Living Rev. Relativ.* **8**. 8 (2005).
 - [7] van Dokkum P.G., Brammer G. et al. // *Science*. **337**. 544 (2012).
 - [8] Ferrarese L., Merritt D. // *ApJ*. **539**. L9 (2000).
 - [9] van den Bosch R.C.E. // *ApJ*. **831**. 134 (2016).
 - [10] Chilingarian I.V., Katkov I.Y. // *ApJS*. **239**. 22 (2018).
 - [11] van Dokkum P.G. // *Publ. Astron. Soc. Pac.* **113**. 1420 (2001).
 - [12] Latif M.A., Ferrara A. // *Astrophysics and Cosmology*. Springer. 11 (2022).
 - [13] Koekemoer A.M. et al. // *Proc. SPIE*. **8127**. 81270J (2011).
 - [14] Peng C.Y., Ho L.C., Impey C.D., Rix H.-W. // *Astron. J.* **124**. 26 (2002).6.
 - [15] Graham A.W., Driver S.P. // *PASA*. **22**. 118 (2005).
 - [16] de Vaucouleurs G. // *Ann. d'Astrophys.* **11**. 247 (1948).
 - [17] Hubble E. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **15**. 168 (1929).
 - [18] Planck Collaboration // *Astron. Astrophys.* **641**. A6 (2020).
 - [19] Willmer C.N.A. // *ApJS*. **236**. 47 (2018).
 - [20] Meert A. et al. // *MNRAS*. **422**. 1294 (2012).
 - [21] Davari R. et al. // *ApJ*. **787**. 69 (2014).
 - [22] van der Wel A. et al. // *ApJS*. **203**. 24 (2012).
 - [23] Fioc M., Rocca-Volmerange B. // *Astron. Astrophys.* **326**. 950 (1997).
 - [24] Kroupa P. // *MNRAS*. **322**. 231 (2001).
 - [25] Bell E.F., McIntosh D.H., Katz N., Weinberg M.D. //

- ApJS. **149**. 28 (2003).9.
[26] Zibetti S., Charlot S., Rix H.-W. // MNRAS. **400**. 1181 (2009).
[27] Conroy C., Gunn J.E., White M. // ApJ. **699**. 486 (2009).
[28] Gültekin K. et al. // ApJ. **798**. 5 (2015).4.
[29] Gültekin K. et al. // ApJ. **804**. 32 (2015).
[30] Di Matteo T., Springel V., Hernquist L. // Nature. **433**. 604 (2005).
[31] Fabian A.C. // Annu. Rev. Astron. Astrophys. **50**. 455 (2012).

Structural properties of host galaxies of light-weight supermassive black holes based on new data from «Hubble» space telescope

L. G. Osipova^{1,a}, K. A. Grishin^{2,b}, I. V. Chilingarian^{2,c}

¹*Department of Space Research, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University
Moscow 119191, Russia*

E-mail: ^aliana.osipova28@gmail.com, ^bgrishin@voxastro.org, ^cigor.chilingarian@cfa.harvard.edu

In this paper, two-dimensional and one-dimensional photometric modeling of new Hubble Space Telescope data was performed for galaxies hosting intermediate-mass black holes (IMBHs), as well as for objects from an extended sample with black hole masses up to one million solar masses. Using the resulting models, the stellar mass of each galaxy bulge was estimated, and the positions of the galaxies were determined on the black hole mass–bulge mass scaling relation. The location of these galaxies on this relation provides constraints on black hole growth processes in the low-mass regime.

PACS: 98.62.Js, 98.62.Ai, 98.52.Eh.

Keywords: intermediate-mass black holes, intermediate-mass black hole formation mechanisms, photometric modeling of galaxies, bulge mass, quasars.

Received 10 June 2025.

Сведения об авторах

- Осипова Лиана Георгиевна — студентка 6 курса ФКИ МГУ, email: liana.osipova28@gmail.com.
- Гришин Кирилл Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник ГАИШ МГУ, email: grishin@voxastro.org.
- Чилингарян Игорь Владимирович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник ГАИШ МГУ, email: igor.chilingarian@cfa.harvard.edu.