УДК 524.7

Орифжонова О.Ш.

студент

Ботиров Ф.У.

доцент физического факультета НУУз

Нуритдинов С.Н.

профессор физического факультета НУУз

ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ В АСИММЕТРИЧНЫХ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИКАХ: РОСТ, РЕГУЛИРУЕМЫЙ БАЛДЖЕМ, И УПЛОЩЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ M_{BH}–σ

Аннотация: В работе проверяется, влияет ли асимметрия диска типа m = 1 на массу центральной сверхмассивной чёрной дыры M_{BH}. Для 572 асимметричных галактик M_{BH} не коррелирует с амплитудой асимметрии A_1 ($r = -0{,}02$), но в трёх интервалах расстояний коррелирует с дисперсией скоростей звёзд балджа ($r = 0{,}70$; $0{,}61$; $0{,}52$) и квадратично зависит от морфологического типа ($R = 0{,}71$). Полученные соотношения M_{BH}–σ_{bulge} в два-три раза положе опубликованных, что объясняется большой долей псевдобалджей. Рост чёрной дыры определяется структурой балджа, а не асимметрией диска.

Ключевые слова: спиральные галактики, асимметрия диска, балдж, псевдобалдж, сверхмассивная чёрная дыра.

Orifjonova O.Sh.

student

Botirov F.U.

associate professor, Faculty of Physics, NUUz

Nuritdinov S.N.

professor, Faculty of Physics, NUUz

BLACK HOLES IN LOPSIDED SPIRAL GALAXIES: BULGE-REGULATED GROWTH AND THE FLATTENING OF THE M_{BH}–σ RELATION

Annotation: We test whether m = 1 disc asymmetry affects the mass M_{BH} of the central supermassive black hole. For 572 lopsided galaxies M_{BH} is uncorrelated with the asymmetry amplitude A_1 ($r = -0.02$), but in three distance bins it correlates with the bulge velocity dispersion ($r = 0.70, 0.61, 0.52$) and depends quadratically on morphological type ($R = 0.71$). The derived M_{BH}–σ_{bulge} relations are two to three times shallower than published ones, which we attribute to the high fraction of pseudobulges. Black hole growth is governed by bulge structure, not by disc asymmetry.

Keywords: spiral galaxies, lopsidedness, bulges, pseudobulges, supermassive black holes.

1. Введение

Около трети дисковых галактик демонстрируют глобальную асимметрию (lopsidedness) в распределении звёзд и газа, при которой одна половина диска протяжённее или ярче другой [1–3]. Асимметрия описывается азимутальной фурье-модой $m = 1$ поверхностной плотности, нормированная амплитуда которой A_1 служит стандартной мерой асимметрии [4]. В качестве её причин рассматриваются приливные взаимодействия и малые слияния, асимметричная аккреция газа, асимметричное гало тёмной материи и глобальные неустойчивости самогравитирующего диска [4–7]; такие неустойчивости могут порождать и другие неосесимметричные и кольцевые структуры [8].

Возмущение $m = 1$ создаёт гравитационные моменты, направляющие газ к центру, поэтому асимметричные диски должны подпитывать внутренние области галактики и способствовать вековому росту балджа [4–6]. Однако балджи бывают двух типов: классические балджи – динамически горячие сфероиды, сформированные слияниями, а

псевдобалджи – дископодобные структуры, выросшие секулярно из вещества диска [9–11]. Нелинейная космогония балджей спиральных галактик рассматривалась в [12]. Массы сверхмассивных чёрных дыр тесно коррелируют с дисперсией скоростей звёзд классических балджей [13–18], тогда как чёрные дыры в псевдобалджах сильно отклоняются от этого соотношения и не коррелируют с дисками [18–20]. В нашей предыдущей работе были найдены систематические зависимости характеристик балджей от массы центральной чёрной дыры [21].

Отсюда возникает вопрос, специфичный для асимметричных галактик: оставляет ли асимметрия диска через приток газа статистический след на M_{BH}, или M_{BH} регулируется только балджем? В настоящей работе мы отвечаем на него эмпирически, сравнивая зависимость M_{BH} от A_1 с её зависимостями от параметров балджа и глобальных параметров галактики, и исследуем, как население балджей асимметричных спиралей формирует соотношение M_{BH}–σ_{bulge}.

2. Данные и метод

Выборка составлена на основе каталога асимметричных галактик, содержащего наблюдаемые и производные физические параметры. Основной блок включает 572 галактики, для которых известны как A_1, так и наблюдательная оценка M_{BH}; ещё восемь галактик с модельными оценками масс рассматривались лишь как вспомогательный материал. Для контроля точности измерений и эффектов селекции галактики разделены на три интервала расстояний: $D \leq 10$ Мпк, $10 < D \leq 50$ Мпк и $D > 50$ Мпк. Помимо $\log(M_{BH}/M_{\odot})$ и A_1 использованы морфологический тип T (индикатор выраженности балджа, поскольку от Sa к Sd отношение «балдж/полная светимость» уменьшается, а доля псевдобалджей растёт [9, 10]), дисперсия скоростей звёзд балджа σ_{bulge}, звёздная масса M_*, максимальная скорость вращения газа $V_{max,gas}$ и абсолютная звёздная величина в полосе B M_B. Каждая корреляция вычислялась по галактикам,

для которых известны обе величины, поэтому число объектов различается для разных соотношений.

Линейные связи оценивались коэффициентом корреляции Пирсона r; его значимость – по t-статистике, а 95%-ные доверительные интервалы – с помощью z-преобразования Фишера. Тренды аппроксимировались методом наименьших квадратов в виде $\log M_{BH} = a\,x + b$. Для зависимости от T использовалась квадратичная аппроксимация, качество которой характеризуется коэффициентом множественной корреляции R. Для сравнения с литературой соотношения M_{BH}–σ_{bulge} представлены в виде $\log M_{BH} = \alpha + \beta \log(\sigma_{bulge}/200$ км/с).

3. Результаты

3.1. Отсутствие связи с асимметрией диска. Для 572 галактик получено $r = -0{,}02$ ($p = 0{,}63$) с 95%-ным доверительным интервалом [−0,10; 0,06], что исключает даже слабую линейную зависимость. Средняя масса чёрной дыры в интервалах A_1 остаётся на уровне $\log(M_{BH}/M_\odot) \approx 7{,}4$–7,7 во всём диапазоне $0 \le A_1 \le 1$: сильно и слабо асимметричные галактики содержат чёрные дыры одинаковой типичной массы. Восемь объектов с модельными массами дают незначимое $r = 0{,}39$ ($p = 0{,}34$).

3.2. Параметры балджа и глобальные параметры. Напротив, M_{BH} коррелирует с σ_{bulge} во всех интервалах расстояний (табл. 1, рис. 1): $\log M_{BH} = 2{,}40 \log \sigma_{bulge} + 2{,}55$ ($r = 0{,}70$) при $D \le 10$ Мпк, $\log M_{BH} = 2{,}19 \log \sigma_{bulge} + 3{,}07$ ($r = 0{,}61$) при $10 < D \le 50$ Мпк и $\log M_{BH} = 1{,}50 \log \sigma_{bulge} + 4{,}61$ ($r = 0{,}52$) при $D > 50$ Мпк. Связь наиболее сильна там, где данные наиболее точны, и это единственное соотношение, сила которого не возрастает к дальнему интервалу, что указывает на физическую, а не селекционную природу связи. Для спиральных галактик M_{BH} квадратично зависит от морфологического типа ($R = 0{,}71$), уменьшаясь от $\log(M_{BH}/M_\odot) \approx 8$–9 у ранних спиралей ($T \approx 1$–3) до ≈ 5–6 у галактик Sc–Sd ($T \approx 6$–8), т. е. примерно на три порядка по мере уменьшения выраженности балджа.

Корреляции с глобальными параметрами слабее в ближнем интервале и усиливаются с расстоянием. Для $V_{max,gas}$ наклоны практически одинаковы во всех интервалах (0,0046; 0,0049 и 0,0051), поэтому рост r отражает меньший разброс и иной состав дальней подвыборки, а не изменение самого соотношения. Корреляция с M_* (r = 0,43 и 0,64) слабее, чем с σ_{bulge}, что ожидаемо, если чёрная дыра связана с балджем, а не со всей галактикой.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона r (в скобках – наклон a) для log M_{BH} и параметров галактики

Параметр	***D* ≤ 10 Мпк**	**10 < *D* ≤ 50 Мпк**	***D* > 50 Мпк**
log σ_{bulge}	0,70 (2,40)	0,61 (2,19)	0,52 (1,50)
$V_{max,gas}$	0,28 (0,0046)	0,42 (0,0049)	0,66 (0,0051)
M_B	−0,33 (−0,20)	−0,49 (−0,31)	−0,95 (−0,51)
log M_*	0,43 (0,26)	0,64 (0,45)	полож. тренд

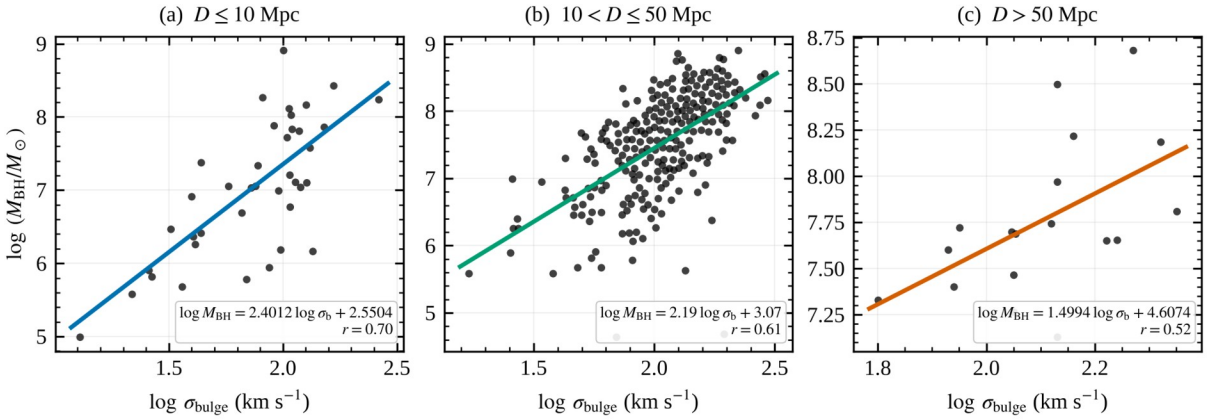


Рисунок 1. Зависимость массы чёрной дыры от дисперсии скоростей звёзд балджа: (a) $D \leq 10$ Мпк, (b) $10 < D \leq 50$ Мпк, (c) $D > 50$ Мпк. Линии – линейные аппроксимации; их уравнения и r приведены на каждой панели.

4. Обсуждение

4.1. Почему асимметрия не влияет на чёрную дыру. Сфера влияния чёрной дыры $r_{infl} \sim GM_{BH}/\sigma_{bulge}^2$ составляет от нескольких до нескольких десятков парсек, тогда как A_1 измеряется на килопарсековых радиусах, где потенциал определяется диском и тёмным гало. Асимметрия задаётся внешними возмущениями, асимметричной аккрецией и динамикой системы «диск–гало» [4, 6, 7], действующими в течение нескольких динамических времён; даже если она подпитывает центр газом,

её вклад в M_{BH} размывается длительной и разнообразной историей роста чёрной дыры.

4.2. Уплощение соотношения M_{BH}–σ. При σ_{bulge} = 200 км/с все наши соотношения дают log M_{BH} = 8,06–8,11, что хорошо согласуется с нуль-пунктами 8,11–8,49 опубликованных калибровок (табл. 2, рис. 2). Однако при малых дисперсиях наши наклоны β = 1,5–2,4 в два-три раза меньше эталонных значений 4,0–5,6, и при σ_{bulge} = 50 км/с они предсказывают log M_{BH} ≈ 6,6–6,8 вместо 4,9–5,9. Эталонные соотношения калиброваны в основном по эллиптическим галактикам и классическим балджам, тогда как в нашей выборке преобладают спирали, центральные компоненты которых при малых σ_{bulge} являются в основном псевдобалджами, не следующими классическому соотношению [18–20]. Смесь классических балджей при больших σ_{bulge} и псевдобалджей при малых σ_{bulge} даёт более пологое среднее соотношение; разбавление регрессии из-за ошибок σ_{bulge} дополнительно уменьшает наклон. Той же смесью объясняется и квадратичная зависимость M_{BH} от T. Таким образом, асимметрия может способствовать секулярному росту псевдобалджей [6, 9], но M_{BH} определяется уже сформировавшимся балджем, прежде всего его классической, динамически горячей компонентой [12, 21].

Таблица 2. Соотношения M_{BH}–σ_{bulge} в виде log $M_{BH} = \alpha + \beta \log(\sigma_{bulge}/200$ км/с)

Соотношение	α	β	log M_{BH} при 200 км/с	log M_{BH} при 50 км/с
Данная работа, $D \leq 10$ Мпк	8,08	2,40	8,08	6,63
Данная работа, $10 < D \leq 50$ Мпк	8,11	2,19	8,11	6,79
Данная работа, $D > 50$ Мпк	8,06	1,50	8,06	7,15[†]
Ferrarese, Merritt [13]	8,11	4,80	8,11	5,22
Tremaine и др. [15]	8,13	4,02	8,13	5,71
Gültekin и др. [16]	8,12	4,24	8,12	5,57
McConnell, Ma [17]	8,32	5,64	8,32	4,92
Kormendy, Ho [18]	8,49	4,38	8,49	5,85

[†] Экстраполяция за пределы диапазона σ_{bulge} дальней подвыборки.

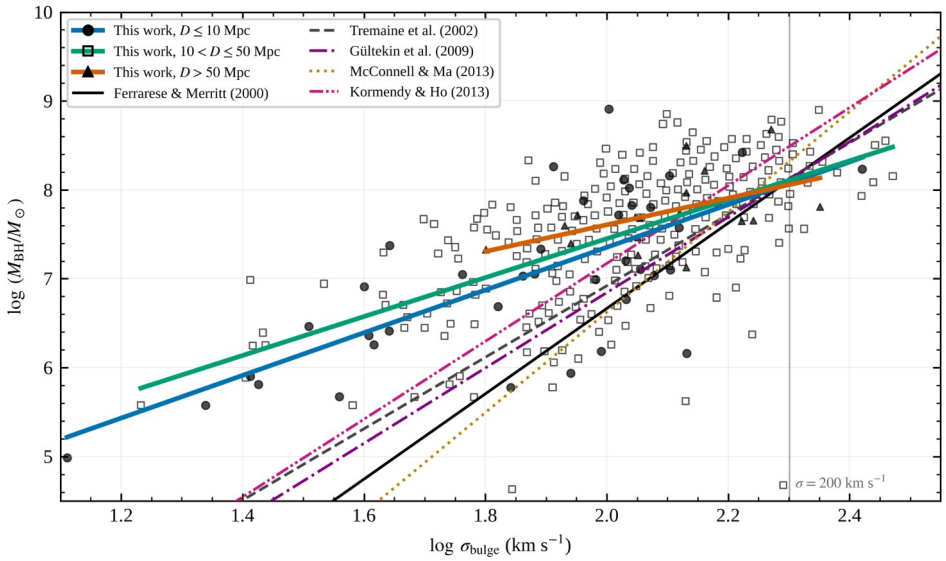


Рисунок 2. Соотношения M_{BH}–σ_{bulge}, полученные в данной работе (цветные сплошные линии; чёрные символы – галактики трёх интервалов), в сравнении с опубликованными соотношениями [13, 15–18]. Вертикальная линия отмечает σ_{bulge} = 200 км/с.

4.3. Ограничения. Сильные корреляции с $V_{max,gas}$ и M_B при $D > 50$ Мпк (r = 0,66 и −0,95) обусловлены селекцией мальмквистовского типа, отбирающей массивные яркие галактики, поэтому наши выводы опираются на ближний и промежуточный интервалы. Разложение на балдж и диск с определением отношения «балдж/полная светимость» и индекса Серсика [10, 11] позволило бы аппроксимировать классические балджи и псевдобалджи раздельно, а регрессионные методы, учитывающие ошибки обеих переменных, устранили бы смещение наклонов; эти вопросы будут рассмотрены в дальнейшей работе.

5. Заключение

1. Для 572 асимметричных галактик масса центральной чёрной дыры не зависит от асимметрии диска (r = −0,02, 95%-ный доверительный интервал [−0,10; 0,06]); среднее log M_{BH} ≈ 7,4–7,7 одинаково для слабо и сильно асимметричных дисков.

2. M_{BH} определяется балджем: она коррелирует с σ_{bulge} во всех интервалах расстояний (r = 0,70; 0,61; 0,52) и квадратично уменьшается вдоль хаббловской последовательности (R = 0,71) – от log($M_{BH}/M_\odot$) ≈ 8–9 у галактик Sa–Sb до ≈ 5–6 у Sc–Sd.

3. Соотношения M_{BH}–σ_{bulge} для асимметричных галактик согласуются с опубликованными калибровками при $\sigma_{bulge} \approx 200$ км/с, но значительно положе при малых дисперсиях ($\beta \approx 1{,}5$–$2{,}4$) вследствие большой доли псевдобалджей и разбавления регрессии.

4. Асимметрия диска и рост чёрной дыры не связаны: первая отражает крупномасштабную динамику системы «диск–гало», второй – структуру балджа.

Использованные источники:

1. Baldwin J.E., Lynden-Bell D., Sancisi R. Lopsided galaxies // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1980. – Vol. 193. – P. 313.
2. Rix H.-W., Zaritsky D. Nonaxisymmetric structures in the stellar disks of galaxies // The Astrophysical Journal. – 1995. – Vol. 447. – P. 82.
3. Zaritsky D., Rix H.-W. Lopsided spiral galaxies and a limit on the galaxy accretion rate // The Astrophysical Journal. – 1997. – Vol. 477. – P. 118.
4. Jog C.J., Combes F. Lopsided spiral galaxies // Physics Reports. – 2009. – Vol. 471. – P. 75–111.
5. Block D.L., Bournaud F., Combes F., Puerari I., Buta R. Gravitational torques in spiral galaxies: gas accretion as a driving mechanism of galactic evolution // Astronomy & Astrophysics. – 2002. – Vol. 394. – P. L35.
6. Bournaud F., Combes F., Jog C.J., Puerari I. Lopsided spiral galaxies: evidence for gas accretion // Astronomy & Astrophysics. – 2005. – Vol. 438. – P. 507.
7. Mapelli M., Moore B., Bland-Hawthorn J. Lopsided galaxies: the case of NGC 891 // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – Vol. 388. – P. 697.
8. Mirtadjieva K.T., Nuritdinov S.N., Botirov F.U., Ganiev J.M. Can ring-shaped structures form due to the instability of vertical perturbations in a self-gravitating disk? // Gravitation and Cosmology. – 2025. – Vol. 31, № 1. – P. 46–52. – DOI: 10.1134/S0202289324700488.

9. Kormendy J., Kennicutt R.C. Secular evolution and the formation of pseudobulges in disk galaxies // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2004. – Vol. 42. – P. 603.
10. Fisher D.B., Drory N. The structure of classical bulges and pseudobulges: the link between pseudobulges and Sérsic index // The Astronomical Journal. – 2008. – Vol. 136. – P. 773.
11. Gadotti D.A. Structural properties of pseudo-bulges, classical bulges and bars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2009. – Vol. 393. – P. 1531.
12. Botirov F., Nuritdinov S. Nonlinear cosmogony of the spiral galaxy bulges // Open Astronomy. – 2021. – Vol. 30, № 1. – P. 144–148. – DOI: 10.1515/astro-2021-0019.
13. Ferrarese L., Merritt D. A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies // The Astrophysical Journal. – 2000. – Vol. 539. – P. L9.
14. Gebhardt K., Bender R., Bower G. et al. A relationship between nuclear black hole mass and galaxy velocity dispersion // The Astrophysical Journal. – 2000. – Vol. 539. – P. L13.
15. Tremaine S., Gebhardt K., Bender R. et al. The slope of the black hole versus velocity dispersion correlation // The Astrophysical Journal. – 2002. – Vol. 574. – P. 740.
16. Gültekin K., Richstone D.O., Gebhardt K. et al. The M–σ and M–L relations in galactic bulges, and determinations of their intrinsic scatter // The Astrophysical Journal. – 2009. – Vol. 698. – P. 198.
17. McConnell N.J., Ma C.-P. Revisiting the scaling relations of black hole masses and host galaxy properties // The Astrophysical Journal. – 2013. – Vol. 764. – P. 184.
18. Kormendy J., Ho L.C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2013. – Vol. 51. – P. 511.

19. Hu J. The black hole mass–stellar velocity dispersion correlation: bulges versus pseudo-bulges // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2008. – Vol. 386. – P. 2242.
20. Kormendy J., Bender R., Cornell M.E. Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges // Nature. – 2011. – Vol. 469. – P. 374.
21. Botirov F.U., Nuritdinov S.N., Ashurov A.E. Dependences of characteristics of bulges on the mass of the central black hole and theoretical aspects of their origin // Astronomy Reports. – 2023. – Vol. 67, № 5. – P. 448–457. – DOI: 10.1134/S1063772923050013.