

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИНОВ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР В ЛОКАЛЬНЫХ АКТИВНЫХ ЯДРАХ ГАЛАКТИК

М.Ю. Пиотрович^{1,2}, С.Д. Булига^{1,2}, Т.М. Нацвлишвили¹

(1) Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург.

(2) Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз.

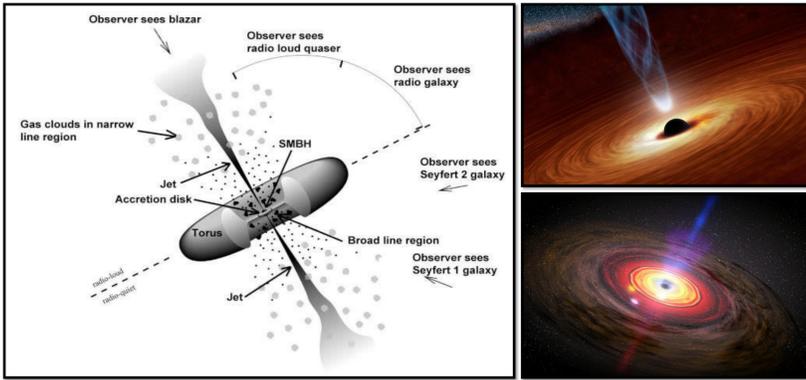
mpiotrovich@mail.ru



Работа поддержана грантом Российского научного фонда, проект № 20-12-00030

«Исследование геометрии и кинематики ионизированного газа в ядрах активных галактик методами поляриметрии».

Введение



На рисунке представлено схематическое изображение объекта нашего исследования. Черная дыра с аккреционным диском и джетами.

Определение спина (безразмерного углового момента) a сверхмассивной черной дыры (СМЧД), расположенной в центре активного ядра галактики (АЯГ) одна из важных проблем современной астрофизики. Надежно установлено, что величина спина играет ключевую роль в генерации релятивистских джетов в АЯГ; поэтому для определения спина сверхмассивной черной дыры чаще всего используется мощность релятивистской струи. Одним из эффективных методов определения спина является определение коэффициента радиационной эффективности аккреционного диска ϵ , которая существенно зависит от значения спина. Существует несколько моделей, связывающих радиационную эффективность с такими полученными из наблюдений параметрами АЯГ, как масса сверхмассивной черной дыры, угол между лучом зрения и осью аккреционного диска и болометрическая светимость. Целью нашей работы является оценка значений спина СМЧД в АЯГ на основе модели аккреционного диска Шакуры-Сюняева и имеющихся данных наблюдений.

$$a = cJ/GM_{\text{BH}}^2$$

$$\epsilon = L_{\text{bol}}/\dot{M}c^2$$

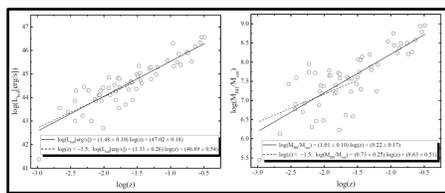
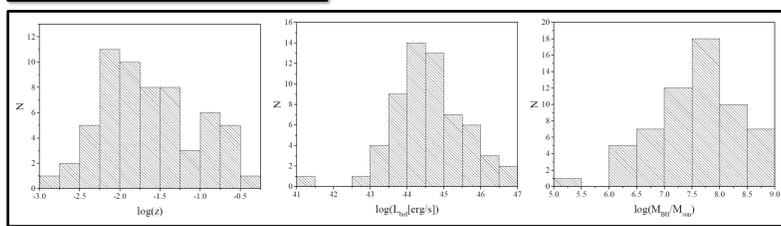
Модели

- Davis, S. W., & Laor, A. 2011, *ApJ*, 728, 98.
- Raimundo, S. I., Fabian, A. C., Vasudevan, R. V., Gandhi, P., & Wu, J. 2012, *MNRAS*, 419, 2529-2544.
- Du, P., Hu, C., Lu, K.-X. et al. 2014, *ApJ*, 782, 45.
- Trakhtenbrot, B. 2014, *ApJ*, 789, L9.
- Lawther, D., Vestergaard, M., Raimundo, S., & Grupe, D. 2017, *MNRAS*, 467(4), 4674-4710.

Анализ используемых данных

Мы использовали объекты из работы Марина (2016), потому что для всех этих объектов можно использовать модель геометрически тонкого, оптически толстого аккреционного диска Шакуры-Сюняева. А все методы расчета радиационной эффективности, используемые в нашей статье, предполагают эту модель диска. На рисунке показано распределение объектов по красному смещению, массе и болометрической светимости. Распределение красного смещения показывает увеличение на малых z , связанное с увеличением количества объектов с увеличением расстояния, а затем количество объектов начинает уменьшаться, что, по-видимому, связано с эффектом селекции, поскольку на больших расстояниях количество объектов, яркость которых позволяет уверенно определять их физические параметры, уменьшается. Однако мы можем видеть, что распределение массы и светимости имеют нормальную форму с пиком в области известного среднего значения этих параметров и, таким образом, не имеют видимых проявлений эффекта селекции, который мог возникнуть в этом случае, потому что среди удаленных объектов мы могли бы в первую очередь наблюдать самые яркие с наибольшей массой центральной сверхмассивной черной дыры. На нижнем рисунке представлены зависимости болометрической светимости и массы сверхмассивной черной дыры от красного смещения. Чтобы проверить возможное влияние эффекта селекции на эти зависимости, мы делаем две линейные аппроксимации: для всех объектов и для ближайших объектов с $\log(z) < -1.5$. В обоих случаях аппроксимации близки в пределах допустимой погрешности. Таким образом, мы можем заключить, что влияние эффекта селекции в данном случае мало.

Marin, F. 2016, *MNRAS*, 460, 3679-3705.



Анализ показывает, что в данном случае влияние эффекта селекции (который может возникнуть из-за того что среди далеких объектов мы наблюдаем в основном самые яркие) мало.

Расчет коэффициента радиационной эффективности и спина

Существует ряд моделей, позволяющих оценить радиационную эффективность аккреционного диска АЯГ. Для получения взаимосвязи между параметрами все эти методы используют статистический анализ данных наблюдений АЯГ и модель аккреционного диска Шакуры-Сюняева. Мы выбрали три наиболее популярные и при этом в достаточной степени отличающиеся друг от друга модели. Согласно теории, радиационная эффективность должна быть в пределах от 0.039 до 0.324. После расчетов мы получили 68 объектов, для которых хотя бы одна из моделей дала результат в этих пределах. Дальше величина спина определялась численно при помощи указанных ниже соотношений.

- Raimundo et al. (2012):

$$\epsilon(a) = 0.063 \left(\frac{L_{\text{bol}}}{10^{46} \text{erg/s}} \right)^{0.99} \left(\frac{L_{\text{opt}}}{10^{42} \text{erg/s}} \right)^{-1.5} M_8^{0.89} \mu^{1.5}$$
- Trakhtenbrot (2014):

$$\epsilon(a) = 0.073 \left(\frac{L_{\text{bol}}}{10^{46} \text{erg/s}} \right) \left(\frac{\lambda L_{\lambda}}{10^{46} \text{erg/s}} \right)^{-1.5} \left(\frac{\lambda}{5100 \text{ \AA}} \right)^{-2} M_8 \mu^{1.5}$$

$$\lambda L_{\lambda} = L_{\text{opt}}, \lambda = 4400 \text{ \AA}.$$
- Du et al. (2014):

$$\epsilon(a) = 0.105 \left(\frac{L_{\text{bol}}}{10^{46} \text{erg/s}} \right) \left(\frac{L_{5100}}{10^{42} \text{erg/s}} \right)^{-1.5} M_8 \mu^{1.5}$$

$$0.039 < \epsilon(a) < 0.324$$

$$\epsilon(a) = 1 - \frac{R_{\text{ISCO}}^3 - 2R_{\text{ISCO}}^2 + |a|}{R_{\text{ISCO}}^3 (R_{\text{ISCO}}^3 - 3R_{\text{ISCO}}^2 + 2|a|)^{1/2}}$$

$$R_{\text{ISCO}}(a) = 3 + Z_2 \pm ((3 - Z_1)(3 + Z_1 + 2Z_2))^{1/2}$$

$$Z_1 = 1 + (1 - a^2)^{1/3} (1 + a)^{1/3} + (1 - a)^{1/3}$$

$$Z_2 = (3a^2 + Z_1^2)^{1/2}$$

$$M_8 = M_{\text{BH}} / (10^8 M_{\odot}) \quad \mu = \cos i \quad L_{5100} = L_{\text{bol}} / 10.3$$

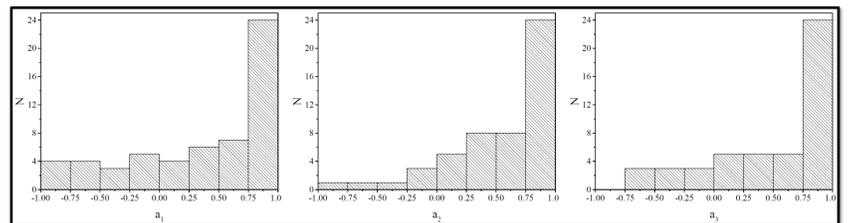
$$L_{\text{opt}} \text{ from Hopkins et al. (2007): } L_{\text{bol}}/L_{\text{opt}} = L_{\text{bol}}/L_{\text{B}} = 6.25(L_{\text{bol}}/(10^{10} L_{\odot}))^{-0.37} + 9.0(L_{\text{bol}}/(10^{10} L_{\odot}))^{-0.12}, L_{\text{B}} = L(4400 \text{ \AA}).$$

Значения спинов, определенные для трех моделей

Object	Type	$\log(z)$	$\log \frac{L_{\text{bol}}}{L_{\odot}}$	$\log L_{\lambda}$	$\log L_{\lambda}$	i	a_1	a_2	a_3
3C 120	BLS1	-1.474	7.74	45.34	-0.58	22.0	0.332	0.690	0.768
Ako 120	BLS1	-1.491	8.07	44.91	-1.34	42.0	0.946	0.996	0.996
Ap 151	BLS1	-1.676	6.62	43.70	-1.10	25.2	0.524	0.558	-0.070
ESO 323-G077	NLS1	-1.827	7.40	43.90	-1.68	45.0	0.964	0.990	0.944
ESO 362-G18	BLS1	-1.805	7.65	44.11	-1.72	53.0	0.952	0.990	0.960
Fairall 9	BLS1	-1.317	8.20	45.23	-1.15	35.0	0.936	0.996	0.998
1Zw1	NLS1	-1.216	7.24	44.98	-0.44	8.0	-0.402	0.026	0.084
IC 2560	S2.0	-2.011	6.48	42.70	-1.96	46.0	0.778	0.768	0.768
IRAS 13349+2438	S2.0	-0.964	8.75	46.30	-0.63	52.0	0.524	0.910	0.968
K 348-7	S1.0	-0.631	8.58	46.16	-0.60	35.0	0.736	0.958	0.990
LEDA 46718	S1.5	-1.767	7.69	44.80	-1.07	27.0	0.836	0.944	0.938
LEDA 47869	S1.5	-1.220	6.46	43.85	-0.79	34.0	-0.754	-0.754	-
Mk 110	S1.5	-1.450	7.29	44.71	-0.76	37.4	-0.070	0.314	0.232
Mk 279	BLS1	-1.514	7.43	44.36	-1.25	35.0	0.836	0.926	0.874
Mk 335	NLS1	-1.595	7.23	44.69	-0.72	20.0	0.210	0.474	0.416
Mk 34	S2.0	-1.293	7.80	44.78	-1.20	65.0	-0.070	0.460	0.430
Mk 348	S2.0	-1.823	7.21	44.27	-1.12	60.0	-0.506	-0.038	-0.452
Mk 359	NLS1	-1.774	6.23	43.55	-0.86	30.0	-0.506	-0.024	-
Mk 463	S2.0	-1.298	7.88	45.28	-0.78	60.0	-0.824	0.084	0.254
Mk 50	S1.0	-1.630	7.57	44.34	-1.41	9.0	0.984	1.000	0.992
Mk 509	BLS1	-1.456	8.05	45.03	-1.20	19.0	0.970	1.000	-
Mk 573	S2.0	-1.762	7.58	44.44	-1.32	60.0	0.400	0.682	0.568
Mk 590	BLS1	-1.584	7.57	44.63	-1.12	17.8	0.876	0.956	0.944
Mk 78	S2.0	-1.430	8.14	44.59	-1.73	60.0	0.950	0.996	0.992
Mk 79	BLS1	-1.554	7.61	44.57	-1.22	58.0	0.332	0.660	0.580
Mk 817	S1.5	-1.502	7.60	44.99	-0.79	41.6	0.162	0.558	0.590
Mk 877	BLS1	-0.951	8.44	45.33	-1.29	20.0	0.998	1.000	-
Mk 896	NLS1	-1.572	6.58	43.89	-0.87	15.0	0.136	0.186	-0.564
NGC 1068	S2.0	-2.419	7.59	44.30	-1.47	70.0	-0.106	0.350	0.084
NGC 1320	S2.0	-2.036	7.18	43.86	-1.50	68.0	-0.106	0.210	-0.564
NGC 1386	S1.92.0	-2.537	7.42	43.38	-2.22	81.0	-0.106	0.274	-
NGC 1566	S1.5	-2.298	6.92	44.45	-0.65	30.0	-0.624	-0.262	-0.624
NGC 2992	S2.0	-2.137	7.72	43.92	-1.98	70.0	0.828	0.938	0.816
NGC 3227	S1.5	-2.438	6.77	43.86	-1.09	14.2	0.652	0.710	0.350
NGC 3516	S1.5	-2.055	7.39	44.29	-1.28	20.0	0.900	0.960	0.916
NGC 3783	S1.5	-2.011	7.37	44.41	-1.14	15.0	0.854	0.934	0.894
NGC 4051	NLS1	-2.666	6.13	43.56	-0.75	19.6	-0.754	-	-
NGC 424	S2.0	-1.927	7.78	44.85	-1.11	69.0	-	0.142	-0.142
NGC 4388	S2.0	-2.064	7.23	44.10	-1.31	60.0	0.136	0.416	0.026
NGC 4395	S1.8	-2.975	5.45	41.37	-2.26	15.0	-	-	0.084
NGC 4507	S1.92.0	-1.924	7.65	44.40	-1.43	47.0	0.882	0.962	0.932
NGC 4993	BLS1	-2.079	6.88	44.09	-0.97	21.6	0.446	0.568	0.254
NGC 4941	S2.0	-2.433	6.90	43.00	-2.08	70.0	0.796	0.842	-0.070
NGC 5506	NLS1	-2.220	7.95	44.30	-1.83	80.0	-0.824	0.084	-0.262
NGC 5548	S1.5	-1.789	7.72	44.83	-1.07	47.3	-1.560	0.812	0.834
NGC 7213	LINER	-2.231	7.74	44.30	-1.62	21.0	1.000	-	-
NGC 7314	S1.9	-2.321	6.70	43.23	-1.65	42.0	0.922	0.936	0.536
PG 0026+129	NLS1	-1.848	8.49	45.39	-1.28	43.0	0.972	-	-
PG 1302-102	S1.0	-0.555	8.94	46.33	-0.79	32.0	0.954	-	-
PG 1411+442	BLS1	-1.046	8.54	45.58	-1.14	14.0	0.994	-	-
PG 1435-067	BLS1	-0.900	8.24	45.50	-0.92	38.0	0.808	0.964	0.882
PG 1626+554	BLS1	-0.876	8.37	45.85	-0.70	31.0	0.768	0.956	0.984
PG 1700+518	NLS1	-0.535	8.79	46.56	-0.41	43.0	0.524	0.914	0.974
PG 2231+113	S1.0	-0.488	8.96	46.56	-0.58	67.0	-0.452	0.626	0.824
RBS 1124	BLS1	-0.682	8.26	45.53	-0.91	66.0	-0.452	0.416	0.568
Swift J1217+5654	NLS1	-1.842	7.18	44.54	-0.82	49.0	-0.686	-0.180	-0.402
Ton 1388	S1.0	-0.753	8.50	45.92	-0.76	39.0	0.782	0.966	0.990
Ton 1542	BLS1	-1.197	7.93	45.27	-0.84	22.0	0.724	0.912	0.938
Ton 1565	S1.0	-0.738	8.21	45.89	-0.50	37.0	0.314	0.768	0.874
UGC 6728	S1.0	-1.186	6.30	43.00	-1.48	55.0	0.416	0.350	-

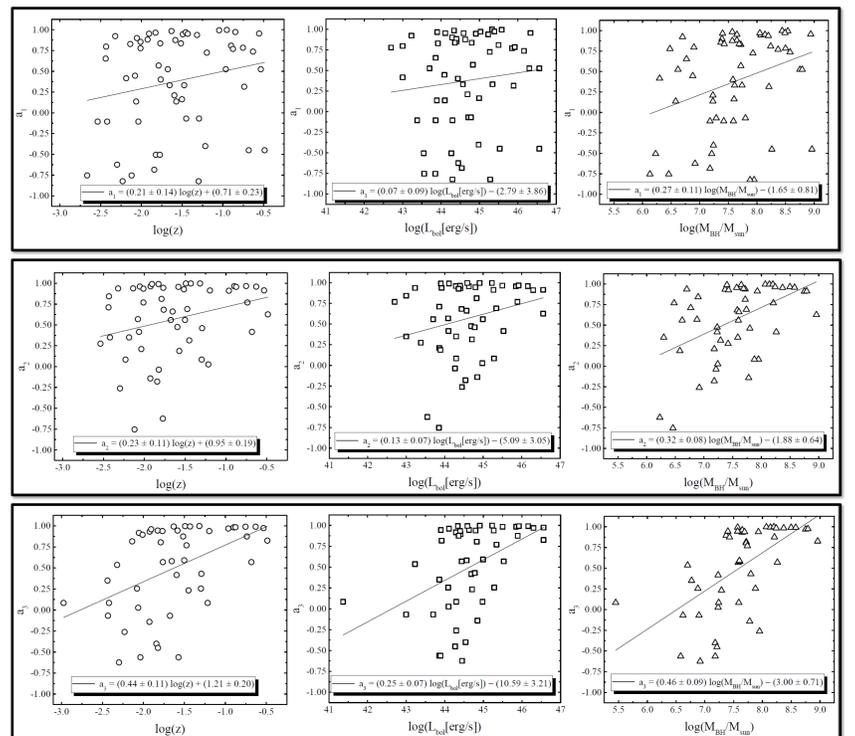
В Таблице представлены результаты наших расчетов спина для всех трех моделей: a_1 – Raimundo et al. (2012), a_2 – Trakhtenbrot (2014), a_3 – Du et al. (2014). Знак “-” означает, что значение вне допустимого диапазона. В таблице также указаны тип объекта, космологическое красное смещение, масса сверхмассивной черной дыры, болометрическая светимость, коэффициент Эддингтона и угол наклона.

Статистический анализ



На рисунке представлены гистограммы, показывающие количество объектов с определенным значением спина для всех трех моделей. Все гистограммы показывают похожие распределения. Выявленный пик в районе $0.75 < a < 1.0$, ~40% объектов имеют спин $a < 0.75$, ~50% объектов имеют спин $a > 0.5$. Этот результат хорошо согласуется с результатами наших предыдущих работ и результатами других авторов.

Результаты



Все модели показывают сходные тренды, однако результаты первой и второй модели можно рассматривать только как качественные. Спин уменьшается с космологическим временем, что согласуется с теоретическими расчетами для близких АЯГ из литературы. Уменьшение спина с космологическим временем для близких АЯГ связано с тем, что со временем массы СМЧД растут, а количество газа в галактиках уменьшается и это приводит к увеличению вклада спинового ЧД в общий рост массы, что в свою очередь приводит к уменьшению величины спинов и изменению направления вращения. Спин увеличивается с болометрической светимостью, что ожидаемо, поскольку с увеличением спина растет коэффициент радиационной эффективности. Спин растет с ростом массы, что так же хорошо согласуется с теоретическими расчетами других авторов.

Литература

- [1] Afanasiev, V. L., Gnedin, Y. N., Piotrovich, M. Y., Natvshvili, T. M., & Buliga, S. D. 2018, *Astronomy Letters*, 44, 362-369.
- [2] Bardeen, J. M., Press, W. H., & Teukolsky, S. A. 1972, *ApJ*, 178, 347-370.
- [3] Blandford, R. D., & Payne, D. G. 1982, *MNRAS*, 199, 883-903.
- [4] Blandford, R. D., & Znajek, R. L. 1977, *MNRAS*, 179, 433-456.
- [5] Cheng, H., Yuan, W., Liu, H.-Y., Breveid, A. A., Jin, C., & Lu, B. 2019, *MNRAS*, 487(3), 3884-3903.
- [6] Daly, R. A. 2011, *MNRAS*, 414, 1253-1262.
- [7] Davis, S. W., & Laor, A. 2011, *ApJ*, 728, 98.
- [8] Du, P., Hu, C., Lu, K.-X. et al. 2014, *ApJ*, 782, 45.
- [9] Dubois, Y., Volonteri, M., & Silk, J. 2014, *MNRAS*, 440(2), 1590-1606.
- [10] Duru, F., Bongiorno, A., Ricci, F. et al. 2020, *A&A*, 636, A73.
- [11] Garofalo, D., Evans, D. A., & Sambruna, R. M. 2010, *MNRAS*, 406, 975-986.
- [12] Griffin, A. J., Lacey, C. G., Gonzalez-Perez, V., Lagos, C. d. P., Baugh, C. M., & Fardaklis, N. 2019, *MNRAS*, 487(1), 198-227.
- [13] Hopkins, P. F., Richards, G. T., & Hernquist, L. 2007, *ApJ*, 654(2), 731-753.
- [14] Krolik, J. H. 2007, Making black holes visible: accretion, radiation, and jets. 2007 STScl Spring Symposium on Black Holes p. 309-321.
- [15] Krolik, J. H., Hawley, J. F., & Hirose, S. 2007, The Relationship between Accretion Disks and Jets. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* Vol. 27, p. 1-17.
- [16] Lawther, D., Vestergaard, M., Raimundo, S., & Grupe, D. 2017, *MNRAS*, 467(4), 4674-4710.
- [17] Marin, F. 2016, *MNRAS*, 460, 3679-3705.
- [18] Netzer, H. 2019, *MNRAS*, 488(4), 5185-5191.
- [19] Novikov, I. D., & Thorne, K. S. 1973, *Astrophysics of black holes*, C. Dewitt & B. S. Dewitt (Eds.), Black Holes (Les Astres Occlus) p. 343-450. New York: Gordon and Breach.
- [20] Raimundo, S. I., Fabian, A. C., Vasudevan, R. V., Gandhi, P., & Wu, J. 2012, *MNRAS*, 419, 2529-2544.
- [21] Richards, G. T., Lacy, M., Storrie-Lombardi, L. J. et al. 2006, *ApJS*, 166, 47-67.
- [22] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, *A&A*, 24, 337-355.
- [23] Thorne, K. S. 1974, *ApJ*, 191, 507-520.
- [24] Trakhtenbrot, B. 2014, *ApJ*, 789, L9.
- [25] Volonteri, M., Sikora, M., Lasota, J. P., & Merton, A. 2013, *ApJ*, 775(2), 94.