

射电噪类星体黑洞的质量和自旋与喷流能量的相关性*

张 旭[†] 张皓晶[‡] 张 雄

(云南师范大学物理与电子信息学院 昆明 650011)

摘要 喷流的形成与黑洞质量及黑洞自旋之间存在着很大关系. 讨论黑洞质量及黑洞自旋与喷流能量的关系对喷流形成及结构的研究有着重要的意义. 从文献资料中收集了65个射电类星体源. 这些源包含了35个陡谱射电类星体(SSRQs), 30个平谱射电类星体(FSRQs). 通过样本数据研究黑洞质量及黑洞自旋与喷流能量的相关性. 研究结果表明: (1)65个射电类星体的黑洞质量与喷流能量存在明显的相关性, 这与Zensus所得出的结论相同; (2)65个射电类星体的黑洞自旋与喷流能量存在相关性. 尤其在爱丁顿磁场条件下($B = B_{\text{EDD}}$), 黑洞自旋与喷流能量的相关性最为明显, 其相关系数要比黑洞质量与喷流能量的相关系数高; (3)陡谱射电类星体与平谱射电类星体的自旋数据分布存在一定差异; (4)研究结果进一步证明了喷流能量不仅与黑洞质量有关, 同时也很可能与黑洞的自旋能量存在关系. 黑洞喷流的形成很可能是黑洞质量与黑洞自旋共同作用的结果. 这些研究结果与其他方法获得的结果是一致的.

关键词 黑洞物理, 星系: 活动, 星系: 核, 星系: 喷流

中图分类号: P158; **文献标识码**: A

1 引言

大质量黑洞通常都被认为会产生较强的喷流^[1-2]. 虽然现今有着大量与之相关的数据及很多理论模型, 但黑洞产生喷流的机制及其具体结构目前仍然不清楚. 通常我们认为喷流是在黑洞中心视界附近产生的, 此观点由Penrose在1969年首次提出, 他认为一个自旋的黑洞存在着自旋能量^[3]. Blandford等^[4]认为这些能量能为黑洞的喷流供能. 他认为磁场由于黑洞转动的影响而产生弯曲, 从而有助于产生准直性喷流. 黑洞的自旋能量与喷流的相关性在理论上是非常明显的, 但并没有直接的证据支持这种关联. 这是因为以前没有一种可靠的测量黑洞自旋特性的方法($j = cJ/(GM^2)$), 其中 M 、 J 分别为黑洞的质量和角动量. 而现在, 我们有了很多可以准确测量黑洞自旋的方法. 例如: 运用BZ模

2014-12-25收到原稿, 2015-04-13收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11063004)及云南省教育厅基金项目(2014Z048, 2014FB140)资助

[†]2226997466@qq.com

[‡]kmzhanghj@163.com

型^[5], 在黑洞质量、磁场强度、流量密度已知的情况下, 对黑洞自旋 j 的大小进行估算. 此方法可运用于黑洞自旋与喷流能量的相关性分析, 验证喷流与黑洞自旋之间是否存在关系. Narayan等^[6]和Fender等^[7]均对黑洞自旋与喷流能量之间的相关性进行了研究, 但两个研究组却得出了不同的结果. 由于Narayan等和Fender等的研究中所采集的样本数量比较少, 这可能导致研究中相关性分析所得出的结果出现偏差. 同时文章中也没有讨论决定喷流能量大小的另一个重要因素——黑洞质量的影响. 在本文中我们扩大了样本的数量, 并运用了黑洞自旋角动量来进行黑洞自旋与喷流能量之间相关性的研究, 因为自旋角动量比起自旋角频率更能反映黑洞的自旋特性. 本文中我们将同时探讨黑洞质量与黑洞自旋各自对喷流能量的影响, 并评估哪一个对喷流能量更具影响力. 运用BZ模型中黑洞自旋的关系式计算收集样本的自旋^[6]及自旋能量^[8]. 文中分别讨论了黑洞质量及在3种不同特性的磁场条件下自旋与喷流能量的相关性, 得出的结果表明射电类星体黑洞自旋与喷流能量存在较为直接的联系. 这与Narayan等^[6]所得出的结论相同, 表明喷流的能量很可能来源于黑洞自旋能量. 本文给出了用模型公式估算射电类星体黑洞自旋的方法, 为自旋能量与喷流能量之间关系的进一步研究提供了依据.

2 黑洞自旋的计算

本文中我们计算黑洞自旋角动量的方法和Daly^[8]的相同. 在BZ模型中, 电子束功率 L_j 的产生与自旋 j 有很大关系^[8].

$$L_j(\text{BZ}) = (j^2 B_{po}^2 r_H^2 c) / 32 \approx 2 \times 10^{43} j^2 M_8^2 B_4^2 \text{ erg/s}, \quad (1)$$

r_H 为黑洞视界半径($r_H = 2GM/c^2$). B_{po} 为黑洞视界磁场强度. M_8 是以 $10^8 M_\odot$ 为单位的黑洞质量. B_4 是以 10^4 Gs为单位的电磁场强度.

$$jb_{\text{BZ}} \approx (B_{\text{EDD},4} M_8)^{-1} \sqrt{5L_{44}} \approx \sqrt{17.5L_j/L_E}, \quad (2)$$

$b \equiv B_{po}/B_{\text{EDD}}$ 为黑洞标准磁场强度. $B_{\text{EDD},4} \approx 6M_8^{-1/2}$ 为爱丁顿磁场. $L_E \approx 1.26 \times 10^{46} M_8 \text{ erg/s}$ 为黑洞爱丁顿光度. 由 $L_j = kL_j(\text{BZ})$ 、 $jb = jb_{\text{BZ}}/\sqrt{k}$ 及 $k \geq [jb_{\text{BZ}}]^2$, 可得出如下关系式:

$$L_j(M) \approx 10^{44} j^2 M_8^2 B_4^2 \text{ erg/s}. \quad (3)$$

当喷流较强时^[9–10], 运用自旋能量与黑洞周围的吸积物质^[11–12]有关的标准模型来估算黑洞自旋是比较准确的^[13]. 很多黑洞自旋与喷流电子束关系模型中^[14–15], 磁场强度和黑洞质量通常被设定为常数^[16–17]. 它们有如下关系^[18–19]:

$$L_j \propto j^2 M^2 B^2. \quad (4)$$

这个关系式表明当黑洞质量为 M , 喷流电子束功率强度为 L_j , 吸积盘的电磁场强度为 B 时, 能估算出黑洞自旋 j 的值^[20–21]:

$$j = kL_{44}^{0.5} B_4^{-1} M_8^{-1}, \quad (5)$$

L_{44} 是以 10^{44} erg/s 为单位的聚束功率(beam power). 比例常数 k 的数值根据不同的模型而变化. 例如在Nahum等^[22]的模型中 $k \approx 5^{1/2}$, 在Meier^[23]的hybrid模型中 $k \approx 1.05^{-1/2}$.

在最近对恒星质量黑洞的研究中第1次得到了直接经验证据说明(4)式能很好地描述黑洞自旋与电子束之间的关系^[24], Narayan等^[24]独立研究估算出的5个恒星质量的黑洞自旋与喷流中子束功率所呈现出的比例关系与(5)式所描述的相符合. 本文中的数据结果是套用Meier^[23]的hybrid模型的结果, 也可套用其他模型计算. 在本文我们引入了3种不同的磁场条件, 即爱丁顿磁场、静磁场和与自旋有关的磁场. 这3种磁场分别与黑洞的参数有联系. 在爱丁顿极限下的黑洞磁场定义为爱丁顿磁场, $B_{\text{EDD},4} \cong 6M_8^{-1/2}$ ^[24-25], 这种磁场是基于爱丁顿光度下的辐射源所检测出的, King等认为很多AGN的辐射均在此光度下^[25]. 为了检验爱丁顿磁场特性的影响, 我们引入了静磁场, $B_4 = 1$ ^[19,26-27]. 作为对比我们引入自旋磁场, 如果黑洞的自旋能量是连续的, 射电星系的磁场强度与自旋成比例关系, $B_4 \cong 2.78j$ ^[24,28-29]. 在Meier等的hybrid模型及Allen等的经验推论中均表明磁场强度与自旋存在着某种联系($B \propto j$)^[30-32], 与自旋有关的磁场下所计算出的黑洞自旋能做为黑洞自旋与喷流能量的相关性研究良好的参考项.

3 样本选择

我们从文献中采集了65个具有准确喷流能量数据的射电类星体源^[33-34]. 样本的黑洞质量均由基于反响映射法得到的经验关系, 根据光谱中宽发射线的性质估算^[35]得出, 喷流能量均由Punsly^[9]的估算方法得出. 由于文中的黑洞质量数据是基于经验关系估算得到的, 这对于黑洞自旋的测量数值的准确性产生了一定的影响, 还需要进一步的研究. 同时聚束光度的样本由于测量所产生的误差也会对黑洞自旋的估算产生影响. 样本计算黑洞自旋所需要的178 MHz流量密度均来源于NASA/IPAC 河外星系数据库(NED). 在计算 L_{44} 时我们进行了k改正, 修正了红移对其的影响. 我们采集的射电类星体样本数据包括红移、黑洞质量、喷流能量、聚束功率 L_{44} 等. 我们运用(5)式分别计算了在3种不同的磁场条件下的黑洞自旋. 以上数据均列于表1中. 本文着重讨论黑洞质量及黑洞自旋与喷流能量的相关性. 本文数据按源IAU名称由小到大排列.

表1 射电类星体样本数据
Table 1 The data of radio quasars

Source	z	Type	L_{44}	M_8	Refs	$\lg(Q_{\text{jet}}/\text{erg})$	Refs	$j(B = B_{\text{EDD}})$	$j(B_4 = 1)$	$j(B \propto j)$
0017+154	2.07	SS	18	9.62	[36]	47.19	[37]	0.222486	0.430394	0.393469
0056-001	0.717	FS	5.3	8.37	[38]	45.49	[37]	0.129428	0.268422	0.310732
0119-046	1.928	SS	5	9.91	[39]	46.52	[40]	0.115532	0.2202	0.28144
0122-042	0.561	SS	3.1	8.61	[41]	45.28	[40]	0.097596	0.199564	0.267929
0133+207	0.425	SS	25	9.45	[36]	45.5	[37]	0.26455	0.516349	0.430972
0134+329	0.367	SS	52	8.65	[42]	46.3	[37]	0.398793	0.813562	0.54097
0226-038	2.064	FS	3.2	8.92	[43]	44.03	[44]	0.09742	0.195711	0.265329
0333+321	1.258	FS	2.2	9.25	[39]	45.13	[37]	0.079322	0.156486	0.237255
0352+123	1.616	SS	6.6	8.49	[45]	46.3	[46]	0.143408	0.295304	0.325921
0414-06	0.773	SS	8	9.95	[38]	45.88	[37]	0.145844	0.277413	0.315894
0518+165	0.759	SS	20	8.6	[47]	46.89	[37]	0.248039	0.507483	0.427256

表1 续1
Table 1 Continued 1

Source	z	Type	L_{44}	M_8	Refs	$\lg(Q_{\text{jet}}/\text{erg})$	Refs	$j(B = B_{\text{EDD}})$	$j(B_4 = 1)$	$j(B \propto j)$
0538+498	0.545	SS	60	9.23	[47]	46.9	[37]	0.414695	0.818991	0.542772
0723+679	0.846	FS	8.9	8.46	[47]	46.08	[48]	0.166826	0.344136	0.351838
0802+103	1.956	SS	11.4	8.98	[45]	47.06	[49]	0.18326	0.366928	0.363302
0809+483	0.871	SS	80	8.95	[50]	47.18	[37]	0.486281	0.975275	0.592299
0836+710	2.172	FS	5	9.36	[43]	46.01	[51]	0.118878	0.233139	0.289591
0838+133	0.684	FS	12	8.67	[38]	46.19	[37]	0.191353	0.389921	0.374512
0850+581	1.322	FS	2.9	8.49	[50]	46.02	[52]	0.09506	0.195748	0.265354
0859+470	1.462	FS	3.9	7.67	[50]	46.08	[51]	0.115982	0.251271	0.300641
0903+169	0.412	SS	9.9	8.39	[38]	45.3	[37]	0.176681	0.365983	0.362834
0906+015	1.018	FS	5.2	8.55	[41]	44.77	[37]	0.126845	0.26028	0.305984
0906+430	0.668	SS	20.2	6.85	[47]	46.09	[37]	0.279309	0.64031	0.479924
0923+392	0.698	FS	5.2	9.09	[50]	45.69	[37]	0.123019	0.244818	0.296756
0945+408	1.252	FS	5.4	8.6	[50]	45.39	[51]	0.128885	0.263696	0.307985
0953+254	0.712	FS	2.5	8.7	[47]	44.09	[37]	0.08719	0.17736	0.252584
0954+556	0.901	FS	6.7	7.87	[47]	45.64	[51]	0.150074	0.320973	0.339791
0955+326	0.53	FS	6.3	9.03	[53]	44.55	[54]	0.135857	0.271261	0.312372
1023+067	1.699	SS	9.5	8.99	[45]	46.5	[37]	0.1672	0.334586	0.346922
1040+123	1.029	SS	14	8.76	[36]	46.27	[37]	0.20562	0.416836	0.387222
1100+772	0.312	SS	12	9.19	[38]	45.3	[37]	0.18586	0.367858	0.363762
1103-006	0.426	SS	4.4	9.27	[38]	45.28	[40]	0.112057	0.220827	0.281841
1111+408	0.734	SS	21.7	9.84	[47]	46.19	[37]	0.241539	0.461998	0.40766
1137+660	0.656	SS	15.2	9.31	[36]	46.19	[37]	0.207827	0.408674	0.383413
1148-001	1.982	FS	2.5	8.9	[39]	45.57	[52]	0.086204	0.173375	0.24973
1156+295	0.729	FS	2.8	8.54	[38]	45.23	[51]	0.093133	0.191217	0.262265
1226+023	0.158	FS	75	8.92	[42]	45.38	[37]	0.471631	0.947482	0.583799
1229-021	1.045	FS	7.8	8.7	[41]	45.87	[52]	0.154007	0.313281	0.335695
1250+568	0.321	SS	8.6	8.31	[38]	45.5	[37]	0.165464	0.344392	0.351969
1253-055	0.536	FS	22	8.28	[47]	45.7	[37]	0.265125	0.552823	0.445934
1258+404	1.666	SS	10	8.22	[45]	46.75	[52]	0.179398	0.375434	0.367489
1317+520	1.06	SS	3.8	9.01	[39]	46.12	[55]	0.105629	0.211141	0.27559
1318+113	2.171	SS	8.1	9.32	[45]	46.86	[56]	0.151631	0.298011	0.327411
1559+173	1.944	SS	2.7	9.25	[45]	46.81	[57]	0.087875	0.173359	0.249718
1606+289	1.989	SS	3.5	9.37	[45]	46.56	[37]	0.099407	0.19485	0.264745
1618+177	0.551	SS	10.9	9.65	[36]	45.69	[37]	0.172864	0.333881	0.346556
1622+238	0.927	SS	12	9.53	[50]	46.48	[37]	0.182515	0.354734	0.357215
1624+416	2.55	FS	2.5	6.35	[50]	46.13	[58]	0.102056	0.242997	0.29565
1629+120	1.795	SS	4.4	9.65	[45]	47.21	[57]	0.109829	0.212131	0.276236
1633+382	1.814	FS	2.2	8.67	[50]	45.28	[37]	0.081932	0.166954	0.245062
1641+399	0.594	FS	12	9.27	[53]	45.3	[37]	0.185057	0.364684	0.362189

表1 续2
Table 1 Continued 2

Source	z	Type	L_{44}	M_8	Refs	$\lg(Q_{\text{jet}}/\text{erg})$	Refs	$j(B=B_{\text{EDD}})$	$j(B_4=1)$	$j(B \propto j)$
1642+690	0.751	FS	2.5	6.85	[50]	45.22	[51]	0.09826	0.22526	0.284656
1704+608	0.371	SS	15	9.49	[42]	45.6	[37]	0.204487	0.398277	0.378504
1721+343	0.206	FS	5	8.01	[38]	44.47	[54]	0.128506	0.272432	0.313045
1828+487	0.691	SS	75	9.85	[47]	46.89	[37]	0.448814	0.858025	0.555556
1845+797	0.056	FS	50	7.75	[50]	43.36	[54]	0.413131	0.890407	0.565942
1857+566	1.595	SS	5.9	9.11	[45]	46.19	[46]	0.130894	0.260203	0.305938
1928+738	0.302	FS	3.6	8.35	[50]	44.26	[51]	0.106798	0.221753	0.282431
2120+168	1.805	SS	12.5	9.68	[36]	46.88	[37]	0.18483	0.356439	0.358072
2145+067	0.99	FS	3.4	8.87	[39]	44.37	[51]	0.100701	0.202872	0.27014
2201+315	0.298	FS	3.5	8.94	[53]	45.29	[37]	0.10177	0.204222	0.271037
2216-038	0.901	FS	2.8	9.08	[47]	45.38	[37]	0.090321	0.179845	0.254347
2247+140	0.237	FS	4	7.91	[42]	43.71	[52]	0.115663	0.246751	0.297925
2251+113	0.326	SS	6.7	8.93	[53]	45.21	[37]	0.140885	0.282873	0.318987
2311+469	0.741	SS	6.6	9.36	[47]	46.15	[58]	0.13658	0.267856	0.310405
2354+144	1.81	SS	4.9	9.37	[45]	46.73	[55]	0.11762	0.230549	0.287978

4 分析结果

从图1可以看出黑洞质量 M 与喷流能量 Q_{jet} 具有较高的相关性, 说明黑洞质量与喷流能量之间存在联系, 黑洞喷流的形成受到黑洞质量的影响, 黑洞质量越大形成的喷流所携带的能量也就越多. 黑洞质量与喷流能量的相关系数与黑洞自旋与喷流能量的相关系数大体上相同, 这也说明黑洞质量对黑洞喷流能量的影响同样非常重要.

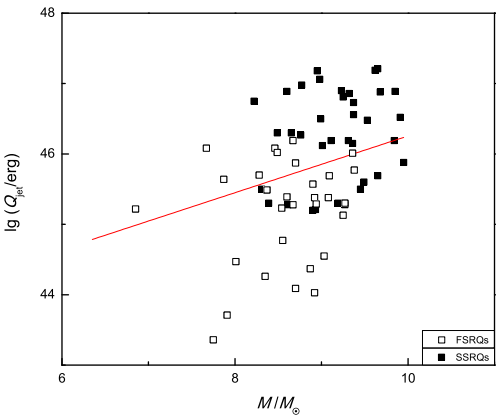


图 1 黑洞质量 M 与 Q_{jet} 的相关性

Fig. 1 Relation between the jet power Q_{jet} and the black hole mass M

图2和图3分别示意陡谱射电类星体与平谱射电类星体的自旋数据分布. 由图可以看

出, 陡谱射电类星体与平谱射电类星体的自旋数据分布虽存在一定差异, 但大体趋势较为相似. 在本文中可将两者数据一起讨论.

图4示意在爱丁顿磁场条件下($B=B_{\text{EDD}}$)黑洞自旋 j 与喷流能量 Q_{jet} 具有较高的相关性, 说明黑洞自旋与喷流能量之间存在联系, 这与Narayan等^[6]的研究结论相符合.

图5~6示意在静磁场及与自旋有关的磁场条件下黑洞自旋 j 与喷流能量 Q_{jet} 之间的相关性较低, 表明自旋 j 与喷流能量 Q_{jet} 之间的相关性会受到磁场条件的影响. 结果支持Blandford等^[4]关于喷流能量来源于自旋能量的观点. 但其数据的分布特性说明黑洞自旋效应产生的其他能量也可能对喷流产生影响.

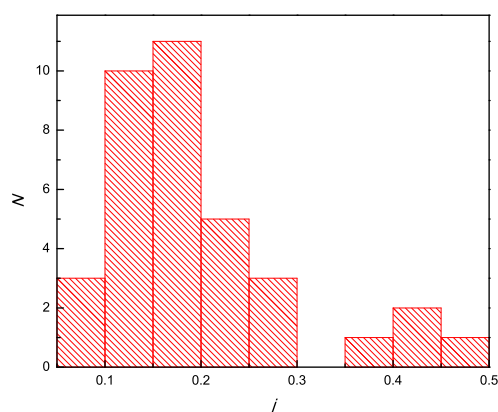


图 2 陡谱射电类星体(SSRQs)的自旋数据分布

Fig. 2 The distribution of SSRQs' spin data

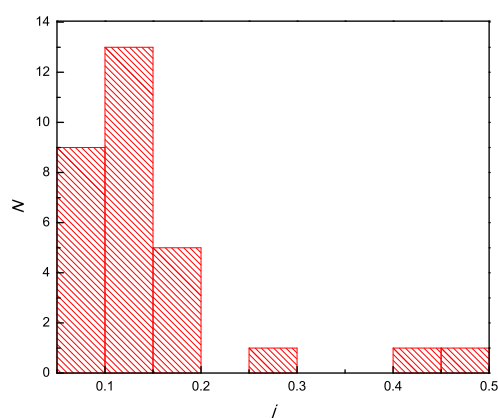


图 3 平谱射电类星体(FSRQs)的自旋数据分布

Fig. 3 The distribution of FSRQs' spin data

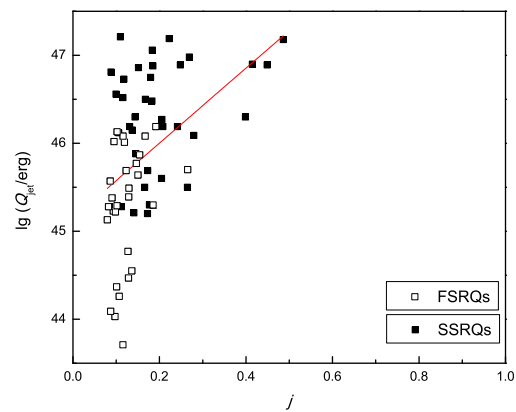


图 4 黑洞自旋 j 与 Q_{jet} 的相关性 ($B = B_{\text{EDD}}$)

Fig. 4 Relation between the jet power Q_{jet} and the black hole spin j when the Eddington magnetic field strength is considered

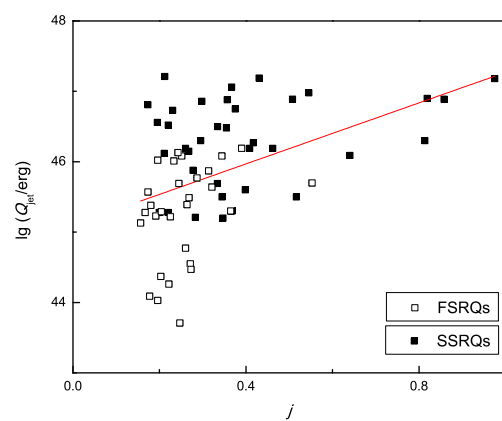


图 5 黑洞自旋 j 与 Q_{jet} 的相关性 ($B_4 = 1$)

Fig. 5 Relation between the jet power Q_{jet} and the black hole spin j when the constant magnetic field strength is considered

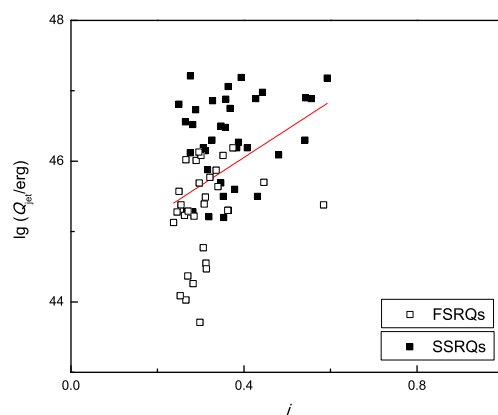


图 6 黑洞自旋 j 与 Q_{jet} 的相关性($B \propto j$)

Fig. 6 Relation between the jet power Q_{jet} and the black hole spin j when the magnetic field strength is proportional to the black hole spin

黑洞质量及黑洞自旋与喷流能量都呈现出了一定的相关性, 在爱丁顿磁场条件下自旋与喷流能量的相关系数较高, 而在静磁场和与自旋相关的磁场条件下质量与喷流能量的相关系数较高. 具体相关性数据见表2(R 为相关系数).

表2 不同磁场条件下黑洞质量、自旋与喷流能量的相关性数据

Table 2 The correlation among the black hole mass, spin, and jet power

X	Y	R	Intercept	Slope	B
M	$\lg Q_{\text{jet}}$	0.43893	39.10767 ± 1.70508	0.7448 ± 0.19058	-
j	$\lg Q_{\text{jet}}$	0.46182	45.087 ± 0.2001	4.46197 ± 1.07121	$B = B_{\text{EDD}}$
j	$\lg Q_{\text{jet}}$	0.42829	45.03965 ± 0.22569	2.3942 ± 0.64154	$B_4 = 1$
j	$\lg Q_{\text{jet}}$	0.40078	44.45651 ± 0.39807	3.991 ± 1.13162	$B \propto j$

5 结论

本文采集的平谱射电类星体(FSRQs)及陡谱射电类星体(SSRQs), 在一定程度上验证了黑洞自旋和喷流之间的关系, 但还是不能完全解释喷流能量来源于黑洞自旋的详细原理. 要进一步详细探讨黑洞自旋与喷流的相关性以及探讨自旋与喷流的具体关系, 就需要更多的观测数据来验证本文的研究结果. 通过研究结果, 我们确定黑洞自旋与喷流之间存在着相关性. 这个结果支持Narayan等^[6]所得出的结论, 同时也支持了喷流能量部分来源于自旋能量这一假说^[5], 但喷流与黑洞自旋的相关性不足以说明喷流的能量源就是自旋能量. 同时在不同的磁场条件下黑洞自旋与喷流能量的相关性存在较小的差异, 这也说明黑洞自旋对喷流的影响受到磁场条件的限制. 黑洞质量与喷流能量之间存在的相关性也说明除了自旋能量, 由黑洞质量效应产生的其他能量也可能对喷流产生影响. 有部分假说提出喷流能量也可能来源于吸积盘, 随黑洞自旋产生的吸积盘能量可能

对黑洞自旋与喷流能量的相关性产生影响, 这还需要进一步的验证. 至此我们可以推断黑洞的喷流能量的大小很可能是由黑洞质量、黑洞自旋及其他因素共同决定的.

致谢 本文中应用于计算黑洞自旋的178 MHz流量密度均源于NASA/IPAC河外星系数据库(NED). 在此我们非常感谢由美国国家航天航空局、美国加州科技研究所、喷流推进实验室联合运营的河外星系数据库(NED)所提供的帮助.

参 考 文 献

- [1] Zensus J A. ARA&A, 1997, 35: 607
- [2] Mirabel I F, Rodriguez L F. ARA&A, 1999, 37: 409
- [3] Penrose R. NCimR, 1969, 1: 252
- [4] Blandford R D, Znajek R L. MNRAS, 1977, 179: 433
- [5] Tchekhovskoy A, Narayan R, McKinney J C. MNRAS, 2011, 418: L79
- [6] Narayan R, Davis S W, McClintock J E. CQGra, 2011, 28: 114009
- [7] Fender R P, Gallo E, Russell D. MNRAS, 2010, 406: 1425
- [8] Daly R A. MNRAS, 2011, 414: 1253
- [9] Punsly B. ApJ, 2005, 623: L9
- [10] Daly R A, Sprinkle T B. MNRAS, 2014, 438: 3233
- [11] Tatum M M, Turner T J, Sim S A, et al. ApJ, 2012, 752: 94
- [12] Tchekhovskoy A, Narayan R, Jonathan C, et al. ApJ, 2010, 711: 50
- [13] Reynolds C S, Garofalo D, Begelman M C. ApJ, 2006, 651: 1023
- [14] Volonteri M, Sikora M, Lasota J P. ApJ, 2007, 667: 704
- [15] Walton D J, Nardini E, Fabian A C, et al. MNRAS, 2013, 428: 2901
- [16] Zoghbi A, Fabian A C, Uttley P, et al. MNRAS, 2010, 401: 2419
- [17] Reynolds C S. AmJPh, 2006, 38: 366
- [18] Daly R A. ApJL, 2009, 696: L32
- [19] Blandford R D, Payne D G. MNRAS, 1982, 199: 883
- [20] Reynolds C S, Garofalo D, Begelman M C. ApJ, 2006, 651: 1023
- [21] Daly R A. ApJ, 2009, 696: L72
- [22] Nahum A, Tom A B, Blandford R D, et al. MNRAS, 1997, 288: 1015
- [23] Meier D L. ApJ, 1999, 522: 753
- [24] Narayan R, McClintock J E, Tchekhovskoy A. GReGr, 2013, 1303: 3004
- [25] Rees M. ARA&A, 1984, 22: 471
- [26] Dermer C D, Finke J D, Menon G. Ap, 2008, 10: 9
- [27] Zubovas K, King A R. MNRAS, 2012, 426: 2751
- [28] Punsly B, Coroniti F V. ApJ, 1990, 350: 518
- [29] Daly R A, Guerra E J. ApJ, 2002, 624: 87
- [30] McClintock J E, Narayan R, Steiner J F. ApJ, 2013, 762: 104
- [31] Allen S W, Dunn R J H, Fabian A C, et al. MNRAS, 2006, 372: 21
- [32] Merloni A, Heinz S. MNRAS, 2007, 381: 589
- [33] 熊定荣, 张雄. 天文学报, 2012, 53: 369
- [34] Xiong D X, Zhang X. ChA&A, 2013, 37: 28
- [35] Ho L C. ApJ, 2002, 564: 120
- [36] Browne I, Murphy D. MNRAS, 1987, 226: 601
- [37] Brotherton M S, Wills B, Steidel C C. ApJ, 1994, 423: 131
- [38] Brotherton M S. ApJS, 1996, 102: 1
- [39] Wilkes B J. MNRAS, 1986, 218: 331

- [40] Wills B J, Browne I W A. ApJ, 1986, 302: 56
- [41] Corbin M R. ApJS, 1997, 113: 245
- [42] McIntosh D H, Rieke M J, Rix H W, et al. ApJ, 1999, 514: 40
- [43] Barthel P D, Vestergaard M L, Lonsdale C J. A&A, 2000, 354: 7
- [44] Corbin M R. ApJ, 1991, 375: 503
- [45] Neff S G, Hutchings J B, Gower A C. ApJ, 1989, 97: 1291
- [46] Gu M, Cao X W, Jiang D R. MNRAS, 2001, 327: 1111
- [47] Ulvestad J, Johnston K, Perley R, et al. AJ, 1981, 86: 1010
- [48] Akujor C, Luedke E, Browne I. ARA&A, 1994, 105: 247
- [49] Lawrence C R, Zucker J R, Readhead A C S, et al. ApJS, 1996, 107: 541
- [50] Murphy D W, Browne I W, Perley R A. MNRAS, 1993, 264: 298
- [51] Cao X, Jiang D. MNRAS, 2001, 320: 347
- [52] Marziani P, Sulentic J W, Calvani M, et al. ApJS, 1996, 104: 37
- [53] Wills B J, Browne I W A. ApJ, 1986, 302: 56
- [54] Hintzen P, Ulvestad J, Owen F. ApJ, 1983, 88: 709
- [55] Garrington S T, Conway R G, Leahy J P. MNRAS, 1991, 250: 171
- [56] Saikia D J, Junor W, Cornwell T J, et al. MNRAS, 1990, 245: 408
- [57] Punsly B. AJ, 1995, 109: 1555
- [58] Saikia D J, Jeyakumar S, Salter C J, et al. MNRAS, 2001, 321: 37

The Correlations of Jet Power with Black Hole Mass and Spin in Radio Loud Quasars

ZHANG Xu ZHANG Hao-jing ZHANG Xiong

(School of Physics and Electronic Engineering, Yunnan Normal University, Kunming 650011)

ABSTRACT Supermassive black holes are described by their mass and spin. It is very important to do the correlation analysis among black hole mass, spin, and jet power. We collect 65 radio loud quasar sources. The sample includes 35 Steep Spectrum Radio Quasars (SSRQs) and 30 Flat Spectrum Radio Quasars (FSRQs) with redshifts ranging from about zero to two. We present the correlation analysis of jet power with black hole mass and spin, under three assumptions of the magnetic field strength. Our conclusions are as follows: (1) The black hole mass has strong correlation with jet power; (2) The black hole spin also has strong correlation with jet power especially when the magnetic field strength $B = B_{\text{EDD}}$, where B_{EDD} is the Eddington magnetic field strength; (3) There are a few differences between the distributions of the black hole spin for SSRQs and FSRQs; (4) The results suggest that the black hole jet may get the energy from spin energy, which is consistent with previous results.

Key words black hole physics, galaxies: active, galaxies: nuclei, galaxies: jets