

搜寻kpc尺度的低红移双活动星系核*

向 成 吴江华[†] 陈启航 荆 亮

(北京师范大学物理与天文学院 北京 100875)

摘要 双活动星系核的研究对于理解星系和超大质量黑洞的形成、生长与演化至关重要. 然而, 目前已证认的双活动星系核数量仍较少, 这限制了对星系并合、双超大质量黑洞生长的预测以及低频引力波的探测. 基于百万类星体表, 证认了187例新的双活动星系核, 4例三重活动星系核以及1例四重活动星系核. 这些多重系统的红移均小于0.5, 每个系统中成员之间的投影物理距离(r_p)不超过100 kpc, 视向速度差(Δv)小于600 km/s. 这一样本补充了现有的低红移双活动星系核样本, 对活动星系核形成以及双超大质量黑洞演化机制的研究有一定帮助. 对上述样本的光学与红外图像进行目视检查, 结果显示约24%的双活动星系核呈现出明显的潮汐特征. 对红移、投影距离及视向速度差的统计分析表明, 双活动星系核的数量随红移的降低呈增加趋势, 而视向速度差则主要分布在 $\Delta v < 400$ km/s; 潮汐样本数量在较大投影距离处较少, 在(60–65) h_{70}^{-1} kpc区间内仅有1例, 其中无量纲哈勃常数 $h_{70} = H_0/70$ km · s⁻¹ · Mpc⁻¹. 随着投影距离减小, 潮汐样本数量呈增加趋势, 并在(10–15) h_{70}^{-1} kpc区间内达到峰值(10例), 随后逐渐减少.

关键词 星系: 活动, 星系: 相互作用, 星系: 核, 星系: 普通

中图分类号: P158; **文献标识码**: A

1 引言

星系相互作用和并合长期以来被认为是塑造星系结构和形态的主要过程^[1–5]. 这一过程通常会导致双重甚至多重星系核、不规则星系形态、气体桥或环以及潮汐尾等结构的出现. 相互作用会导致星系内部气体损失角动量并向星系中心迁移^[6–8]. 这往往会触发超大质量黑洞(Super Mass Black Hole, SMBH)的吸积, 从而导致活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)的形成. 若气体在自引力作用下坍缩并输运至中心SMBH附近, 则可为AGN提供燃料; 反之, 若气体未能抵达SMBH, 则可能触发星暴活动^[7]. 因此, 研究星系并合诱导

的AGN, 对研究恒星形成活动, SMBH生长和星系形成与演化等具有重要意义^[9–12].

在星系层级结构演化理论框架下, 双SMBH的出现是星系并合的必然结果^[9–10, 13]. 星系并合过程中双SMBH可能同时吸积, 导致双AGN (dual AGN, 成员间距小于100 kpc)^[11, 14–15]的触发. 然而, 准确预测双AGN何时被触发仍充满挑战性^[16–21]. 双AGN的发生率可以约束涉及星系并合率和潮汐触发AGN活动的模型^[22], 其宿主星系的特性能揭示触发双AGN同时激活所需的内外部条件. 星系并合过程中, 双AGN通过动力学摩擦形成束缚双核(binary AGN)^[15], 并最终导致双SMBH并合^[9]. 在并合晚期预计会产生低频引力波, 对其探测将

2025-03-21收到原稿, 2025-04-27收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12333001)资助

[†]jhwu@bnu.edu.cn

直接检验广义相对论并揭示早期宇宙SMBH的统计特性^[23-25].

近年来,以光学光谱方法为主的研究利用斯隆数字化巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)对双AGN进行了搜寻与证认^[11, 26-27],显著增大了双AGN样本.此外,利用光学光谱结合不同波段高分辨率成像的方法^[27-30]以及X射线^[14, 31-37]方法也发现了几十个双AGN.一些工作还利用“双峰法”(double peak)^[38-40]发现了一些双AGN及其高可信度候选体.然而,双峰法在双AGN的证认方面存在较高的误判率,使得该方法证认效率很低.例如孤立AGN的吸积不对称性^[41]、喷流进动^[42]等,都可能导致发射线出现双峰结构.

在低红移双AGN的搜寻方面,最有代表性的工作之一是Liu等^[11]在2011年通过搜寻SDSS DR7中具有特定发射线特征的AGN,并目视检查其光学图像,发布了一个包含1286例双AGN及其候选体的样本,其中约30%的样本被认为有明显的相互作用潮汐特征(气体桥、潮汐尾、气体环等).而在此之前,kpc级双AGN的样本规模仍然很小^[14, 31, 36-37, 43-45],且缺乏系统性统计研究.最近,Pfeifle等人于2024年发布了一个双AGN星表(The Big Multi-AGN Catalog DR1)^[46],该星表收录了1970—2020年间有文献记载的156个已证认的双AGN及4180个候选体.可见,双AGN的样本依然比较匮乏.目前最新的第8.0版百万类星体星表(Million Quasar Catalog, MQC)已收录1021800个类星体及其候选体,其中有103216个AGN及其候选体红移在0.5以下^[47],为低红移双AGN的研究提供了丰富的样本.

本文基于目前最新的类星体星表MQC,对红移范围 $z < 0.5$ 内的多AGN系统进行了系统性搜寻,旨在证认新的低红移多重AGN系统.通过研究双AGN的统计特性来理解星系并合过程及其对星系演化的影响.第2节介绍数据与选源方法;第3节对样本进行初步的统计和潮汐特征分析;第4节对本文的研究结果做讨论和总结.本文全篇采用 Λ CDM(Λ -冷暗物质)宇宙学模型,其参数设定为:物质密度参数 $\Omega_m = 0.3$,暗能量密度参数 $\Omega_\Lambda = 0.7$ 以及哈勃常数 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$,其中投影物理距离(r_p)的单位使用 h_{70}^{-1} 归一化,对应

$$h_{70} = H_0 / 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}.$$

2 数据和选源

2.1 数据

本文的初始样本为第8.0版的MQC星表,该星表包含907144个I型类星体(Quasar)与活动星系核(AGN)以及66026个通过射电/X射线关联(包含双射电瓣结构)且置信度达99%的类星体候选体.若计入耀变体(Blazar)与II型天体,AGN总数达1021800个^[47].相较于以往关于双AGN的统计研究^[11, 14, 48-49],本工作的初始样本规模提升了几个数量级.在MQC星表中,被分类为Q(Quasi-Stellar Object, QSO,宽线核主导的类星体),A(AGN,宽线Seyfert型/宿主星系主导的AGN),K(窄线QSO)以及N(窄线Seyfert型AGN)的天体,其红移均为光谱红移;而对于B类(BL Lac型)天体,红移信息不是必需项,因此其红移可能缺失或为测光红移,其值通常会精确到0.1.我们样本里的源都有红移,且均为光谱红移^[47].

光学成像数据源自暗能量光谱仪遗产巡天(Dark Energy Spectroscopic Instrument Legacy Survey, DESI-LS),该巡天项目通过光学与红外成像观测,构建了全天区深度图谱,其数据可用于星系在光学波段的形态学分析,尤其是在识别星系合并系统中的一些典型结构特征(如潮汐尾、气体桥等)方面有巨大优势.相较于SDSS与全景巡天望远镜和快速反应系统(Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System, Pan-STARRS),DESI-LS在探测深度(r波段极限星等达24.5等)与天区覆盖率(33000 deg²)方面具有显著优势,为星系、恒星以及AGN等天体的证认提供了更完备的光度信息基础^[50].

红外图像数据源自两微米全天巡天(Two Micron All Sky Survey, 2MASS),这是一项系统性地在3个红外波段(J、H和K_s波段),使用两台地基望远镜对整个天空进行测绘的巡天项目.在红外波段,J-K_s颜色图(其中J和K_s分别表示J波段与K_s波段的星等)在证认和研究星系相互作用及潮汐特征方面尤为有用,因为它能够揭示在光学

波段中可能难以观测到的细节. 为了获得这些颜色图, 我们遵循了以下步骤: (1)数据获取: 我们下载了每一对样本在J波段和 K_s 波段下的图像, 并确保图像的尺寸一致. 每个图像的像素(pixel)大小约为 $1'' \times 1''$. (2)计算颜色图: 计算每个像素的 $J - K_s$ 星等差值, 从而得到该源的红外波段 $J - K_s$ 颜色图.

2.2 选源

本研究的双AGN样本筛选遵循3项判据: (1)红移均满足 $z < 0.5$; (2)每个源之间的投影距离 $r_p < 100 h_{70}^{-1}$ kpc; (3)视向速度差 $\Delta v < 600$ km/s. 后两个筛选标准分别由Liu等^[11]、Silverman等人于2011年提出^[51], 与近期Pfeifle等人提出的选择条件也相似^[46]. 其中, $100 h_{70}^{-1}$ kpc的投影距离阈值略高于典型星系对的研究的标准^[11, 52-54], 但与星系对的速度弥散在投影距离为 $150 h_{70}^{-1}$ kpc $\leq r_p \leq 5000 h_{70}^{-1}$ kpc区间的下限值相当^[55].

首先, 我们利用判据(1)从MQC中选出了

103216个红移低于0.5的AGN, 作为输入样本. 然后根据它们的红移和判据(2)所设置的投影距离阈值, 计算了这些红移处 $100 h_{70}^{-1}$ kpc对应的角距. 紧接着使用星表交叉工具TOPCAT^[56]将输入样本进行自匹配, 匹配半径为上述角距的最大值. 得到了自匹配结果之后, 再利用判据(2), 筛选出了满足条件的样本. 利用Hogg提出的公式以及这些样本的红移计算了每一对AGN之间的径向速度差 Δv ^[57]. 最终使用判据(3)提取出了319个双AGN样本. 在这些样本中, 还存在部分已被证认的双AGN系统, 因此我们将目前规模较大和样本较全的几个双AGN星表^[11, 14, 46, 48, 58]与我们的样本进行交叉, 剔除了已证认的双AGN. 进一步地, 我们借助DESI-LS光学图像以及2MASS红外 $J - K_s$ 颜色图, 对样本进行目视检查, 发现了5个多重系统, 并排除了6个假的双系统. 最终样本包含192个系统(187个双AGN、4个三重系统、1个四重系统). 部分样本的相关数据列于表1.

表 1 本文的部分双AGN星表
Table 1 Partial catalog of dual AGNs in this work

Obj. Name	RA (J2000d)	Dec (J2000d)	z	$\Delta\theta/''$	r_p/h_{70}^{-1} kpc	$\Delta v/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	r/mag	Class	F_{tidal}
J0018-0045A	4.51177	-0.75948	0.0636	48.79	59.74	98.96	17.18	N	N
J0018-0045B	4.51300	-0.74598	0.0640				17.10	A	
J0024+0815A	6.22911	8.25436	0.3992	5.37	28.83	35.38	19.21	QX	N
J0024+0815B	6.23039	8.25516	0.3990				19.01	A	
J0033-4436A	8.48863	-44.61373	0.2310	15.95	58.81	487.01	18.19	NR	N
J0033-4436B	8.48629	-44.61784	0.2330				18.77	N	
J0034-4318A	8.61417	-43.31656	0.3951	16.22	86.52	324.53	17.28	NX	N
J0034-4318B	8.62034	-43.31618	0.3966				19.77	A	
J0034-4330A	8.67242	-43.51141	0.2790	14.09	59.63	0.00	17.86	N	N
J0034-4330B	8.67550	-43.51462	0.2790				18.73	N	
J0046+0007A	11.62837	0.11885	0.0534	54.78	56.96	224.90	21.90	N	N
J0046+0007B	11.62019	0.10601	0.0542				14.89	N	
J0100+3112A	15.19987	31.20017	0.0511	62.32	62.06	40.53	14.19	NR	N
J0100+3112B	15.21867	31.19378	0.0510				14.66	ARX	
J0103+0029A	15.81653	0.48763	0.2021	2.94	9.77	110.79	20.19	N	T
J0103+0029B	15.81621	0.48838	0.2025				17.89	N	

表1 续
Table 1 Continued

Obj. Name	RA (J2000d)	Dec (J2000d)	z	$\Delta\theta/''$	$r_p/h_{70}^{-1}\text{kpc}$	$\Delta v/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	r/mag	Class	F_{tidal}
J0107-1730A	16.94818	-17.50697	0.0203	193.05	79.56	305.51	10.10	AX	N
J0107-1730B	16.90280	-17.53864	0.0214				10.15	ARX	
J0113-1450A	18.45865	-14.84566	0.0520	13.15	13.34	569.80	10.09	ARX	T
J0113-1450B	18.45771	-14.84919	0.0540				14.03	N	
J0114-5523A	18.59292	-55.39700	0.0120	22.42	5.51	58.16	8.41	N	T
J0114-5523B	18.60388	-55.39705	0.0122				12.67	NRX	
J0120-0829A	20.19541	-8.49063	0.0340	18.36	12.45	110.23	13.15	N	T
J0120-0829B	20.20007	-8.48844	0.0344				12.53	NRX	
J0120-4407A	20.04901	-44.13282	0.0221	86.65	38.79	372.89	10.25	NX	N
J0120-4407B	20.08202	-44.12858	0.0234				6.70	ARX	

2.3 具有潮汐特征的双AGN

为了探索那些明确经历强潮汐相互作用的双AGN, 我们从样本中筛选出这样的子样本, 获得了“潮汐”样本. 该选择基于对DESI-LS图像(使用DR9的grz波段或DR10的grzi波段)以及红外 $J-K_s$ 颜色图的目视检查, 主要识别具有气体桥(尾、壳或环)等潮汐特征的源.

采用目视检查的理由主要有3方面: (1)对低表面亮度(Low Surface Brightness, LSB)特征的高敏感性: 目视检查对于低表面亮度的特征(例如气体桥、尾、壳或环)更为敏感. 这些特征通常是判定潮汐相互作用的关键, 但自动化技术检测方法对这类细微结构的识别较为困难. (2)误报率较低: 与诸如模型拟合等自动化技术相比, 目视检查不易产生误报, 从而有效降低将噪声等虚假或难以捕捉的特征错误判为真实潮汐相互作用的风险. (3)避免阶段性偏见: 尽管Conselice^[59]和Lotz等^[60-61]提出的定量并合指标更为客观且可重复, 但此类方法可能对特定的合并阶段(如首次近心经过或最终合并)存在选择性偏好, 易引入偏见. 目视检查在评估整个合并过程中的潮汐特征时更为灵活和全面, 有助于减轻这种偏见^[11]. 为减少主观性带来的不确定性, 3位团队成员分别对每个系统进行了3轮独立目视检查, 且在检查过程中不知晓他人的证认结果. 结果显示, 在98%的样本中, 判定结果

均一致; 对于分类不一致的系统, 采用多数决策(即至少有两位成员判定一致)的判定. 最终, 我们通过光学图像证认了41例具有明确潮汐特征的双AGN. 图1展示了DESI-LS grz (i)波段合成图像中呈现显著潮汐特征的双AGN.

与可见光相比, 红外辐射具有更强的穿透尘埃的能力, 因此可以用于研究那些被尘埃遮蔽的区域. 当两个星系发生并合时, 其红外图像有时能够揭示在光学图像中可能被遗漏的潮汐特征. 在图2中, 我们展示了8个双AGN系统, 这些系统在红外 $J-K_s$ 颜色图中能清晰看到有相互作用的迹象. 其中, J0917+5416在光学图像中未呈现明显的潮汐特征, 但其红外波段的 $J-K_s$ 颜色图显示出明显的形态扭曲以及连接两个AGN之间的气体桥, 这是相互作用的迹象. 其他7个系统表现出类似特征, 但在多数红外 $J-K_s$ 颜色图中, 目视检查的效果并不理想. 仅能观察到两个AGN之间的蓝色连接区域, 这可能是由于相互作用触发的活动恒星形成, 形成了蓝色的气体桥或环. 但是由于成像深度限制, 大多数AGN核心在成像中并未被探测到. 所以两个核之间的蓝色“桥”可能是投影效应(只是看到两个核的蓝色辐射在视线方向上重叠, 而不一定是真正的气体桥), 而非真正的物理连接. 这类特征可作为星系间相互作用的支持型证据, 仍需深度更深的红外图像予以验证.

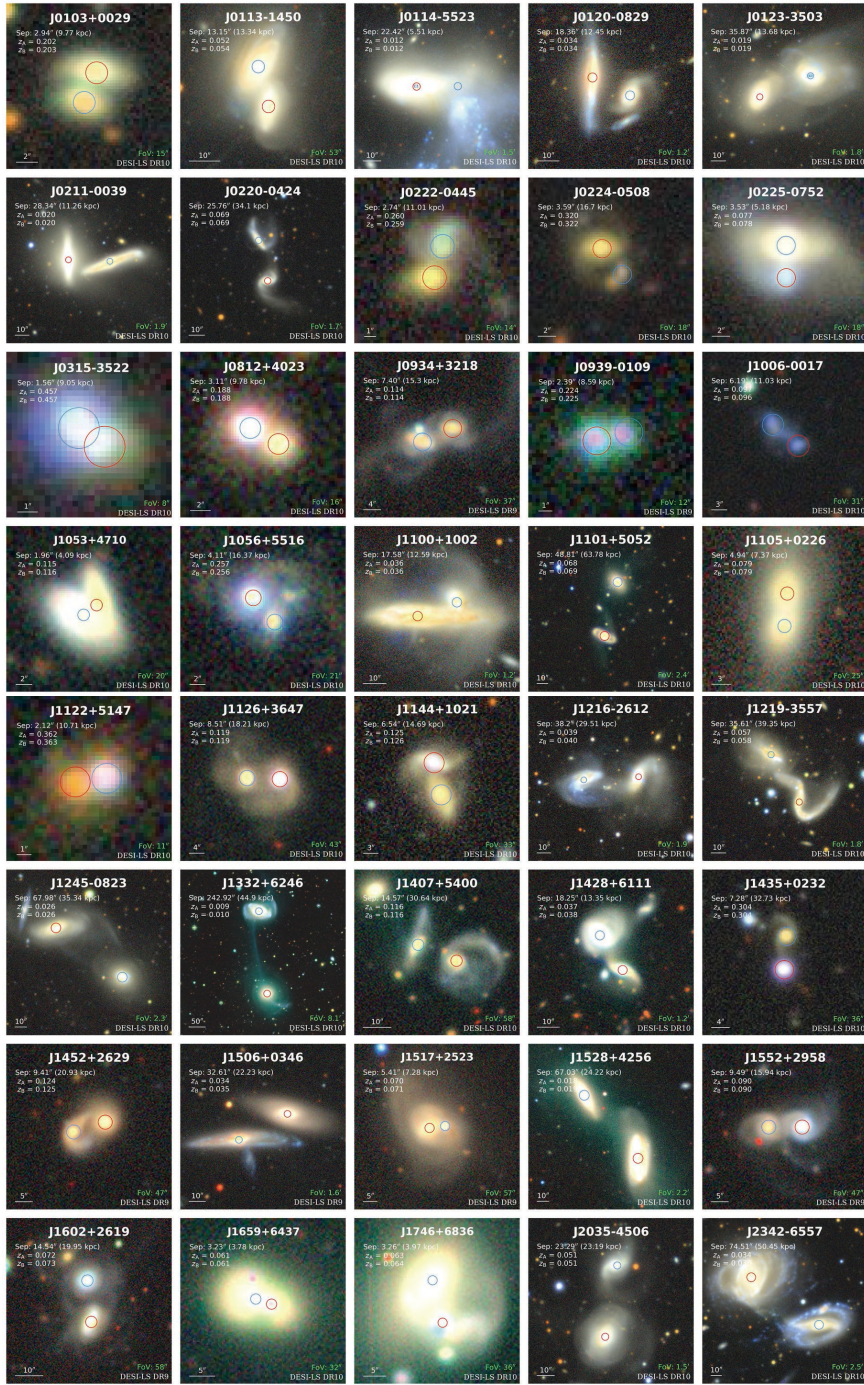


图 1 双AGN样本中具有明显潮汐特征的源的DESI-LS grz (i)波段合成图像。红色和蓝色圆圈标示了AGN的位置。图像中上方为北，左方为东。每幅图像的视场(FOV)标注在右下角。此外，图中还提供了每对AGN的红移(z_A, z_B)，投影距离 r_p 及其角距 $\Delta\theta$ (Sep)。

Fig. 1 DESI-LS grz (i)-band images of sources in the dual AGN sample with clear tidal features. Red and blue circles indicate the locations of AGNs. North is up and east is to the left. The field of view (FOV) of each image is labeled at the bottom right corner. Additionally, the redshift (z_A, z_B), projected distance r_p , and angular separation $\Delta\theta$ (Sep) of each dual AGN are provided.

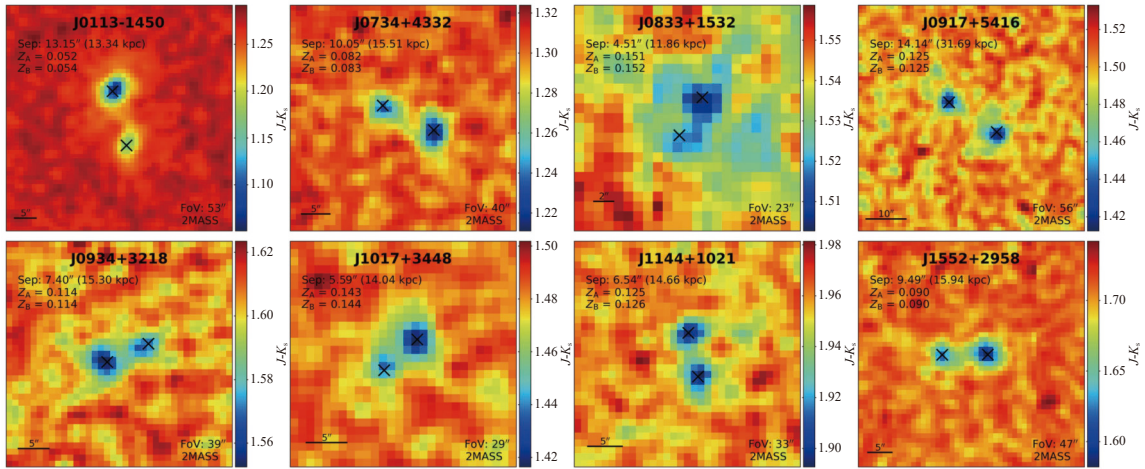


图 2 一些双AGN系统中具有相互作用的源的红外 $J - K_s$ 颜色图的示例. 黑色十字标示了AGN的位置. 图像中上方为北, 左方为东.

Fig. 2 Examples of infrared $J - K_s$ color maps are shown for interacting sources of dual AGN systems. The positions of the AGNs are marked with black crosses. North is up and east is to the left.

最终, 共有45对(约占24%)双AGN被确认在光学图像或红外 $J - K_s$ 颜色图中呈现潮汐特征. 相比之下, Liu等^[11]通过目视检查SDSS图像发现, 其1286对样本中约有30%具有潮汐特征, 略高于本文的结果. 我们为每对样本做了标记: “T” (存在潮汐特征)或“N” (无潮汐特征), 如表1所示. 需要注意的是, 潮汐样本可能未包括尚处于首次近心点通过之前的早期合并阶段的源, 因为此类合并通常缺乏可观测的潮汐特征^[2]. 此外, 潮汐特征的强度还受宿主星系性质及合并轨道参数的影响(例如, 富含气体的主并合在顺行轨道上可能很容易产生强烈的潮汐特征, 但其他类型的并合可能会缺乏此类特征)^[6-7, 62]. 具体而言, 这些可能缺乏明显潮汐特征的并合类型包括: 质量比超过约30的次要并合^[63]、高核球-盘比特征的球状并合^[64]以及发生在高度逆行轨道上的并合^[2].

3 样本分析和讨论

本文通过对MQC进行自匹配并结合系统搜寻和分析, 在低红移($z < 0.5$)范围内发现了192个新的多重AGN系统, 其中包括187个双AGN、4个三重AGN和1个四重AGN, 这些系统的投影距离均满足 $r_p < 100 h_{70}^{-1}$ kpc, 径向速度差满足 $\Delta v < 600$ km/s. 需要注意的是, 对于三重及以上的系统而言, 它们两两之间的投影距离并不完全满足

$r_p < 100 h_{70}^{-1}$ kpc. 例如一个包含A、B、C 3个AGN的三重系统, 在选源过程中A与B、B与C之间的投影距离满足选源条件, 但A与C之间不满足. 即便如此, 我们仍然认为其属于三重系统.

3.1 样本的不均匀性

MQC是一个汇集了多个不同巡天结果的非均质AGN星表, 在目标选择标准、光谱质量和数据完整性等方面存在差异, 这可能会影响我们的统计分析. 由于MQC样本的异质性, 本文的多重AGN样本可能会受到不同巡天数据深度和AGN选择方法(例如基于光谱、X射线或光变的选取)的影响. 因此, 我们的多重AGN系统的统计结果可能存在一定的系统性偏差, 特别是在低亮度AGN上.

在MQC中, 每个天体被标注为相应的分类代码, 以反映其物理性质及多波段探测情况. 基础分类包括: Q、A、B、K以及N. 此外, 后缀字母R (射电)、X (X射线)以及2 (双射电波瓣)则表示该天体在相应波段有观测. 为了统一分类并简化统计分析, 本文采用以下归类策略: (1) “Q”标记的天体(如Q、QR、QRX、QX等)统一归入QSO类(类星体); (2) “A”标记的天体(如A、AR、AX、ARX、AR2、AR2X等)统一归入AGN类(宽线Seyfert型AGN); (3) “BR”、“BRX”标记的宽线射电亮源统一归为radio-loud AGN / (Flat-Spectrum Radio Quasar, FSRQ), 不将其归入BL Lac

类; (4) “B”、“B2”标记的天体归为BL Lac类(在MQC中特指典型BL Lac天体); (5) “K”、“KX”将标记天体归类为窄线类星体类(Narrow-Line Quasar, NLQSO), “N”、“NR”、“NRX”、“NX”或“NR2”标记的天体归为NLAGN类(窄线Seyfert型/宿主星系主导的AGN). 需要说明的是, MQC中的复合标注(如ARX、QRX等)主要用于指示该天体的多波段观测信息(射电/X射线/双射电波瓣等), 并不改变其物理分类本质^[47]. 因此, 除非特别说明, 本文所有天体均按照其基础类别(QSO、AGN、NLAGN、BL Lac)进行归类和分析.

图3展示了本文双AGN样本中不同天体类型的红移分布情况. 结果表明, NLAGN和AGN类天体在样本中占据主导地位, 分别占总数的55.1%和34.8%. 相比之下, QSO、BL Lac以及强射电AGN/FSRQ的数量较少, 总计仅约占10%. 这一分布特征说明, 在MQC的低红移双AGN系统中, 主要是窄线AGN和Seyfert型宽线AGN这类低光度星系, 而QSO、FSRQ和BL Lac则相对罕见.

3.2 双AGN的统计和分析

我们的样本共包含来自192个多重AGN系统的390个AGN. 表2详细给出了双AGN样本中, 不同类型组合的统计情况. 统计结果显示, AGN/NLAGN组合(35.3%)和NLAGN/NLAGN组合(34.8%)在样本中占主导地位, 这表明窄线AGN在低红移的双AGN系统中占有较大的比例. 这一趋势与Liu等人的研究结果(窄线AGN占比高达96%)总体一致^[11]. 此外, 由宽线Seyfert型AGN组成的AGN/AGN组合也占有一定比例(15.0%). 相比之下, 类星体组合(例如QSO/QSO为2.1%、AGN/QSO为3.2%、NLAGN/QSO为1.6%)则相对较少, 这可能反映出低红移双类星体的稀缺性. 另外, 含有BL Lac与

NLQSO类型的组合非常稀少, 每种组合仅占样本的1%–3%. 需注意的是, 样本中AGN类型组合的分布特征可能在一定程度上受限于MQC母样本本身的不均匀性及选择效应.

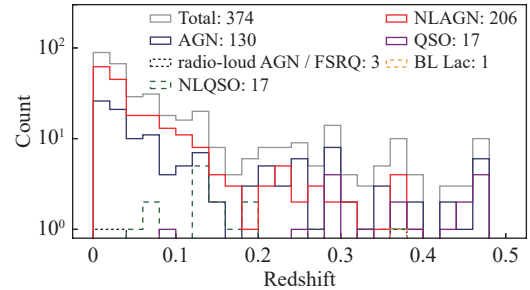


图3 双AGN样本中各个类型源的红移分布

Fig. 3 Redshift distribution for different classes of sources in the dual AGN sample

图4展示了这些双AGN的投影距离与红移的分布情况. 图中显示, 随着红移的降低, 双AGN的数量逐渐增加, 其中潮汐样本主要集中在 $z < 0.14$ 范围内, 峰值在 $0.06 < z < 0.14$ 内, 红移 $0.14 < z < 0.5$ 范围内数量较少且大致均匀分布. 双AGN的红移分布在低红移区域表现出明显集中, 这一趋势可能与母样本MQC星表的选择效应有关. 因此, 在解释这些结果时需要考虑这一潜在的系统性偏差. 具体而言, 我们发现48例双AGN的红移大于0.16, 约占整个样本的26%. 相比之下, Liu等^[11]的样本中这一比例仅为1.9%, 这说明我们的样本在较高红移的覆盖率上有所增强. 然而, 需要注意的是, 正如上一节所讨论的MQC星表存在不均匀性, 因此尽管样本相较于先前的研究在更高红移处包含了显著数量的双AGN, 这并不意味着我们的样本在统计上是完备的.

表2 双AGN样本的分类组合统计

Table 2 Statistical analysis of classification combinations in the dual AGN sample

Combination	Count	Pct.	Combination	Count	Pct.	Combination	Count	Pct.
AGN / AGN	28	15.0%	AGN / NLAGN	66	35.3%	NLQSO / AGN	2	1.1%
BL Lac / BL Lac	1	0.5%	AGN / QSO	6	3.2%	NLQSO / NLAGN	5	2.7%
NLQSO / NLQSO	5	2.7%	BL Lac / NLAGN	2	1.1%	NLAGN / QSO	3	1.6%
NLAGN / NLAGN	65	34.8%	QSO / QSO	4	2.1%			

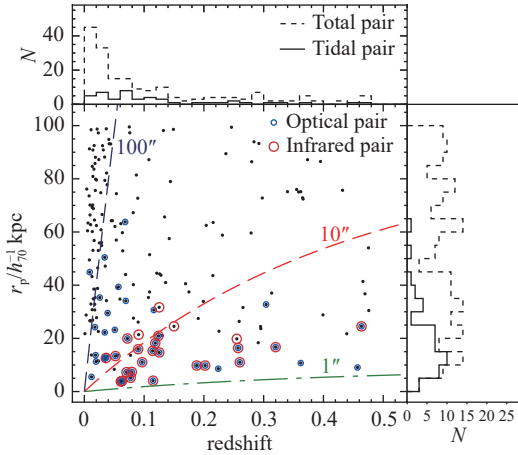


图 4 双AGN样本的投影距离(r_p)与红移的关系图. 黑色圆点表示所有双AGN, 而蓝色和红色空心圆分别代表在光学图像和红外 $J-K_s$ 颜色图中识别出的形态上具有明显潮汐特征的双AGN. 虚线直方图表示所有双AGN的分布, 而实线直方图展示了潮汐样本的分布. 绿色、红色和深蓝色点线分别对应角距为 $1''$ 、 $10''$ 、 $100''$.

Fig. 4 Projected distance (r_p) vs. redshift for our dual AGNs. Black dots represent all dual AGNs, while blue and red open circles denote dual AGNs with identified morphological tidal features from optical images and infrared $J-K_s$ color maps, respectively. The dotted histograms represent the distributions of all dual AGNs, while the solid histograms show the distributions of the tidal sample. The green, red, and darkblue dotted curves denote to angular separations of $1''$, $10''$, $100''$.

在 $0 \leq r_p \leq 100 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 的投影距离范围内, 双AGN样本整体上呈现随投影距离减小而微弱增加的趋势, 另外在少数区间分布较少, 如 $40 h_{70}^{-1} \text{ kpc} \leq r_p \leq 50 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$, 这可能是由于整体样本的不均匀性造成的; 还有 $0 \leq r_p \leq 15 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$, 这可能是巡天样本的角分辨率的限制造成该区间样本数量不足. 而潮汐样本只分布在 $0 \leq r_p \leq 65 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 范围内, 且在较大投影距离处较少, 在 $(60-65) h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 区间内仅有1例. 随着投影距离减小, 潮汐样本的数量呈显著增加趋势, 并在 $10 h_{70}^{-1} \text{ kpc} \leq r_p \leq 15 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 区间内达到峰值(10例). 这一趋势表明, 星系间较大的物理分离距离可能不利于潮汐扰动的形成或维持. 首先, 处于较大分离距离的双AGN可能仍处于并合的早期阶段, 此时尚未产生明显的潮汐扰动. 其次, 它们可能已经历过一次近距离接触, 但由于轨道或质量配置的原因未能形成可观的潮汐结构. 此外, 也可能是这些星系

在经过近心点后逐渐远离, 先前产生的潮汐特征已逐渐消失.

此外, 对于投影距离较小的情况, 例如本文双AGN样本中有3例系统的成员间 $r_p < 5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$. 其中J1659+6437和J1053+4710的红移信息均来自SDSS, 而J1746+6836中的两个源则来自Swift Burst Alert Telescope AGN Spectroscopic Survey (BASS DR2). 这3个系统的成员之间的角距分别为 $3.23''$ 、 $1.96''$ 和 $3.26''$. 如图5所示, 在 $0 < z < 0.5$ 范围内, $r_p = 5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 对应的角距随红移的增大而减小. 在 $z \approx 0.09$ 时, 其角距约为 $3''$, 与SDSS的光纤直径相当, 因此J1659+6437和J1053+4710都可以被SDSS光纤分辨; 另外, BASS是通过狭缝拍摄光谱, 因此在视宁度允许的情况下, J1746+6836也可以被分辨. 当系统的红移较高时, 如果 $r_p = 5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$, 那么成员间角距将小于当前主流光谱巡天设备的光纤直径, 导致光纤无法分辨成两个独立源. 例如, 在 $z > 0.09$ 时, $r_p = 5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 尺度的双AGN系统角距将小于 $3''$, 此时SDSS光纤是无法分辨的. 这种分辨率的限制会影响我们对密近双核系统的批量证认, 造成较高红移下密近系统的遗漏, 此时就需要依赖狭缝光谱进行证认.

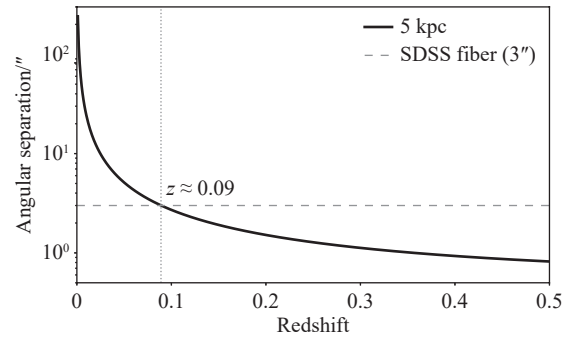


图 5 不同红移下投影距离为 $5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$ 对应的角距分布. 灰色虚线表示SDSS的光纤直径 $3''$.

Fig. 5 Angular separation as a function of redshift corresponding to a projected distance of $5 h_{70}^{-1} \text{ kpc}$. The gray dashed line indicates the SDSS fiber diameter of $3''$.

图6展示了双AGN的视向速度差(Δv)分布. $\Delta v > 400 \text{ km/s}$ 时, 总样本和潮汐样本的源的数量均不多(15例双AGN, 其中潮汐样本仅3例), 虽然总样本的数量有随 Δv 增大而增加的趋势, 但由于绝对数量较少, 所以不具有统计学意义. 当 $\Delta v <$

400 km/s时, 总样本和潮汐样本中源的数量均随 Δv 的减小而增加. 但与图4中相反的是, 整体样本相较于潮汐样本的增加趋势更为显著, 这可能是样本视向速度受到星系本动速度的影响造成的. 另一方面, 这也可能受到样本选择效应的影响: 具有较大速度差的双AGN更可能处于并合的早期阶段, 此时尚未形成明显的潮汐特征; 或者它们虽经历过近距离接触, 但由此产生的潮汐扰动已经消退, 很难被观测到. 此外, 不排除在视向速度差的测量中存在系统偏差. 例如, 观测限制(如光谱数据的灵敏度)可能导致高速度差的双AGN被低估.

图4还给出了我们样本中双AGN的角距分布情况. 从图中可以看出, 大多双AGN分布在 $100''$ 内, 特别是有潮汐特征的系统. 共有42个双AGN被我们发现, 其中有41对的角距满足 $\Delta\theta < 100''$, 而在较大的角距范围($\Delta\theta > 100''$)内, 仅有J1332+6246一个系统在光学图像中展现出明显的潮汐特征. 此外, 在角距小于 $10''$ 的双AGN样本中, 潮汐样本约占59%. 这可能表明, 潮汐特征更可能出现在较小角距范围内, 随着角距的增大, 潮汐作用的可见性或形成条件会受到限制.

3.3 多重AGN

图7展示了本样本中5个多重AGN系统在

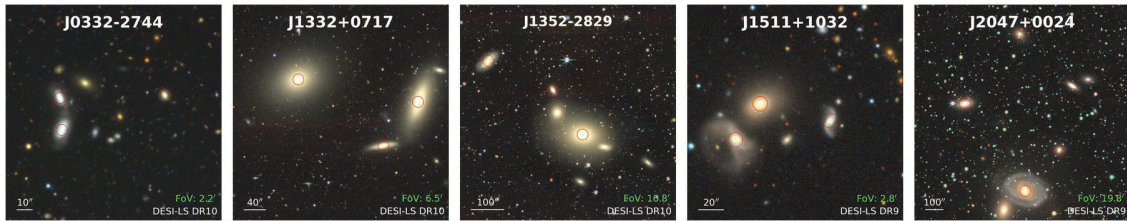


图 7 5个多重AGN的DESI-LS grz (i)波段图像, 包括4个三重体和1个四重体. 红色圆圈表示AGN的位置, 图像的上方为北, 左侧为东.

Fig. 7 DESI-LS grz (i)-band images of the five multiple AGNs in this sample, including four triplets and one quadruplet. Red circles indicate the locations of AGNs. North is up, and east is to the left.

3.4 双AGN及多重AGN的比例

本文通过对MQC中1021800个AGN进行系统搜寻, 在低红移($z < 0.5$)范围内发现了192个新的多重AGN系统, 其中包括187个双AGN、4个三重AGN和1个四重AGN. 其中, 双AGN在MQC中出

现比例约为0.04%, 三重和四重AGN的出现比例约为0.0016%. 相比之下, Liu等人利用红移范围为 $0.02 < z < 0.33$ 的138070个AGN作为母样本, 发现了1286个新的多重AGN系统, 包括1244个双AGN、39个三重AGN、2个四重AGN和1个五重

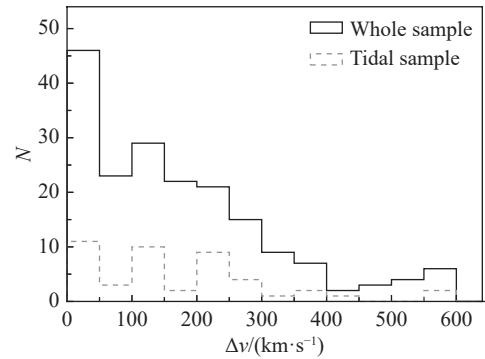


图 6 双AGN样本的视向速度差(Δv)分布. 黑色实线表示所有双AGN的分布, 而灰色虚线表示潮汐样本的分布.

Fig. 6 Distribution of LOS velocity difference Δv for dual AGNs. The black solid curve represents the distribution of all dual AGNs, while the gray dashed curve shows the tidal sample distribution.

现比例约为0.04%, 三重和四重AGN的出现比例约为0.0016%. 相比之下, Liu等人利用红移范围为 $0.02 < z < 0.33$ 的138070个AGN作为母样本, 发现了1286个新的多重AGN系统, 包括1244个双AGN、39个三重AGN、2个四重AGN和1个五重

AGN. 其样本中双AGN的出现比例约为1.8%, 多重AGN (≥ 3 核)系统的出现比例约为0.09%^[11].

本文样本在 $0.02 < z < 0.33$ 范围内包含123个双AGN、3个三重AGN和1个四重AGN. 若将Liu等人样本中的系统纳入统计, 则该红移范围内的双AGN数量增至189个, 三重AGN和四重AGN分别为5个与1个. 相应样本在MQC星表中的出

现比例列于表3. 由表可知, Liu等人的样本中多重AGN的出现比例显著高于MQC的结果. 这一差异可能主要源于MQC的不均匀性以及样本的构成不同, 在MQC红移 $z < 0.5$ 的样本中, NLAGN/NLQSO的占比约为46%, 而在Liu等人的样本中, 该比例高达约94%^[11].

表 3 双AGN及多重AGN的比例
Table 3 The fractions of dual and multiple AGN

Redshift	Sample	Dual AGN	Pct.	Mutiple AGN	Pct.
$0 < z < 0.5$	This work	187	0.04%	5	0.0016%
$0.02 < z < 0.33$	This work (exclude Liu et al. ^[11])	123	0.02%	4	0.0013%
	This work (include Liu et al. ^[11])	187	0.04%	6	0.0019%
$0.02 < z < 0.33$	Sample of Liu et al. ^[11]	1244	1.8%	42	0.09%

4 总结

本研究基于MQC星表 (Version 8, 2023) 系统地筛选了一组低红移 ($z < 0.5$) 的双AGN和多重AGN系统. 我们采用严格的选择标准, 包括: (1) 投影距离 $r_p < 100 h_{70}^{-1}$ kpc; (2) 视向速度差 $\Delta v < 600$ km/s. MQC星表综合了光学、射电和X射线数据, 用于证认QSO和AGN. AGN的筛选基于以下标准: (1) 光谱证认, 需要至少两条谱线, 或一条谱线结合其已有测光红移进行优化确定; (2) 射电/X射线数据的相关性, 部分QSO候选体基于射电或X射线数据推断的置信度达到99%; (3) 数据质量控制, 剔除低置信度天体以及在Gaia-EDR3中被标记为恒星的天体; (4) 去重处理, 确保每个数据条目仅对应一个唯一天体.

然而, 需要注意的是, 由于MQC星表基于不同观测手段与归档数据的汇集, 因此是一个非均质样本, 不同观测区域或红移区间的覆盖率可能存在系统性偏差. 尽管本文的双AGN样本具有较高的真实性, 但这种非均质性仍可能对结果产生一定影响. 最终, 我们证认了187个双AGN、3个AGN三重系统和1个AGN四重系统, 显著丰富了低红移双AGN的统计样本, 并为后续研究提供了宝贵的数据支撑. 在 $0.02 < z < 0.33$ 范围内, 本文

样本中双AGN与多重AGN在MQC中的出现比例明显低于Liu等人样本在其母样本中的比例^[11]. 这种差异可能源于MQC的不均匀性以及样本构成上的不同, 尤其是窄线AGN (NLAGN/NLQSO) 所占比例的差异, 即MQC中约为46%, 而Liu等人样本中高达94%^[11].

通过对DESI-LS光学图像和2MASS红外 $J-K_s$ 颜色图的目视检查, 我们发现约24%的双AGN表现出潮汐特征. 作为对比, Liu等人对SDSS图像进行目视检查后发现, 在其研究的1286个双AGN中, 约30%显示出形态上的潮汐特征, 比我们的结果略高^[11]. 考虑到DESI-LS成像深度优于SDSS, 本预期能够获得更高的潮汐特征检出率, 然而实际结果略低于预期. 这可能与MQC星表的选择效应有关, 即所筛选的双AGN或许更偏向于并合过程的早期阶段, 此时潮汐扰动尚不明显.

此外, 我们对这些双AGN样本的统计特性进行了分析. 统计结果显示, AGN/NLAGN组合 (35.3%) 和NLAGN/NLAGN组合 (34.8%) 在样本中占主导地位, 这表明窄线AGN在低红移的双AGN系统中占比较高, 这与Liu等人的结果 (窄线AGN占比96%) 总体一致^[11]. 双AGN样本在 (0–100)

h_{70}^{-1} kpc的投影距离范围内近似均匀分布, 并在(10–15) h_{70}^{-1} kpc处呈现明显峰值, 而在(45–50) h_{70}^{-1} kpc附近出现谷值. 潮汐样本在 $r_p \approx (10 - 15) h_{70}^{-1}$ kpc处表现出明显峰值, 在(15–20) h_{70}^{-1} kpc范围内达到10对后迅速下降, 到(60–65) h_{70}^{-1} kpc时仅剩1对, 超过65 h_{70}^{-1} kpc后完全缺失. 这种下降趋势可能与多种因素相关. 其中一些系统可能尚处于初次相遇之前的阶段, 此时尚未形成显著的潮汐扰动. 其次, 缓慢运动的星系相互作用可能曾引发形态扰动, 但这些特征已经逐渐消散或因表面亮度过低难以被探测. 此外, 部分系统可能在此前的近距离接触中并未产生显著形态变化, 这表明这些AGN活动可能并非由星系并合驱动, 而是偶然发生的.

双AGN的红移分布显示, 在 $z < 0.25$ 处存在显著的数量集中趋势. Chen等^[24]基于宇宙学模拟的预测表明, 双AGN的比例应随着红移增加而上升, 并在宇宙正午时期达到顶峰. 因此, 样本中红移集中现象很可能主要受到MQC星表选择效应的影响. 在视向速度差 Δv 方面, 双AGN的数量随 Δv 的增加而呈现下降趋势, 仅极少数系统接近600 km/s的上限. 具有潮汐特征的系统主要集中在 Δv 低于300 km/s的范围内. 这种趋势表明, 较大的视向速度差通常对应较大的物理分离度, 这种分离度不利于形成或保持明显的潮汐特征.

参考文献

- [1] Zwicky F. *ErNW*, 1956, 29: 344
- [2] Toomre A, Toomre J. *ApJ*, 1972, 178: 623
- [3] Khachikian E Y. *Observational Evidence of Activity in Galaxies*//Khachikian E E, Fricke K J, Melnick J. *Observational Evidence of Activity in Galaxies*. Dordrecht: Kluwer, 1987: 65–81
- [4] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74
- [5] Barnes J E, Hernquist L. *ARA&A*, 1992, 30: 705
- [6] Barnes J E, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 471: 115
- [7] Cox T J, Jonsson P, Somerville R S, et al. *MNRAS*, 2008, 384: 386
- [8] Blumenthal K A, Barnes J E. *MNRAS*, 2018, 479: 3952
- [9] Begelman M C, Blandford R D, Rees M J. *Nature*, 1980, 287: 307
- [10] Yu Q. *MNRAS*, 2002, 331: 935
- [11] Liu X, Shen Y, Strauss M A, et al. *ApJ*, 2011, 737: 101
- [12] Wang J M, Songsheng Y Y, Li Y R, et al. *MNRAS*, 2023, 518: 3397
- [13] Milosavljevic M, Merritt D. *ApJ*, 2001, 563: 34
- [14] Koss M, Mushotzky R, Treister E, et al. *ApJ*, 2012, 746: L22
- [15] De Rosa A, Vignali C, Bogdanović T, et al. *NewAR*, 2019, 86: 101525
- [16] Shlosman I, Begelman M C, Frank J. *Nature*, 1990, 345: 679
- [17] Armitage P J, Natarajan P. *ApJ*, 2002, 567: L9
- [18] Wada K. *Fueling Gas to the Central Region of Galaxies // Ho L C. Coevolution of Black Holes and Galaxies*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 186–202
- [19] Dotti M, Colpi M, Haardt F, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 956
- [20] Dotti M, Sesana A, Decarli R. *AdAst*, 2012, 2012: 940568
- [21] Blecha L, Loeb A, Narayan R. *MNRAS*, 2013, 429: 2594
- [22] Yu Q, Lu Y, Mohayaee R, et al. *ApJ*, 2011, 738: 92
- [23] Kelley L, Charisi M, Burke-Spolaor S, et al. *BAAS*, 2019, 51: 490
- [24] Chen Y, Yu Q, Lu Y. *ApJ*, 2020, 897: 86
- [25] Shen Y, Casey-Clyde J A, Chen Y C, et al. 2023, arXiv: 2306.15527
- [26] Green P J, Myers A D, Barkhouse W A, et al. *ApJ*, 2010, 710: 1578
- [27] Liu X, Shen Y, Strauss M A, et al. *ApJ*, 2010, 708: 427
- [28] Fu H, Zhang Z Y, Assef R J, et al. *ApJ*, 2011, 740: L44
- [29] Fu H, Yan L, Myers A D, et al. *ApJ*, 2012, 745: 67
- [30] Rosario D J, McGurk R C, Max C E, et al. *ApJ*, 2011, 739: 44
- [31] Komossa S, Burwitz V, Hasinger G, et al. *ApJ*, 2003, 582: L15
- [32] Ballo L, Braitto V, Della Ceca R, et al. *ApJ*, 2004, 600: 634
- [33] Bianchi S, Chiaberge M, Piconcelli E, et al. *MNRAS*, 2008, 386: 105
- [34] Piconcelli E, Vignali C, Bianchi S, et al. *ApJ*, 2010, 722: L147
- [35] Mazzarella J M, Iwasawa K, Vavilkin T, et al. *AJ*, 2012, 144: 125
- [36] Koss M J, Glidden A, Baloković M, et al. *ApJ*, 2016, 824: L4
- [37] Torres-Albà N, Iwasawa K, Díaz-Santos T, et al. *A&A*, 2018, 620: A140
- [38] Wang J M, Chen Y M, Hu C, et al. *ApJ*, 2009, 705: L76
- [39] Shi Z X, Luo A L, Comte G, et al. *RAA*, 2014, 14: 1234

- [40] Wang L, Greene J E, Ju W, et al. *ApJ*, 2017, 834: 129
- [41] Eracleous M, Halpern J P, M. Gilbert A, et al. *ApJ*, 1997, 490: 216
- [42] Foord A, Gültekin K, Nevin R, et al. *ApJ*, 2020, 892: 29
- [43] Owen F N, O’Dea C P, Inoue M, et al. *ApJ*, 1985, 294: L85
- [44] Barth A J, Bentz M C, Greene J E, et al. *ApJ*, 2008, 683: L119
- [45] Comerford J M, Griffith R L, Gerke B F, et al. *ApJ*, 2009, 702: L82
- [46] Pfeifle R W, Weaver K A, Secrest N J, et al. 2024, arXiv: 2411.12799
- [47] Flesch E W. *OJAp*, 2023, 6: 49
- [48] Koss M, Mushotzky R, Treister E, et al. *ApJ*, 2011, 735: L42
- [49] Secrest N J, Schmitt H R, Blecha L, et al. *ApJ*, 2017, 836: 183
- [50] Dey A, Schlegel D J, Lang D, et al. *AJ*, 2019, 157: 168
- [51] Silverman J D, Kampczyk P, Jahnke K, et al. *ApJ*, 2011, 743: 2
- [52] Barton E J, Geller M J, Kenyon S J. *ApJ*, 2000, 530: 660
- [53] Eisenstein D J, Annis J, Gunn J E, et al. *AJ*, 2001, 122: 2267
- [54] Darg D W, Kaviraj S, Lintott C J, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1043
- [55] Zehavi I, Blanton M R, Frieman J A, et al. *ApJ*, 2002, 571: 172
- [56] Taylor M B. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005, 347: 29
- [57] Hogg D W. 1999, arXiv: 9905116
- [58] Zhang Y W, Huang Y, Bai J M, et al. *AJ*, 2021, 162: 289
- [59] Conselice C J. *ApJS*, 2003, 147: 1
- [60] Lotz J M, Primack J, Madau P. *AJ*, 2004, 128: 163
- [61] Lotz J M, Jonsson P, Cox T J, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1137
- [62] Capelo P R, Volonteri M, Dotti M, et al. *MNRAS*, 2015, 447: 2123
- [63] Lotz J M, Jonsson P, Cox T J, et al. *MNRAS*, 2010, 404: 575
- [64] Mihos J C, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 464: 641
- [65] Onoue M, Kashikawa N, Uchiyama H, et al. *PASJ*, 2018, 70: S31
- [66] Sandrinelli A, Falomo R, Treves A, et al. *MNRAS*, 2018, 474: 4925
- [67] Uchiyama H, Toshikawa J, Kashikawa N, et al. *PASJ*, 2018, 70: S32
- [68] Habouzit M, Volonteri M, Somerville R S, et al. *MNRAS*, 2019, 489: 1206
- [69] Fossati M, Fumagalli M, Lofthouse E K, et al. *MNRAS*, 2021, 503: 3044
- [70] Garcia-Vergara C, Rybak M, Hodge J, et al. *ApJ*, 2022, 927: 65
- [71] Overzier R A. *A&ARv*, 2016, 24: 14
- [72] Bhowmick A K, Di Matteo T, Myers A D. *MNRAS*, 2020, 492: 5620
- [73] Hennawi J F, Strauss M A, Oguri M, et al. *AJ*, 2006, 131: 1
- [74] Hoffman C, Chen N, Di Matteo T, et al. *MNRAS*, 2023, 524: 1987
- [75] Fukugita M, Nakamura O, Schneider D P, et al. *ApJ*, 2004, 603: L65
- [76] Green P J, Myers A D, Barkhouse W A, et al. *ApJ*, 2011, 743: 81
- [77] Husband K, Bremer M N, Stanway E R, et al. *MNRAS*, 2013, 432: 2869

Search for Kiloparsec-scale Dual Active Galactic Nuclei at Low Redshift

XIANG Cheng WU Jiang-hua CHEN Qi-hang JING Liang

(School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT Research on dual AGNs (Active Galactic Nuclei) is crucial for understanding the formation, growth, and evolution of galaxies and supermassive black holes (SMBHs). However, the current number of identified dual AGNs remains scarce, which limits our understanding of galaxy mergers, the growth of SMBH pairs, and the prediction and detection of low-frequency gravitational waves. A total of 187 new dual AGNs, 4 triple AGN systems, and 1 quadruple AGN system were identified based on the Million Quasars Catalog. All of these multiple AGN systems have low redshifts ($z < 0.5$), with projected distance (r_p) between members less than 100 kpc and line-of-sight velocity differences (Δv) smaller than 600 km/s. This sample complements existing low-redshift dual AGN samples and provides valuable insights into AGN triggering mechanisms and the evolution of SMBH pairs. A visual inspection of the optical and infrared images of the identified samples reveals that approximately 24% of the dual AGN systems exhibit clear tidal features. Statistical analysis of their redshift, projected distance, and line-of-sight velocity difference indicates that the number of dual AGN increases with decreasing redshift, and that most Δv values are distributed below 400 km/s. The number of dual AGN systems with tidal features is relatively small in larger projected distances, with only one system found in $(60-65) h_{70}^{-1}$ kpc. As the projected separation decreases, the number of such systems increases, reaching a peak of 10 cases in $(10-15) h_{70}^{-1}$ kpc, and then gradually decreases in smaller scales.

Key words galaxies: active, galaxies: interactions, galaxies: nuclei, galaxies: general