

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.03.04

星系对的选择及其研究进展

张聪慧, 孙艳春

(北京师范大学 天文系, 北京 100875)

摘要: “星系对”研究的飞速进展, 得益于光谱红移巡天和多波段图像观测。选择的星系对数目不断增多, 数据准确度和完备性不断提高, 促进了与星系对相关的课题研究。首先介绍了星系对的选择情况, 包括目前已选择的星系对数目和选择判据在实际应用过程中的改进和发展情况; 讨论了数据的完备性对星系对选择和研究的影响, 不同波段星系对选择的优缺点; 其次概述了目前在星系对方面的研究课题; 最后是对星系对研究的展望。

关键词: 星系对; 判据; 红移; 恒星形成; 星系演化; 光度函数

中图分类号: P157.8

文献标识码: A

1 引 言

星系对是具有物理联系的两个星系组成的引力束缚系统, Soares 等人^[1]根据成员星系的紧密程度将其分为 4 种: 并合星系, 强潮汐星系对, 潮汐宁静星系对, 目视星系对; 其中并合星系相互作用最强, 强潮汐星系对次之, 目视星系对的可信度最低。星系对是研究星系引力相互作用的最致密系统, 是研究星系间相互作用的最简单和最主要的场所^[2]。星系间相互作用对星系内恒星的形成速率、星系颜色、形态、核区活动等都有显著的影响, 对星系的演化有重要作用。例如, 星系相互作用可以导致星暴、改变星系形态、驱动星系核心区活动, 在宇宙学时间尺度上, 由星系相互作用导致的恒星形成贡献了宇宙整体的恒星密度, 并且是由蓝的、正在形成恒星的星系过渡到红的、安静星系之重要因素^[3-5]。通过研究星系对的恒星形成、星系形态、结构演化、星系质光比、星系并合速率、活动星系等多方面的课题来探索相互作用导致的星系多方面性质的变化, 对研究星系的形成、演化、恒星形成等有重要意义。研究发现, 不同性质的星系对对恒星形成的促进作用不同; 处于星系对的星系与场星系的颜色特征不同^[4,5]; 星系并合是大质量星系形成的一种途径^[6]; 星系相互作用随红移具有显著的演化效应, 由相互作用导致的星系形态变化使得这些不规则星系不能归结到哈勃序^[4]; 星系对中活动星系较高的比例表明星系相互作用会加强星系核活动^[7]。

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-05-16

资助项目: 国家自然科学基金-中科院天文联合基金项目 (1077817)

星系对是星系天文学长期研究的课题之一,从 Holmberg^[8] 开始研究星系对到现在,已经有 70 多年的研究历史。早期星系对研究主要受观测条件的限制,观测数据少,数据本身完备性不高,并且缺少红移数据;星系对判据简单,主要通过计算成员星系的投影距离选择星系对,所选择的星系对数目少,可信度低。目前这一状况得以极大改善,观测技术的提高尤其是巡天观测的展开,使得大样本星系红移的获得和红移值精确度不断提高成为可能,同时数据完备性不断提高,极大地促进了星系对的研究进展。不同波段的巡天使多波段星系对选择得以快速发展,星系对选择判据在探索实践中不断完善,星系对数目在大幅度增加的同时其可信度也有很大的提高。经过统计,目前已选出的星系对约有 1.1×10^5 个,已知星系对最大红移约为 3.38^[9],大部分星系对都处于中低红移范围,高红移星系对的选择效率仍然较低;这主要是因为随着红移的增大,数据的完备性降低,红移的误差增大,同样的判据选择出的高红移星系对可信度降低。而且目前星系对选择方法和判据本身也在不断的修正和完善,天文学家大多根据不同的研究目标和观测设备,设定判据参数;不同的判据会导致星系对的选择性偏差,影响与星系对相关的研究结果。

下文主要在三方面阐述了星系对的研究进展:第 2 章统计了星系对选择的研究情况,包括星系对数据、星系对选择判据、星系对数据完备性以及 K 波段选择星系对的研究;第 3 章就星系对研究涉及到的不同课题展开讨论;第 4 章是对星系对未来研究前景的展望。

2 星系对选择

2.1 已发表的星系对表

早期重要的星系对表有 3 个:

(1) Vorontsov-Velyaminov 于 1959 年^[10]和 1976 年^[11]分别发表相互作用星系表,分别包含 355 和 497 个相互作用系统,但是该数据不仅包含星系对,还包含多星系相互作用系统和场星系;

(2) Arp 在 1966 年发表的数据 (Atlas of Peculiar Galaxies) 包含了 338 个并合系统^[12],该数据是利用一个 200 英寸的望远镜经过 4 年多的直接拍摄得到的,数据不仅包含了并合星系星等、坐标等基本信息,还包含对星系特征的基本描述;

(3) Karachentsev 在 1972 年选择的 603 对星系对 (CPG)^[13]是早期星系对研究的主要对象,其样本选自 Palomar 巡天数据,星等极限为 15.5 mag,覆盖了北半球的整个区域以及到南半球 -3° 的区域。

但由于缺少红移数据,这些星系对表中包含非物理星系对。

20 世纪 90 年代后,随着红移巡天的展开和多波段探测的发展,测得红移的星系样本数目猛增,从中选出了更多的物理星系对,星系对的研究也扩展到多波段。表 1 列举了几个主要的巡天观测,其中 2df、CfA(Center for Astrophysics) 红移巡天以及 SDSS(The Sloan Digital Sky Survey) 巡天等对星系对的研究起到很大的推动作用。例如 Barton 等人利用 CfA2 巡天数据,选出了 251 个星系对^[14]; Infante 等人利用 SDSS 早期的数据,选出 6769 个星系对和

550 个三重星系对^[15], 星等范围是 $17 < r^* < 20$; Lambas 等人利用 2df 发布的数据, 选出了 1258 个星系对^[16]。较大望远镜用于巡天观测成为研究星系对的转折点, 使获得高红移、完备的星系样本成为可能, 测量结果也具有更高的精确度, 使得星系对的数目和可信度有了很大的提高。其中 SDSS 巡天覆盖了四分之一的天区范围, 到目前为止已经释放了第 9 次观测数据, 观测星系达 208 478 448 个。目前对 SDSS 星系数据的研究主要集中于主星系样本, 主星系样本是指 SDSS 巡天中星等范围为 $14.5 < r^* < 17.7$ 的星系, 有少量的研究集中于 SDSS 巡天暗源 ($18 < r^* < 20$)^[17]。已选择星系对几乎分布于整个 SDSS 巡天天区, 由于 SDSS 巡天数据限制, 星系对都分布于中低红移处 ($z < 0.4$), 其中大部分星系对处于 $z < 0.2$ 范围内。2010 年, Cervantes-Sodi 等人^[18] 利用 Park 等人^[19] 的 SDSS 样本数据, 选择的星系对具有较高的红移分布, 最大红移值 $z \approx 0.5$ 。

表 1 主要巡天项目及星系对选择情况

巡天名	观测波段	观测天区范围	选出的星系对数目
POSS-I	光学	$-33 \leq \delta \leq 90$	338
2MASS	近红外	全天区	234
2df	光学	$330 < \alpha < 52.5, -38 < \delta < -22;$ $147 < \alpha < 225, -8 < \delta < 3$	10 469
CfA	光学	$26.5 \leq \delta \leq 32.5$	299
SDSS	ugriz 五色测光	以南银冠和北银冠为中心的 8400 平方度	57 925

对已发表星系对进行统计, 我们得到目前已选出的星系对数目约为 1.1×10^5 个, 最大的红移约为 3.38^[9], 其中通过 SDSS 数据选择的星系对约占已选星系对的 50%。由于早期计算机技术和网络技术的限制等原因, 有少量星系对数目未统计在内。由于一部分星系对数据没有公开发表, 我们只对其中的 13 767 个星系对进行了较详细的统计, 建立了星系对表, 包含星系对的坐标、红移、观测设备、成员星系名称、视星等、绝对星等等; 在这些星系对中有 12 394 个星系具有红移值, 占已统计数目的 45.01%, 大部分的星系对红移处于 [0,0.4] 范围内 (如图 1、2 所示), 随着红移的增加, 星系对的数据呈减小趋势, 高红移星系对所占比例很小。

2.2 星系对选择方法和判据

目前选择星系对有 3 种方法, 各对应不同的研究目的和适用条件, 具体方法如下。

2.2.1 根据星系间相互作用对星系对成员星系形态的影响, 找到具有特殊形态的星系

根据星系形态特征选择星系对的准确度较高, 且不依赖于红移数据, 并可以辨认出星系相互作用具体处于并合前或并合后等不同阶段。这种方法的操作效率较低, 适合小样本或单个星系对的具体性质研究。由于星系对还没有统一的分类标准, 因此操作上容易受人为主观影响, 结果具有一定的不确定性, 一般会存在两种偏差:

(1) 把不规则孤立星系当作星系对, 或者把有恒星正在形成的星系当作并合星系。

(2) 遗漏低光度的并合现象, 一些暗星系相互作用难以分辨^[20], 尤其是对红移很大的星系, 受望远镜分辨本领的限制, 很难精确地分辨星系的形态特征。

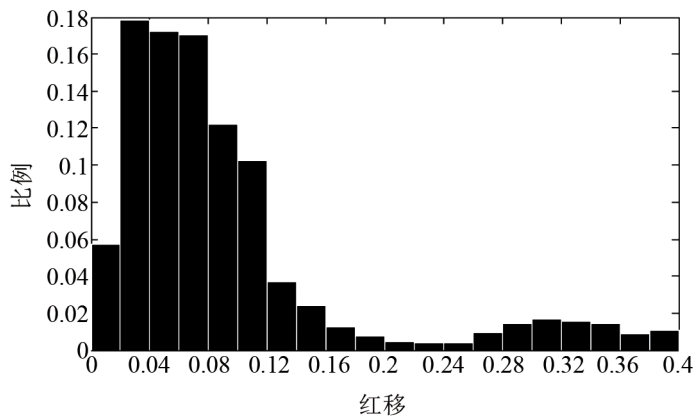


图1 已统计星系对在红移 [0,0.4] 范围内的分布

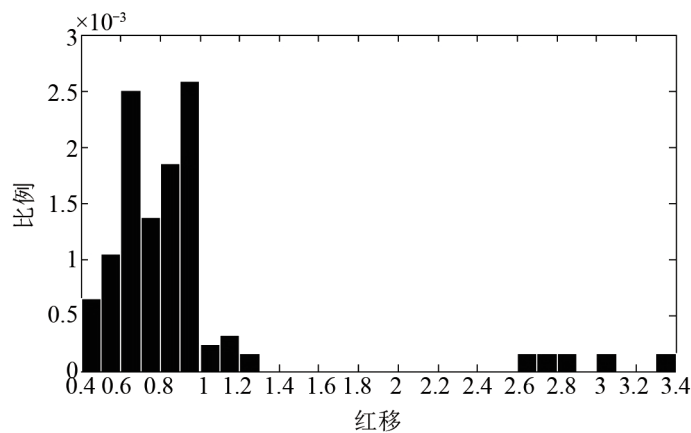


图2 已统计星系对在 [0.4, 3.4] 范围内的分布

2.2.2 根据成员星系的空间距离选择星系对

当两个星系的空间距离满足一定的条件时,我们认为这两个星系是星系对。

这种利用三维距离选择星系对是目前星系对选择的主要方法,但至今还没有一个统一的判据,往往根据不同的研究课题,使用不同的选择判据。选源判据的修正和取舍也是星系对选择的重要发展。由于早期星系信息不全面,特别是缺少红移数据,星系对判据主要是对星系三维距离投影的限制,并不是星系的空间距离,由此得出的星系对并不一定是真正的物理星系对,而只是投影星系对。Karachentsev^[13]提出星系对中成员星系满足:

$$\frac{x_{1i}}{a_i} = k \frac{x_{12}}{a_1}, \quad (1)$$

其中 $\epsilon a_1 \leq a_i \leq \eta a_1$, a_i 是目标星系的角直径, a_1 是与目标星系相邻星系的角直径, x_{1i} 是目标星系与其相邻星系的角距离, k 、 ϵ 、 η 为常数,不同的常数值对目标星系与其伴星系的距离限制不同,例如 Domingue 等人引用的值为: $k = 5$, $\epsilon = \frac{1}{2}$, $\eta = 4$ ^[21]。在参数限制范围内,这种

方法把距离目标最近的星系作为其伴星系,但不一定是物理星系对。随着观测的发展,星系对判据逐渐量化,约束条件逐渐增多,一般根据星系的坐标、空间距离、红移以及两星系视向方向速度差值来确定两个星系是否处于同一星系对中。例如 Sun 等人利用红外数据选择星系对时使用的判据为^[2]:

- (1) 主星系的 K_s 星等值不大于 12.5, 主星系是指较亮的成员星系;
- (2) 至少有一个成员星系测定了红移;
- (3) 成员星系的距离满足 $r \leq 20 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$;
- (4) 两星系的星等差值满足 $\delta K_s \leq 1.5$;
- (5) 两个星系都不处于星系团中。

目前常用的判据主要有以下几个方面。

- (1) 星系对成员星系距离满足:

$$r_{\min} < r < r_{\max} \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc} , \quad (2)$$

其中 r_{\min} 、 r_{\max} 分别是对成员星系距离最小值和最大值的限制。对成员星系距离的限定大部分处于 $5 \sim 25 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 范围内;也有少量研究工作取较大的成员星系距离,例如 Woods 等人使用的判据中,成员星系距离满足 $\Delta D \leq 55 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ ^[22]。如果对星系对成员星系距离限定小,则高红移处相同空间距离的成员星系角距离小,导致望远镜无法分辨;若星系对成员星系距离大,则非物理星系对干扰增强^[20,23],研究表明,非物理星系对所占的比例与星系样本分布天区范围成正比,与红移的平方成反比,与该星系所处位置的星系数密度成正比^[24]。

(2) 成员星系速度差值满足 $\delta v \leq v_{\max} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。一般规定成员星系速度差值在 $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,成员星系视向速度差值大部分限定在 $70 \sim 2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。

(3) 至少一个成员星系具有测定的红移值。精确的红移值是选择物理星系对的必要条件,早期观测数据由于缺少红移值,选择的星系对很大程度上受非物理星系对的影响。

(4) 成员星系的星等满足 $m_{\min} < m < m_{\max}$ 。对成员星系星等的限制主要是考虑到望远镜的观测极限以及星系样本的完备性,不同观测设备和不同研究对象的星等限制不同。对于一些主并合或次并合星系对的研究,还要对成员星系的星等差值或质量差值进行限制。主相互作用或主并合是指质量相近或光度相近的星系间的相互作用或并合,反之质量或光度相差较大的星系间相互作用或并合称为次相互作用或次并合。

(5) 剔除星系团中的星系对。为了更好地研究星系间的相互作用效应,排除星系团中其他星系对星系对的影响,需要选择孤立星系对。判断星系对是否处于星系团中有两种方法:

1) 对于已知的星系团,可以得到星系团中成员星系所处的红移范围,如果所选的星系对不处于该红移范围内,则认为该星系对不处于该星系团中^[25]。

2) 确定星系团中星系的退行速度中值,如果所选的星系对不处于该中值速度的上下 $1500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内,则认为星系对不处于该星系团中^[25]。

同时需要排除星系团对邻近星系对的影响,应剔除与星系团距离较近的星系对;剔除的依据是目标星系对周围某一范围内的天体密度大小,例如 Patton 等人使用的密度判据为星系对周围每个角分内的星系数目不大于 7^[25]。

(6) 在研究某一类型的星系对时, 星系对判据应该包含对星系形态的规定。

(7) 不同的宇宙学模型也会导致不同的星系对选择结果。由不同的宇宙学模型参数计算出的星系的基本参量(如距离、红移等)不同, 根据选择判据选出的星系对数据不同。大多常用的是 Λ CDM 模型 ($\Omega_\Lambda = 0.7$, $\Omega_m = 0.3$), 哈勃常数引用值有 $H_0 = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 、 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 、 $H_0 = 100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 目前取 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。

这种方法需要精确的红移巡天样本数据, 操作效率高, 适合星系对的批量选择和大样本统计研究。但选择结果与观测数据、选择判据密切相关, 测量数据的误差、早期缺少红移数据以及不合理的选择判据, 都会导致非物理星系对的混入, 影响星系对研究结果。

2.2.3 从动力学角度选择星系对

Tonnesen 等人规定系统的动能小于势能的 90% 时, 为引力互相束缚的星系对。此方法要计算星系的动能和势能, 同时要考虑哈勃流^[26], 选择准确度高, 但效率不高。此方法模拟计算星系对的空间距离、势能、动能, 可用来检验用第二种方法选出的星系对是否为物理星系对。

2.3 星系对样本完备性

为避免研究结果受选择效应的影响, 建立完备的星系对样本是必须的。星系对数据的不完备性主要是由观测导致的, 主要分为下面 5 个方面。

2.3.1 受望远镜分辨率的影响, 两星系角距离很近时, 望远镜无法分辨

由此造成的不完备性, 随着成员星系距离的减小而增大, 其修正权重可以用多种方法进行计算。为估计由于两星系角距离太小无法分辨导致的样本不完备性, Patton 等人在对从 CNOC2 (CNOC2 Field Galaxy Redshift Survey) 数据中选择的星系对做不完备性修正时, 首先取了一个测光数据样本, 再取一个相同红移范围内 ($0.12 \leq z \leq 0.55$) 的光谱数据样本, 计算两个样本星系数目的比值, 估计光谱数据的不完备性, 进而比较光谱数据中星系对和测光数据中星系对随成员星系角距离的变化, 计算出不完备性权重因子随星系对角距离的变化^[27]。不完备性的修正权重可表示为:

$$w_\theta^k = \frac{a}{r(\theta_k)} \quad , \quad (3)$$

其中, $r(\theta_k)$ 表示分别在光谱数据表中和在测光数据表中得到的星系对数目之比, a 是设定成员星系距离后星系对所占总样本的比例^[28]。

2.3.2 望远镜观测极限星等导致数据不完备

暗星系发生相互作用时, 由于望远镜灵敏度不够, 其形态特征无法分辨, 造成样本不完备, 这种影响随着红移的增大而增大^[20]。对于体限制或流量限制样本, 星系对中较暗的星系处于望远镜观测极限之外, 造成样本不完备。体限制样本是指按照绝对星等范围选择的星系样本。可以通过对每个星系加一个权重因子 $w_{\text{mag}}^{i,j}(M_B, z)$ 进行完备性修正, 则整个星系对的权重修正表示为^[28]:

$$w_{\text{mag}} = w_{\text{mag}}^i(M_B, z) \times w_{\text{mag}}^j(M_B, z) \quad , \quad (4)$$

其中 M_B 是选择的星系对星系的星等极限, 该权重因子表示小于绝对星等 M_B 的星系数目和小于望远镜观测极限星等的星系数目比。也可用光度函数对不完备性进行估计, 由于遗漏伴星系造成的不完备性近似为^[20]:

$$Q \approx 0.5\phi(M_{lim})\delta M / \int_{-\infty}^{M_{lim}} \phi(M)dM, \quad (5)$$

其中 ϕ 是星系对的光度函数, δM 为成员星系的星等差。

2.3.3 望远镜观测天区不连续

望远镜光纤之间对应的天区并不是连续的。例如 2dfGRS 红移巡天最小光纤距离是 $30''$, 如果所选的星系对角距离小于 $30''$, 就会漏掉一部分星系对, 或者得到的星系对的成员星系不是都有精确的红移数据; 并且其巡天覆盖区域不均匀, 每次观测天区之间不是连接的, 选择星系对时, 需要对由此引起的数据不完备性进行估计^[29]。SDSS 的光纤角距离小于 $55''$, 对于角距离小于 $55''$ 的两个源, SDSS 将优先选择其中一个观测源^[30], 星系对成员星系角距离小于 $55''$ 时, 不完备性急剧下降, 是导致完备性随红移降低的因素之一。Ellison 等人分别计算成员星系角距离大于 $55''$ 和小于 $55''$ 的光谱数据, 然后与测光数据的比例进行修正^[31]; Domingue 等人通过计算红移未测定及角距离小于 $55''$ 的星系对所占的比例进行修正^[32]。

2.3.4 望远镜观测天区重叠

为保证巡天覆盖所有天区, 望远镜每次观测天区与其他天区有重叠区域, 例如 SDSS 巡天每次观测天区有重叠。在这种情况下, 可以将两个有重叠区域的天区当作一个天区分析, 扣除重叠部分的天体^[33]。

2.3.5 由红移数据造成的样本不完备

由红移造成的数据不完备性是多方面的, 例如缺少红移数据, 红移值不准确等, 所以需要利用不同估计方法:

(1) 缺少红移数据。对于缺少红移数据的非相互作用星系, 可以根据已知星系的色指数和红移的关系, 估算星系的红移。由于相互作用, 相同红移处星系对的成员星系比场星系偏蓝^[25], 利用色指数估计的红移值不准确^[34]。De Propris 等人通过计算缺少红移的星系对占总星系对数目比例估计红移缺失导致的不完备度^[35]。

(2) 数据不完备性随红移的增大而增大。处于不同红移范围的数据完备性不同, 可以将红移分成不同的分布区间, 对每个分布区间的数据加上修正因子^[36]。Allison 等人将选择的数据分成不同的红移区间, 与其他波段的数据进行比较, 检验所选样本的完备性^[37]; Woods 等人对所选的星系对样本与整个巡天数据做 KS(Kolmogorov-Smirnov) 检验, 验证选出的星系对是否为整个巡天数据的一个子样本^[22], 以此估计星系对样本的完备性。

(3) 望远镜观测得到的红移数据有误差^[38], 尤其是高红移星系。de Ravel 等人比较不同红移的光谱和测光数据估计不完备性, 得出成员星系不完备的修正权重为^[28]:

$$w_{\text{comp}}^i(z) = \left(\frac{N_{\text{g,spectro}}^{\text{sel}}(z)}{N_{\text{g,photo}}^{\text{sel}}(z)} \right)^{-1}, \quad (6)$$

其中 $N_{\text{g,spectro}}^{\text{sel}}$ 是具有高置信度光谱红移的星系数目, $N_{\text{g,photo}}^{\text{sel}}$ 是相同红移范围内的测光数据数目, 星系对的不完备修正权重表示为^[28]:

$$w_{\text{p,comp}}^k = w_{\text{comp}}^i \times w_{\text{comp}}^j. \quad (7)$$

综上所述, 望远镜观测的数据本身是不完备的, 需要对导致样本不完备的多个量进行估计, 数据不完备性修正是对多种不完备性因素修正权重的综合。

2.4 K 波段星系对的选择

受观测条件限制, 早期星系对研究主要集中在光学波段。随着多波段观测和巡天的发展, 星系对研究扩展到多波段。红外波段研究星系对具有多方面的优势。

(1) 不同形态的星系在 K(红外) 波段具有类似的能谱分布^[39]。

(2) 在一定红移范围内, K 改正不依赖于星系形态, 因此可以更方便地计算星系的参量^[39]。

(3) K 波段是受恒星形成和尘埃消光影响最小的一个波段, 主要与天体质量相关^[40]。UV 或 B 波段受星际介质消光的影响大, 年轻恒星的辐射和尘埃消光对星系面亮度分布有较大的影响^[20]; 因此, 在 UV 或 B 波段选择星系对时, 更容易将不规则场星系和有恒星正在形成的星系误认作星系并合^[20,41]。并且处于星系对中的星系在远红外波段具有强的辐射^[42]。

因此利用红外波段选择星系对准确度更高。Sun 等人首次利用 2df 和 2MASS 红外数据选出 37 对星系对^[2]。

2.5 高红移星系对选择

探测高红移星系可以让我们更好地研究星系形成和演化。目前已知星系对的红移大部分处于 $[0, 0.4]$ 范围内, 受观测条件限制, 测量误差随红移 z 的增大而大大提高, 其信息可信度低, 例如 SDSS 观测数据误差随红移的变化为 $6 \lg(1+z)$, 造成星系对选源判据不适用于高红移星系, 必须加以修正。Lyman break 方法是根据星系光谱特征探测高红移星系的一种方法^[43]。2010 年, Cooke 等人利用 KeckI 望远镜进行光谱和图像观测, 从 140 个亮蓝星系中, 利用 Lyman break 方法选择出了 5 个星系对; 其研究表明, 距离小于 $50 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 时, 星系光谱会有过强的 $\text{Ly}\alpha$ 辐射, 这是因为星系间的相互作用促进了恒星形成、驱散了尘埃和气体导致的^[9]。

3 星系对的研究课题进展

星系相互作用影响星系的形态和光谱特征, 引起高能过程和核活动, 对星系的形成和演化有重要的意义。星系相互作用或并合可以分成 3 个主要的阶段: 早期阶段(星系相互分离)、强相互作用期、并合晚期^[27]。Bell 等人的研究表明, 在大质量星系对的合并时标与其动

力学时标相当的假设下, 现在的大质量星系 (质量大于 $5 \times 10^{10} M_{\odot}$) 可能约 50% 是由主并合 (major merger) 产生的, 这些星系在红移 $z = 0.8$ 处经历了主并合作用, 在过去的 80 亿年里, 大质量星系间的主并合作用是星系演化的主要动力^[44]。星系对中成员星系具有相近的视向速度的星系相互作用较强^[4]。与低质量的星系相比, 大质量星系更有可能发生主并合作用^[24]。

3.1 恒星形成

星系的相互作用可以有效地压缩气体, 促进恒星的形成^[16, 31, 45]。普通形态星系和特殊形态星系的色指数分布有很大的不同, Larson 等人利用特殊形态星系的 UBV 颜色证实相互作用星系促进恒星形成, 星系的 UBV 颜色很大程度上取决于星系演化过程中恒星形成情况^[45]。后来的很多研究证实了这一结论。星系对中恒星形成率已得到下面几个结论。

(1) Wong 等人利用 Prism Multi-Object Survey 的分光光谱数据, 研究了处于中红移范围 ($0.25 \leq z \leq 0.75$) 195 个孤立星系对的恒星形成速率, 星系对成员星系满足 $\Delta r_p \leq 50 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$, $\frac{\Delta z}{1+z} \leq 0.01$ 。与 7890 个场星系相比, 相同红移的星系对中成员星系偏蓝, 恒星形成率高, 高红移的星系对比低红移星系对中恒星形成速率略高^[5]。

(2) 晚型星系对在形态上显示出更强的潮汐力和较蓝的恒星形成区^[4]。

(3) 成员星系质量或光度相近的星系对 (主相互作用星系对) 具有较强的恒星形成率^[22]。Ellison 等人对 SDSS DR4 的研究发现, 成员星系质量比满足 $0.5 < \frac{M_1}{M_2} < 2$ 时, 星系相互作用对恒星形成的促进率最强, 随着成员星系质量比值的增加, 恒星形成率会降低^[31]。

(4) 在星系密度相对高的区域, 星系对成员星系中恒星形成率要比低密度区域的成员星系中恒星形成率低^[46, 47]。

(5) 红移处于 $z \geq 1$ 范围内时, 星系相互作用是加强恒星形成的重要机制^[48]。

(6) 数值模拟表明, 并不是所有的星系对都有明显的恒星形成^[22], 有些星系因缺少气体, 并没有显著的恒星形成^[49]; 星系的结构和几何轨道会影响由潮汐力导致的恒星形成^[50, 51]。低质量晚型相互作用星系中恒星形成率低^[52], 可能是由于这些星系盘的自引力不够。

(7) 恒星形成率与成员星系间距离成反比, 并且随着成员星系退行速度差值的增大而减小, 但是成员星系退行速度的差值对恒星形成率的影响小于成员星系距离的影响^[51]。Lambas 等人通过分析在 2df 数据中选择的 1258 个星系对后发现, 成员星系距离和速度差满足 $r_p < 25 \text{ kpc}$ 、 $\Delta V < 100 \text{ km/s}$ 时, 恒星形成被显著促进^[16]。

根据相互作用星系中一些谱线辐射和恒星形成率关系可以研究相互作用星系中恒星的形成。目前应用比较普遍的方法是测量星系对中 $\text{H}\alpha$ 线的等值宽度 $EW(\text{H}\alpha)$ 。Kennicutt 等人研究发现具有相近的 HI 含量时, 大部分的相互作用星系 $\text{H}\alpha$ 线的等值宽度 $EW(\text{H}\alpha)$ 比场星系高, 具有强 $\text{H}\alpha$ 辐射的星系对一般距离较近^[53]。Barton 等人通过对 251 个星系对进行分析, 发现成员星系距离越小, 其等值宽度值越高, 相互作用越强烈, 恒星形成数目多。主相互作用星系对的成员星系 ($|\Delta m_R| < 2$) 的 $EW(\text{H}\alpha)$ 与其距离 ΔD 相关性强, 成员星系光度相差较大 ($|\Delta m_R| \geq 2$) 时, $EW(\text{H}\alpha)$ 与 ΔD 没有明显的相关性, 说明光度相近的星系对潮汐力对恒星形成具有更强的影响^[22]。

另外一种方法是利用星系的远红外辐射估计恒星形成率。远红外辐射在相互作用星系中

会加强,加强的程度因相互作用星系的不同而不同。Bushouse 等人将星系对和场星系的远红外辐射和光学辐射比较,推测出星系对比场星系具有更高的恒星形成率^[54]。Kennicutt 得出星系中恒星形成率可根据下面公式估计^[55]:

$$SFR (M_{\odot} \cdot a^{-1}) = 4.510 \times 10^{-51} \times L_{IR} (J \cdot s^{-1}) . \quad (8)$$

除此之外,还可以根据其他的谱线特征,研究星系对中的恒星形成,例如可根据星系对中氧的一次电离半峰全宽随星系对距离的不同而变化研究星系对中恒星形成^[28]。

3.2 星系形态

1972 年,Toomre 提出星系的特殊形态(比如星系的桥、环、尾结构等)是由于星系相互作用导致的^[56]。在星系演化过程中,星系相互作用是导致星系发生形态变化的重要机制^[4],星系相互作用最直观的体现是成员星系形态的变化^[3]。星系对的不同形态说明其经历了不同的演化过程,处于不同的演化阶段,可以根据成员星系的形态对星系对进行分类:成员星系都是早型星系,被称为 EE (early-early),气体含量少,恒星形成少;晚型称为 SS (spiral-spiral),气体含量多;混合型称为 ES (early-spiral)^[4]。

星系形态是研究星系形成和演化的一个重要手段,很多不能归结到哈勃序的不规则星系是由星系相互作用导致的^[4]。Hammer 等人通过对红移中值 $z = 0.65$ 的样本的形态、速度等进行分析,发现星系的观测特征与星系并合作用或作用遗迹相一致,哈勃序列可能是由于星系并合作用形成的,观测和数据模拟都显示哈勃序与盘的重建有密切联系^[57]。Delgado-Serrano 等人通过对本地星系 ($0.0207 \leq z \leq 0.03$) 和遥远星系 ($0.4 < z < 0.8$) 进行形态比较,发现在过去的 60 亿年中,椭圆星系和透镜状星系数目变化小,漩涡星系和不规则星系数目变化大,本地漩涡星系的数目是遥远星系的 2.3 倍,不规则星系由早期的 52% 降至现在的 10%;漩涡星系在早期具有不规则星系的结构,表明相互作用导致的不规则星系向漩涡星系演化的趋势^[58]。Junqueira 研究得出,星系对中 EE 型星系对所占比例较高,晚型星系对 (SS) 表现出更强的相互作用导致的形态特征^[4]。

3.3 星系对颜色

具有相同的红移值时,处于星系对中的星系比场星系颜色偏蓝^[4,5]。Wong 等人把选自 PRIMUS 的星系对和场星系进行比较,结果发现当成员星系距离满足 $r_p \leq 30 h^{-1} \cdot kpc$ 时,在远紫外 ($\lambda_{eff} \approx 1530 \text{ \AA}$) 波段,星系对中成员星系的星等比场星系小 0.193 ± 0.065 星等;在近紫外 ($\lambda_{eff} \approx 2270 \text{ \AA}$) 波段,星系对中成员星系的星等比场星系小 0.159 ± 0.048 星等^[5]。

1958 年,Holmberg 利用 32 个星系对研究发现,星系对成员星系的色指数 U-B 是线性相关的,称为 Holmberg 效应。Holmberg 计算出的相关系数为 $R = 0.80 \pm 0.06$,并将这一现象解释为相似型星系具有一起演化和相互作用的趋势^[59]。之后的研究也证实了成员星系的色指数线性关系,但不同的样本得出的相关系数不同。Reduzzi 等人研究发现,EE 型星系对和 SS 型星系对的色指数 B-R 相关性较强,ES 型星系对相关性强^[60]。2004 年,Allam 等人利用 SDSS 巡天的五色测光数据,计算了同一个星系对样本中成员星系间不同色指数的相关系数,发现不同色指数 ($u - g, g - r, r - i, i - z$) 的线性系数不同,其中色指数 $g - r$ 的线性相关性

最强, 色指数 $i-z$ 的相关性最弱^[61]。2010 年, Deng 等人通过对选自 SDSS 巡天数据的 2597 个星系对分析, 发现星系对成员星系的色指数相关系数是随着成员星系的空间距离增大而减小的, 这说明星系对的 Holmberg 效应是一种物理效应, 但表征该效应的相关系数仍是未定值, Holmberg 效应与成员星系三维距离的关系目前还很难确定^[62]。

3.4 质光比 (M/L)

质光比是了解星系动力学和结构的一个基本参量, 可以用来研究恒星系统的组成和天体周围的暗物质分布。星系质量是一个基本参量, 是研究星系的结构、动力学和演化的一个必要因素^[63]。与利用双星运动测量恒星质量相似, 星系对可用来很好地研究星系的质光比。双引力系统的轨道参数为计算星系质量提供了有效的方法^[64]。由于星系的轨道周期长, 星系对质光比更多地利用其轨道模型, 通过统计分析得到^[65]。1979 年, Peterson 通过对 279 个星系对进行分析发现, 成员星系距离处于 25 ~ 600 kpc 时, 质光比不随成员星系距离变化, 质光比随成员星系距离的变化与大质量晕的假设相关^[64]。1987 年, Schweizer 分析了 48 个星系对后得出, 星系对成员星系距离为 100 kpc 左右时, Sc 型星系的最可几质光比为 21 ± 5 , 椭圆星系质光比最可几值为 39 ± 9 ^[63]。1999 年, Honma 研究发现, 星系对成员星系距离大于 100 kpc 时, 质光比没有随成员星系距离变化的趋势^[65]。2007 年, Kartaltepe 等人对选自 COSMOS 以及红移满足 $0.1 < z < 1.2$ 的 1749 个星系对的研究表明, 星系对的平均质光不因红移变化而变化^[23]。

3.5 金属丰度

2006 年, Kewley 等人研究得出, 光度相同的情况下, 成员星系距离小于 $20 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 时, 星系对中星系的金属丰度比场星系的金属丰度低^[66]。Rupke 等人通过研究亮红外星系对的红外波段“光度-金属”丰度和“质量-金属”丰度关系, 也证明了这一结论^[67]。Scudder 等人对选自 SDSS 的 1899 个星系对的成员星系距离与金属丰度关系分析, 发现相互作用星系具有较低的金属丰度: 成员星系距离小于 $60 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 时, 星系对金属丰度比场星系低 5%; 成员星系距离小于 $30 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 时, 星系对金属丰度比场星系低 9%^[68]。星系对成员星系的金属分布梯度相对于场星系较低, 可能是由于潮汐作用导致气体内流造成的; 金属分布梯度与相互作用星系中的气体动力学相关, 可以用来探测星系相互作用过程中的强潮汐气体内流情况^[69]。星系相互作用初期, 贫金属气体进入星系核心区域速度较慢, 引起的金属丰度变化缓慢; 星系作用较强时, 才会引起较快的金属丰度变化^[68]。星系相互作用引起的质量、光度、金属丰度变化关系目前仍不清楚。星系相互作用促进恒星形成, 星系光度会增大; 因为贫金属气体进入内部区域, 虽然金属丰度刚开始会减小, 但是由于恒星演化, 金属丰度会终会增加。星系最终的金属丰度取决于其质量、流进星系的气体的金属丰度和恒星形成率^[31]。

3.6 星系并合随红移的变化

通过计算不同红移处的星系对比例可以拟合出星系并合率随红移的演化。星系并合率随红移的演化可以用来检验星系的形成模型^[70], 对研究星系和星系对的演化有重要意义。星系对并合率随红移的增大而增大。由于宇宙的膨胀, 早期星系距离较近, 更容易发生相互作用^[25]。很多研究也证明高红移星系的合并率更高, 例如 Le Fevre 等人通过对哈勃空间望远

镜观测的 285 个并合星系进行分析, 得到平均红移 0.37、0.63、0.9 分别对应的星系并合率为 $5.8\% \pm 2.6\%$ 、 $10.5\% \pm 3.5\%$ 、 $21.8\% \pm 6.3\%$ ^[70]。星系并合率随红移的变化趋势为^[25, 34, 71]:

$$f_p \propto (1+z)^n \quad (n > 0) \quad , \quad (9)$$

其中 n 为演化因子。Xu 等人在 COSMOS survey 中选取了 617 个处于星系对中的主相互作用星系, 成员星系距离满足 $5 \leq r_{\text{proj}} \leq 20 \text{ h}^{-1} \cdot \text{kpc}$, 测光红移满足 $0.2 \leq z_{\text{phot}} \leq 1.0$, 得出星系对所占的比例随红移的演化关系为^[36]:

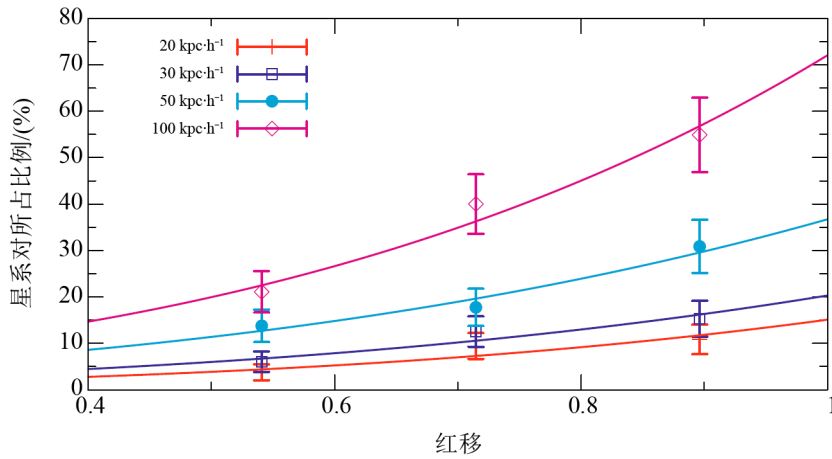
$$f_{\text{pair}} = 10^{1.96 \pm 0.03} (1+z)^{2.2 \pm 0.2} \quad . \quad (10)$$

星系并合速率随红移的变化还没有达到一个统一的值, 演化因子 n 随样本的不同而不同, 表 2 是不同的研究给出的对并合率的估计。星系并合率随红移的演化与星系的质量和光度有关, 大质量星系的演化因子小于低质量星系^[28]。受观测限制, 对星系并合率的研究主要集中在中低红移范围内, 高红移星系对的观测和研究可以使更好地研究星系并合随红移的演化, 进而促进对星系演化的研究。不同的高红移星系对研究得出的并合率演化因子相差较大。高红移星系形态难以分辨, 因此应当结合测光和光谱数据, 同时考虑相互作用导致的形态变化和光谱特征^[72]。Lopez Sanjuan 等人利用星系的测光和光谱数据研究发现, 富气体主并合星系对具有较高的比例, 处于红移范围 [0.94, 1.06]、[1.2, 1.5)、[1.5, 1.8] 的星系对比例分别为 $20.8_{-6.8}^{+15.2}\%$ 、 $20.1_{-5.1}^{+8.0}\%$ 、 $22.0_{-7.3}^{+13.7}\%$ ^[72]。

表 2 星系对合并速率部分研究结果

参考文献	合并速率	星系对红移范围
[34]	$(1+z)^{2.9 \pm 0.8}$	$0 < z < 0.4$
[25]	$(1+z)^{2.8 \pm 0.9}$	$0.18 < z < 0.45$
[70]	$(1+z)^{2.7 \pm 0.6}$	$0.5 < z < 1$
[23]	$(1+z)^{3.1 \pm 0.1}$	$0.1 < z < 1.2$
[73]	$(1+z)^{3.0 \pm 0.4}$	$1.7 < z < 3.0$
[36]	$(1+z)^{2.2} / (1 + \frac{z}{8})$	$0.2 < z < 1.0$

在同一源数据中利用不同的判据选出星系对会得出不同的星系对并合率。2009 年, de Ravel 等人对在同一个 VVDS(VIMOS VLT Deep Survey) 样本中利用不同的判据选出的星系对进行研究, 得出星系对所占比例和星系对并合率随红移演化 (如图 3 和表 3 所示)^[28]。de Ravel 等人的研究还发现, 星系对所占的比例和合并率随红移的演化与主星系的质量和光度有关, 暗且质量小的星系对比亮且质量大的星系对所占比例和并合速率随红移变化快。晚型星系对所占比例随红移演化指数为 $n = 4.74 \pm 0.81$, 早型星系为 $n = 1.44 \pm 0.93$, 晚型星系所占比例和合并率随红移的演化较快^[28]。

图 3 不同星系对判据得出的星系对比例^[28]表 3 de Ravel 等人利用不同星系对判据所得星系对演化因子部分结果^[28]

成员星系距离 $r_p/h^{-1} \cdot \text{kpc}$	$\Delta v \leq 500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	$\Delta v \leq 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
	演化因子 n	演化因子 n
20	2.63 ± 1.96	1.19 ± 1.48
30	2.01 ± 1.32	1.50 ± 1.08
50	1.33 ± 0.98	1.42 ± 0.58
100	2.20 ± 0.77	1.15 ± 0.50

3.7 光度函数

光度函数是对星系在空间分布和随时间演化的基本统计, 对研究星系形成和演化具有重要意义。已知光度函数可以用来检验样本是否完备, 估计星系对所占的比例和星系对并合率随红移的演化。星系对数据是否完备是影响星系对光度函数的重要因素, 星系巡天观测的发展促进了星系对光度函数的研究。研究星系对光度函数主要有两种方法。

3.7.1 Schmidt 的 V_{max} 方法^[77]

V_{max} 表示将样本中某一个源移到最大红移处仍然能够被观测到时对应的最大体积, 计算该星系真实红移处的体积与 V_{max} 的比值来估计星系的分布。符合较好的拟合形式为 Schechter 方程^[75]:

$$\phi_{\text{sch}}(M) = (0.4 \ln 10) \phi_* 10^{0.4(\alpha+1)(M_*-M)} \exp(-10^{0.4(M_*-M)}), \quad (11)$$

其中 α 为暗端斜率, M_* 为截止绝对星等, ϕ_* 为归一化因子。考虑到星系的演化效应, 3 个量随红移的变化而变化^[76]。这种方法的计算结果容易受星系不均匀分布的影响^[32]。

2004 年, Xu 等人通过分析 37 个选自 2MASS 的星系对, 利用 V_{max} 方法^[74] 计算了 K_s 波段星系对的光度函数, 其计算公式为^[24]:

$$\phi(M_{k,i}) = \frac{A}{\delta(m)} \sum_j^{N_i} \frac{1 - Q_{\text{false},j}}{V_{\text{max},j}}, \quad (12)$$

其中 $Q_{\text{false},j}$ 是对引起数据不完备性的估计。利用 Schechter 方程拟合出光度函数^[75]，与普通星系光度函数不同，星系对光度函数在暗端下降，说明低质量星系处于主并合星系对中的几率较小，与之前提到的结论符合。2011 年，Casteels 等人提出，星系对中成员星系亮度不同，应该对两个星系的 V_{max} 都进行权重修正；且随着两星系星等差的减小，星系对光度函数会向高密度区域星系的星等偏移，需要对此做出修正；应用到 MGC 中选择的星系对，与场星系相比，星系对光度函数趋向于亮端，尤其是主并合星系对，光度函数很明显地趋于亮端，说明主并合更普遍地发生在亮星系间^[77]。

3.7.2 最大似然光度函数法 (EEP)^[81]

这种方法受样本中星系不均匀分布影响小，且独立于真实的和假定的光度函数形式^[32]。2009 年，Domingue 等人将两种方法应用到一个包含 340 个星系对的样本，红移满足 $0 < z < 0.1$ ，利用两种方法拟合出的图在 $M_k \simeq -24 \text{ mag}$ 处差值最大，说明星系对光度函数在亮端可能不严格符合 Schechter 形式^[32]。

3.8 星系核区活动

星系并合与星系核区活动相关^[79-81]。观测研究和数值模拟都表明，星系相互作用时的潮汐力会使大量的气体进入星系核区，可以有效地为中心黑洞提供气体原料，使中心黑洞质量增大，导致核活动增强^[79, 82]。Haan 等人通过估计气体内流来研究星系对的核区活动^[79]。双活动星系核的发现和研究表明活动星系可能起源于星系并合^[83]。不同的研究得出的活动星系对所占比例不同，例如 2007 年，Alonso 等人研究发现，对于给定的光度或质量，与场星系样本相比，星系对中活动星系所占比例较高^[7]；但有些研究表明星系对中活动星系与宁静星系所占比例没有明显不同^[84, 85]。这些研究结果的不同可能是由于样本大小、不同波长处消光不同、图像深度以及对活动星系分类不同造成的^[86]。Ellison 等人通过对选自 SDSS 巡天的大样本星系对进行分析，发现与场星系样本相比，当成员星系距离满足 $D < 40 h_{70}^{-1} \cdot \text{kpc}$ 时，星系对样本中活动星系是场星系样本中活动星系的 2.5 倍；活动星系在主相互作用星系对中所占比例高，在次相互作用星系对中的比例低；随着成员星系距离的减小，活动星系的比例会增高；星系相互作用会导致核活动，但并不是导致核活动的唯一原因^[86]。

4 总结与展望

星系对选择判据已从最初的计算星系投影距离这一个条件发展到在多个方面进行限制，包括星系的空间距离、视向速度、红移、星等范围等，选择的星系对数目已达 1.1×10^5 个。星系对选择的发展促进了与星系对相关的课题研究。星系相互作用是星系演化的主要动力，哈勃序列可能是星系并合作用的结果，星系相互作用导致星系形态变化；在过去的 60 亿年里，旋涡星系和不规则星系数目变化较大，表明了不规则星系相互作用向漩涡星系演化的趋势。

星系相互作用使星系颜色比场星系颜色偏蓝, 但是星系对色指数关系与成员星系空间距离的关系没有确定, 星系对成员星系质光比 M/L 没有随成员星系距离变化的趋势。星系对的并合速率与星系对所占比例随红移变化呈增大趋势, 但不同研究得出的指数增长因子数值不同。

虽然星系对的研究已经有了较快的发展, 但仍有很多问题需要解决。星系对选择的方法还不完善, 难以同时兼顾星系对选择的效率和正确率, 选择判据仍不统一, 不同的判据会有不同的研究结果, 不能完全排除非物理星系对的影响。星系对中成员星系相互作用物理机制、过程仍不清楚, 星系相互作用的不同阶段分类以及处于不同相互作用阶段星系对的物理特征仍不明确, 使我们难以把握相互作用对星系演化的具体影响。星系并合和星系对所占比例随红移的变化规律仍没有确定, 已知的星系对主要分布在中低红移处, 选择出的高红移星系对数目少, 直接影响着对星系对空间分布随红移变化图景的刻画, 以及星系形成和演化的研究进展。目前星系对的研究主要侧重于大样本的统计研究, 缺少对具有代表意义的个别星系对性质的具体深入研究。观测技术的提高是解决星系对研究问题的关键, 精确的测光和光谱数据是我们进一步研究星系相互作用的基础, 数据完备性和高红移星系数据观测的准确性对研究星系对的演化有重要作用, 多波段数据可以使我們更加深入地了解相互作用对星系性质的影响。因此合理的星系对选择方法、高红移星系对数据以及对单个星系对具体性质的研究是星系对研究的突破点, 对研究星系形成和演化具有重要意义。新的观测技术和观测设备的投入使用, 以及恒星、星系等其他天文领域的研究进展, 将不断促进星系对研究的发展。

致谢

感谢邓新发教授、Donovan Domingue 教授在作者统计已发表星系对时提供的数据支持, 感谢参与讨论的白宇老师, 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] Soares D S L. *AJ*, 2007, 134: 71
- [2] Sun Y C, Xu C K, He X T. *CPL*, 2003, 20: 1652
- [3] Yee H K C, Ellington E. *ApJ*, 1995, 445: 37
- [4] Junqueira S, de Mello D F, Infante L. *A&AS*, 1998, 129: 69J
- [5] Wong K C, Blanton M R, Burles S M, et al. *ApJ*, 2011, 728: 119W
- [6] Kauffmann G, White S, Guiderdoni B. *MNRAS*, 1993, 264: 201
- [7] Alonso M S, Lambas D G, Tissera P B, Coldwell G. *MNRAS*, 2007, 375: 1017
- [8] Holmberg E. *Annals Obs. Lund*, 1937, 6: 1
- [9] Jeff C, Joel C B, Elizabeth J B, et al. *MNRAS*, 2010, 403: 1020C
- [10] Vorontsov-Velyaminov B A. *Atlas and catalogue of interacting galaxies*, Moscow: Moscow Univ. Press, 1959
- [11] Vorontsov-Velyaminov B A. *A&AS*, 1977, 28: 1
- [12] Arp H. *ApJS*, 1966, 14: 1A
- [13] Karachentsev I D. *Soobshch. Spets. Astrfiz. Obs.*, 1972, 7: 35
- [14] Barton E J, Geller M J, Kenyon S J. *ApJ*, 2000, 530: 660
- [15] Infante L, Strauss M A, Bahcall N, et al. *ASP Conference Series*, 2000, 209: 311
- [16] Lambas D G, Tissera P B, Alonso M S, et al. *MNRAS*, 2003, 346: 1189

- [17] Leopoldo I, Michae A S, Neta A B, et al. *ApJ*, 2002, 567: 155
- [18] Cervantes-Sodi B, Hernandez X, Park C. *MNRAS*, 2010, 402: 1807
- [19] Park C, Gott J R, Choi Y Y. *ApJ*, 2008, 674: 784
- [20] Xu C K, Domingue D, Cheng Y, et al. *ApJ*, 2010, 713: 330
- [21] Domingue D L, Sulentic J W, Xu C, et al. *AJ*, 2003, 125: 555
- [22] Freedman W D, Geller M J, Barton E J. *AJ*, 2006, 132: 197
- [23] Kartaltepe J S, Sanders D B, Scoville N Z, et al. *ApJS*, 2007, 172: 320
- [24] Xu C K, Sun Y C, He X T. *ApJ*, 2004, 603: L73
- [25] Patton D R, Pritchett C J, Yee H K C, et al. *ApJ*, 1997, 475: 29
- [26] Tonnesen S, Cen R. <http://arxiv.org/pdf/1111.0636v2.pdf>, 2012
- [27] Patton D R, Pritchett C J, Carlberg R G, et al. *ApJ*, 2002, 565: 208
- [28] de Ravel L, Le Fevre O, Tresse L, et al. *A&A*, 2009, 498: 379
- [29] Colless M, Dalton G, Maddox S, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 1039
- [30] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M, et al. *AJ*, 2002, 123: 485
- [31] Ellison S L, Patton D R, Simard L, et al. *AJ*, 2008, 135: 1877
- [32] Domingue D L, Xu C K, Jarrett T H, et al. *ApJ*, 2009, 695: 1559
- [33] 何香涛. 观测宇宙学, 北京: 北京师范大学出版社, 2007: 1
- [34] Carlberg R G, Pritchett C J, Infante L. *ApJ*, 1994, 435: 540
- [35] De Propris R, Jochen L, Simon P D, et al. *AJ*, 2005, 130: 1516
- [36] Xu C, Zhao Y H, Scoville N, et al. *ApJ*, 2012, 747: 85
- [37] Allison W S M, Sune T, Zirm A W. *ApJ*, 2012, 744: 85
- [38] Ilbert O, Tresse L, Zucca E, et al. *A&A*, 2005, 439: 863
- [39] Cowie L L, Gardner J P, Hu E M, et al. *ApJ*, 1994, 434: 114
- [40] Bell E F, De Jong R S. *ApJ*, 2001, 550: 212
- [41] Lotz J M, Davis M, Faber S M, et al. *ApJ*, 2008, 672: 177
- [42] Xu C, Sulentic J. *ApJ*, 1991, 374: 407
- [43] Steidel C C, Giavalisco M, Pettini M, et al. *ApJ*, 1996, 462: L17
- [44] Bell E F, Phleps S, Somerville R S, et al. *ApJ*, 2006, 652: 270
- [45] Larson R B, Tinsley B M. *ApJ*, 1978, 219: 46
- [46] Ellison S L, Patton D R, Simard L, et al. *MNRAS*, 2010, 407: 1514
- [47] Alonso M S, Tissera P B, Georgina C, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1081
- [48] Bridge C R, Appleton P N, Conselice C J, et al. *ApJ*, 2007, 659: 931
- [49] Barnes J E, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 471: 115
- [50] Mihos J C, Hernquist L. *ApJ*, 1996, 464: 641
- [51] Nikolic B, Cullen H, Alexander P. *MNRAS*, 2004, 355: 874
- [52] Mihos J C, McGaugh S S, de Blok W J G. *ApJ*, 1997, 477: L79
- [53] Kennicutt R C Jr, Roettiger K A, Keel I C. *AJ*, 1987, 93: 1011
- [54] Bushouse H A. *ApJ*, 1987, 320: 49
- [55] Kennicutt R C Jr. *ARAA*, 1998, 36: 189
- [56] Toomre A, Toomre J. *ApJ*, 1972, 178: 623
- [57] Hammer F, Flores H, Puech M, et al. *A&A*, 2009, 507: 1313
- [58] Delgado-Serrano R, Hammer F, Yang Y. B, et al. *A&A*, 2010, 509A: 78
- [59] Holmberg E. *Obs. Ser. II*, 1958, 136: 1
- [60] Reduzzi L, Rampazzo R. *ApLC*, 1995, 30: 1
- [61] Allam S S, Tucker D L, Smith J A, et al. *AJ*, 2004, 127: 1883
- [62] Deng X F, Yong X, Jiang P, et al. *A&A*, 2010, 53: 342
- [63] Schweizer L Y. *ApJS*, 1987, 64: 427
- [64] Peterson S D. *ApJ*, 1979, 232: 20
- [65] Honma M. *ApJ*, 1999, 516: 693

- [66] Kewley L J, Geller M J, Barton E J. *AJ*, 2006, 131: 2004
- [67] Rupke D S N, Veilleux S, Baker A J. *ApJ*, 2008, 674: 172
- [68] Scudder J M, Ellison S L, Torrey P, et al. *MNRAS*, 2012, 426: 549S
- [69] Kewley L J, Rupke D, Zahid H J. *ApJ*, 2010, 721L: 48
- [70] Le Fevre O, Abraham R, Lilly S J, et al. *MNRAS*, 2000, 311: 565
- [71] Zepf S E, Koo D C. *ApJ*, 1989, 337: 34
- [72] Lopez-Sanjuan C, Cucciati O, Le Fevre O, et al. *A&A*, 2013, 553: A78
- [73] Bluck A F L, Christopher J C, Rychard J B, et al. *MNRAS*, 2009, 394L: 51
- [74] Schmidt M. *ApJ*, 1968, 151: 393
- [75] Schechter P. *ApJ*, 1976, 203: 297
- [76] Lin H, Yee H K C, Carlberg R G, et al. *ApJ*, 1999, 518: 533
- [77] Casteels K, Patton D. *Environment and the Formation of Galaxies: 30 years later*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 61
- [78] Efstathiou G, Ellis R S, Peterson B A. *MNRAS*, 1988, 232: 431
- [79] Haan S, Schinnerer E, Emsellem E, et al. *ApJ*, 2009, 692: 1623H
- [80] Sanchez S F, Gonzalez-Serrano J. *A&A*, 2003, 406: 435
- [81] Keel W C, Kennicutt R C Jr, Hummel E, et al. *AJ*, 1985, 90: 708
- [82] Sanders D B, Soifer B T, Elias J H, et al. *ApJ*, 1988, 325: 74S
- [83] McGurk R C, Max C E, Rosario D J, et al. *ApJ*, 2011, 738: 2
- [84] Li C, Kauffmann G, Wang L, et al. *MNRAS*, 2006, 373: 457
- [85] Darg D W, Kaviraj S, Lintott C J, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1552
- [86] Ellison S L, Patton D R, Mendel J T, et al. *MNRAS*, 2011, 418: 2043

Review of the Galaxy Pair Selection and Research Progress

ZHANG Cong-hui, SUN Yan-chun

(*Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: A galaxy pair comprises two gravitationally bound galaxies, which are physically connected. It has been studied for over 70 years since Holmberg introduced this concept in 1937. Early research of galaxy pairs is restricted by the observation technologies, insufficient data and poor data completeness. In recent years, galaxy pair selection and related research have been improved greatly as a result of the advanced observation technologies, especially the multiple bands sky survey. Adding all the galaxy pairs in literature, we find that 1.1×10^5 pairs have been studied, most of which are at range of low redshift. So far there is no uniform criteria for galaxy pair selection. Astronomers choose different criteria according to their research subject, which lead to the different results.

Galaxy pairs are the the most gravitationally compact systems among galaxy populations and the best locations to study the interaction or merger between galaxies. Galaxy interaction or merger influences the properties of galaxies on many aspects. It can change the morphology of galaxies, trigger star formation and enforce nuclear activity. It is one of the main drivers for the formation of massive early-type galaxies.

In this paper, the progress of galaxy pair studies is presented, including the number of selected galaxy pairs, the development and application of the selection criteria, etc. The completeness of the galaxy pairs and its influence is discussed as well.

Key words: galaxy pair; criteria; redshift; star formation; galaxy evolution; luminosity function

.....

《天文学进展》征稿启事

一、本刊刊登反映国内外天文学研究的最新进展和作者见解的述评、研究论文、前沿介绍、专题讲座、研究快报。反映新思路、新手段、新成果的短评优先发表。

二、来稿须包括：题名、作者署名、作者单位及所在地与邮政编码、摘要、关键词、正文、参考文献、英文摘要、英文关键词等。

三、来稿应论点明确、叙述精练、条理清晰、深入浅出，以利非本分支学科的读者阅读。

四、摘要应简明扼要地概括正文中的主要信息。采用第三人称的写法，不用“本文”、“作者”等作主语。稿件如果以中文发表，英文摘要应有近一页的篇幅。

五、关键词请尽可能参照 ApJ、MNRAS 和 A&A 共同采用的关键词表选用，可适当扩充。

六、稿件中引用论点、公式、图、表均需注明参考文献（按文中出现顺序编码，在右上角用小方括号标出）。正文后则按编码次序依本刊要求的编排格式列出相应的参考文献。

七、审定稿后需提供清稿样的电子文本。本刊采用中西文 Latex 系统软件排版，请从本刊网站 (<http://202.127.29.4/twxjz/index.htm>) 下载排版模版。

八、图、表务求精、简、规范，以配合文字阐明观点。公式务求精约，杜绝公式推导过程。

九、请勿一稿两投。来稿请通过 E-mail 发送至 twxjz@shao.ac.cn。

《天文学进展》编辑部

2013 年 8 月