

双城记——星系并合和星系对*

沈世银^{1,2,†} 袁方婷¹ 侯金良^{1,††}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 上海市星系宇宙学半解析实验室 上海 200234)

2015-01-04收到

† email: ssy@shao.ac.cn

†† email: houjl@shao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150404

A tale of two galaxies——galaxy mergers and galaxy pairs

SHEN Shi-Yin^{1,2,†} YUAN Fang-Ting¹ HOU Jin-Liang^{1,††}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

(2 Shanghai Key Lab for Astrophysics, Shanghai 200234, China)

摘要 在重子世界中, 星系是宇宙构成的砖块, 但是星系在宇宙中的分布却不是随机的。在大尺度上, 星系的分布是网状的; 在小尺度上, 星系往往也会成对存在, 比如本地星系群中的银河系和仙女座大星云。星系对最终会发生并合, 而这个并合过程是星系增长的主要途径之一。对星系对进行的观测研究能够帮助人们理解星系的相互作用和增长过程。文章重点介绍了现代星系巡天中对星系对进行的观测, 特别是中国的重大科学工程郭守敬望远镜在其中所发挥的作用。

关键词 星系并合, 星系对, 数字化巡天, 郭守敬望远镜

Abstract Galaxies are building blocks of the Universe. However, their distribution is not random. On a large scale, they have a net-like distribution, but on a small scale they form pairs, like our Milky Way and the Andromeda galaxy. Galaxy pairs finally merge into one system. Merging is one of the most important approaches for galaxies to assemble mass, and research on galaxy pairs can help us understand galaxy interaction and mass assembly. This paper focuses on the observation of galaxy pairs in modern astronomical surveys and the important role played by the data collected by the Guo Shou-Jing telescope (LAMOST) in the study of galaxy pairs.

Keywords galaxy mergers, galaxy pairs, digital sky survey, LAMOST

1 星系及其在宇宙中的分布

直到20世纪早期, 人们眼中的星系还不过是银河系中发亮的云块而已, 即“星云”。对这些星云的认识可谓少之甚少。1920年进行的天文世纪大辩论, 将河外星系的研究拉开了序幕。世纪大辩论是天文学家沙普利(Harlow Shapley)和柯蒂斯(Heber Doust Curtis)之间进行的对“星云”理解的辩论。其中沙普利认为星系是银河系内的天

体, 而银河系即是整个宇宙。而柯蒂斯认为星系是与银河系同样尺度的河外天体, 是宇宙中岛屿一样的存在。这场争论直到1924年才有了明确的结果: 哈勃等科学家测算出了仙女座大星云的距离, 确定了这些“亮云”其实是和我们所在银河系同样尺度的庞然大物。随后, 1929年, 哈勃发现和证实了哈勃定律, 即星系的距离和星系的退行速度成正比, 也就是说宇宙在膨胀。基于哈勃定律, 根据星系的红移(退行速度)可以准确地确

定星系在大尺度上的距离。此后，星系天文学飞速发展，人们对宇宙的认识有了质的飞跃。现在，我们知道星系是可见的宇宙中的基本构成单元，它们由数千亿颗恒星构成，也包含了气体、尘埃等物质，甚至还包含我们目前尚未知道其物理本质的暗物质。

星系形态多样，哈勃根据星系的形状将星系分为旋涡星系、椭圆星系和不规则星系，即著名的哈勃音叉图(图1)。其中，椭圆星系(E)具有平滑的光度分布，成椭圆形。根据扁率，椭圆星系又细分为E0到E7几类。E7为最扁长的椭圆星系。旋涡星系(S)的特征是具有扁平的盘和从星系中心伸展出的旋臂。旋涡星系进一步分为Sa,

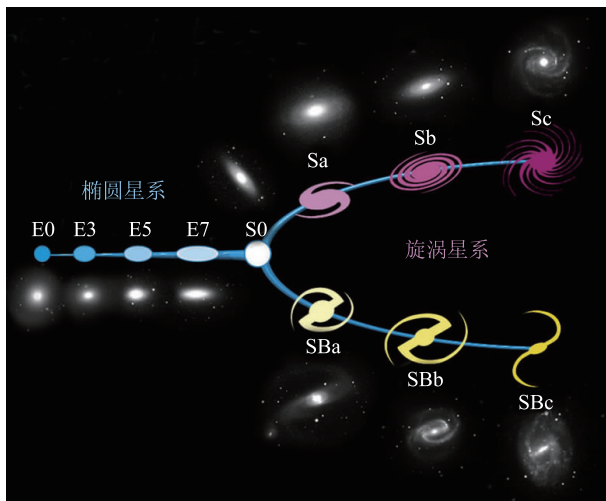


图1 星系的哈勃分类(E表示椭圆星系，S表示旋涡星系，SB表示棒旋星系。图片来自 <http://en.wikipedia.org>)

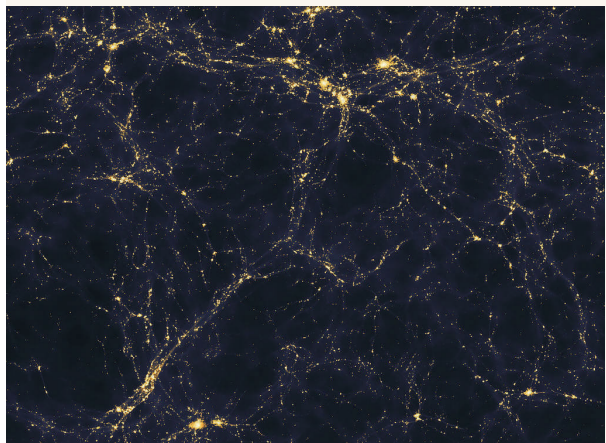


图2 星系在大尺度上成网状分布(图中亮块为星系。图片来自 <http://en.wikipedia.org>)

Sb, Sc几类。简单来说，从Sa到Sc，旋臂缠绕变松，星系中心的核球变小。有些旋涡星系中心有棒状结构，从而被归类为棒旋星系(SB)。按照与旋涡星系同样的细分方法，棒旋星系也被分为a, b, c三类。我们注意到图1中还有一类星系被称为棱镜星系(S0)，这些星系具有核球和星系盘，但是光度分布十分平滑，没有旋臂，是椭圆星系和旋涡星系之间的过渡种类。除了这几种星系外，没有任何确定特征的星系被称为不规则星系。这些星系的光度分布成斑状，而且不具有对称性。星系的哈勃分类虽然基于形状，但是却和星系的性质有着密切的联系。同类的星系具有类似的颜色、气体含量、金属丰度以及动力学性质。因此，这种分类方法在天文学中被普遍使用。

综上所述，宇宙中的星系极具多样性。然而在大尺度的宇宙结构中，星系又仅是一个基本构成单元。在长程的引力相互作用下，星系和星系之间构成了各种复杂的星系系统。这些系统包括小尺度上的星系对、星系群、星系团，一直到大规模上的纤维状、网状的超星系级结构(图2)。在这些系统中，星系对可以说是最小的也是最简单的一种系统，正如双星系统对应于恒星系统一样。

2 星系对的观测和定义

星系对的发现记录可以追溯到18世纪，Pierre Méchain在1781年首先注意到NGC5195和M51在空间构成了一对距离很近的“星云”(图3)。尽管如此，在18世纪，人们对星系还没有一个物理上的认识，更不用说有关星系对的物理图像了。有关星系对的系统性研究是在20世纪30年代哈勃发现哈勃定律并建立起河外星系天文学之后。

在早期的星系对的研究中，星系对的定义主要是基于天球上的投影，只要两个星系靠得比较近，就认为是星系对。比如，在Lundmark等人1927年的研究中^[1]，两星系被认为是星系对的条件是它们在天球上的角距离小于其中较大星系的直径。而在Holmberg 1937年的研究中^[2]，选取星系对的条件则为两个星系之间的角距离不超过两

个成员星系直径之和的两倍。

我们知道,仅由角距离选择出来的星系对,有可能完全由于空间上的投影效应所造成(尽管概率较低)。因此,我们需要从观测上获得两个星系之间的物理距离。但是,两个星系之间的物理距离到现在为止并没有好的办法加以直接测量。可测量的参量主要是两星系在空间上的投影距离 P 和两者退行速度差(红移) ΔV 。由于星系的退行速度反映的不仅仅是宇宙的整体膨胀(距离),而且还包括星系自身在小尺度动力学环境中的运动速度(又称为本动速度),因此星系对中的两个成员星系的退行速度差更多反映的是两者的本动速度在视线方向上的分量之差,而不是两者的距离在视线方向的分量之差。

目前,从观测上来说,星系对的定义仍然主要基于 P 和 ΔV 。研究表明,当两个星系的空间投影距离 P 小于100 kpc(千秒差距)¹⁾, ΔV 小于500 km/s时,它们之间就存在可观测到的相互影响^[3]。因此,这样的两个简单判据成为现在大多数与星系对相关的研究所采用的判据。尽管如此,如何选择临界的 P 和 ΔV 的数值来定义星系对其实并没有达成共识,因为星系对本身又处在各种不同的复杂环境当中。

在星系对的研究中,为了区分各种不同的环境,还有一种研究策略是仅研究那些动力学上孤立的系统。这种研究考虑的是,两个星系要构成一个物理上的星系对,应该要求这两个星系之间的相互作用远大于周围其他星系对它们的作用。因此,要定义这种孤立的星系对系统,不仅需要考虑两个星系之间的距离以及两星系的物理性质,还需要考虑周围的其他星系对它们的影响^[4]。这样定义的优点是显然的,但是,正是由于其定义的复杂性,这种方法会给样本带来复杂的选择效应。

3 星系对与星系并合

在物理上,一般认为星系对构成一个引力束缚系统,也就是说,两个星系的轨道运动围绕其质心进行。但是和简单双星体系不同的是,由

1) 1 秒差距(pc)=3.26 光年。



图3 星系 M51(右)和 NGC5195(左)构成星系对(图片来自 Fort Lewis 学院天文台)



图4 星系的并合过程(图中显示发生相互作用的两星系处在不同的并合阶段,从左至右并合逐渐完成。此图为哈勃望远镜所拍摄。图片来自 <http://hubblesite.org>)

于星系是一个多体体系,以及暗物质晕的存在,星系对的两个成员之间会发生复杂的相互作用,如动力学上的扰动、潮汐、摩擦等。当相互作用的两个星系的轨道能量足够低的时候,两个星系还会迅速发生并合(图4)^[5]。星系的并合在大尺度结构形成的层级理论中占有非常重要的地位。该理论认为,星系以及其所属的暗物质晕通过不断地并合来聚集物质,从而形成现有的规模。

星系的并合在星系的形成和演化过程中起着至关重要的作用。并合过程对星系本身的影响十分巨大。在20世纪70年代,Toomre A和Toomre J用数值模拟的方法研究了星系的碰撞和并合。他们提出,剧烈的并合可以导致气体内流,在短时期内形成大量恒星,即星爆过程^[6]。在Toomre A和Toomre J并合理论提出之后,Larson和Tinsley即通过观测发现,并合确实可以引起大量的恒

星形成，从而在观测上验证了 Toomre A 和 Toomre J 的理论^[7]。

在 Toomre A 和 Toomre J 以及 Larson 和 Tinsley 的先驱工作之后，星系并合的研究取得了很大的进展。一般认为，两个星系的并合可以按照参与并合的星系质量和性质，分为主并合(major-merge)和次并合(minor-merge)，干并合(dry-merge)和湿并合(wet-merge)^[2]。两星系质量相差较小的并合为主并合，而星系质量相差较大的则为次并合。对于主并合，两星系的性质都会发生很大改变。而在次并合中，质量较大的星系性质变化很小，并合后质量较小的星系类似于被吸收了。如果两个并合星系中存在较多的气体，这样的并合会触发大量的恒星形成，因此被称为湿并合。而如果两个星系中的气体在并合之前已经被消耗完毕，这时候的并合过程则称为干并合。显然，一个既“湿”又“主”的并合会对星系的性质产生极大的影响。比如，一般认为，两个进行主并合的富含气体的旋涡星系最终将形成一个椭圆星系。

尽管星系并合的基本图像现在已经清楚，但是关于并合过程的细节仍然存在很多悬而未决的问题。正因为如此，我们对星系并合过程在整个星系形成和演化过程中所起的定量作用仍然不清楚。比如，由并合引起的恒星形成在整个宇宙恒星形成历史中所占的定量贡献是多少？^[8]由并合引起的中央黑洞的增长对整个黑洞增长历史的贡献又是多少？^[9]要定量地回答这些问题，目前主要有两种研究方法。一是利用数值模拟方法，采用 N 体或流体动力学方法分步模拟星系并合过程中的暗物质、恒星和气体之间的引力相互作用，结合一些模型，参数化并合过程的恒星形成、黑洞吸积等物理过程，从而对整个并合过程中的各种物理过程获得定量的估算^[10]。但是，在这种模拟过程中，关键的物理过程的参数其实还是依赖于观测约束。

除了数值模拟外，另外一种研究方法就是，利用大的星系对样本从统计上研究星系的并合过程^[11]。天文学是一门观测科学，无法对研究对象

进行实验，无论从时间还是从空间尺度上我们都不可能获得一个星系并合过程的完整图像。对于一个星系对来说，我们获得的是其并合过程中的从某一个特定角度观测的在某一特定时间上的切片。但是，如果我们有一个很大的而且完备的星系对观测样本，对不同的星系对来说，我们相当于获得了从不同角度观测的处于不同并合阶段的星系并合过程。也就是说，基于现代巡天给出的大样本星系对的观测数据，我们可以利用统计的研究方法，将星系的并合过程重新“解码”。

4 现代星系巡天与星系对的研究

如前所述，在建立星系对样本并开展星系相互作用的研究过程中，一个通常的问题是，两个在天球投影上非常靠近的星系，完全可能只是投影效应，两者之间不一定存在物理上的相互作用。只有星系对的成员都有精确的红移测量，才可能部分去除投影效应。因此，在星系对研究中，光谱信息对认证星系对有着不可替代的作用。

比起传统的较为费时的利用狭缝获取光谱的方法，现代的光纤光谱仪可以同时获取多个星系的光谱，为积累天体光谱数据提供了重要的仪器支持。已有多个巡天项目旨在获取大量天体的光谱，其中十分具有代表性的包括美国的斯隆数字化巡天(Sloan Digital Sky Survey, 简称 SDSS)^[3]和我国的郭守敬望远镜巡天项目等。

4.1 斯隆数字化巡天与星系对

斯隆数字化巡天(SDSS)使用位于美国新墨西哥州阿帕其观测站的 2.5 m 光学望远镜(图 5)对全天近 1/4 的天区进行了观测。在 SDSS 前两期(2000—2008 年)的光谱观测中，其一次观测可以同时获得 640 个目标的光谱^[4]，是当时世界上获取光谱效率最高的望远镜^[12]。基于其多光纤光谱的观测模式，SDSS 的前两期巡天最重要的遗产就是获得了一个星等上完备的有光谱测量的星系样

2) http://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_merger.

本(具体为r波段星等亮于17.77),该样本又被称为SDSS的主星系样本^[13]。该样本包含近8000平方度内的70万个星系的光谱,光谱波长的覆盖范围为3800—9200 Å,分辨率约为3 Å每像素,其红移测量的精度可以达到10 km/s。由于SDSS同时包含星系的多色测光和光谱信息,且样本数据具有高度的完备性和一致性,因此,利用SDSS的数据对本地星系的各项物理性质的统计研究取得了巨大的进展。

但是在星系对的相关研究上,SDSS的数据却不够理想。其主要原因是,SDSS光谱观测中的“光纤碰撞”效应给星系对样本带来了很大的不完备性。具体来说,对于SDSS,虽然光纤的有效直径只有2角秒,但是由于每根光纤的周围还有很厚的包层,在同一次观测中,任意两根光纤之间的最近距离不能小于55角秒。也就是说,如果一个星系对的两个成员在天球投影上的距离小于55个角秒的话,那么一次观测中最多只能有一个成员可以分配到光纤,只能有一个获得红移观测。只有在那些两次不同的观测有所重复的天区,这种空间距离小于55角秒的星系对成员才可能都获得光谱观测(图6)。但是,为了追求观测效率,也就是尽可能覆盖更大的天区,SDSS中这样重复的天区是有限的。

SDSS的主星系样本的平均红移在0.1左右,55角秒在红移0.1处对应的投影距离恰好约为100 kpc。因为这个光纤碰撞效应,SDSS主星系样本的红移观测的完备性在90%左右。但是,对于星系对样本来说(定义为 $P < 100$ kpc, $\Delta V < 500$ km/s),其完备性只有1/3左右。这种不完备性使得SDSS中的星系对样本偏向于低红移以及物理上距离较大的星系对,而这种样本的有偏性将给相关的统计研究工作带来较大的复杂性和不确定性^[14]。

4.2 郭守敬望远镜巡天与星系对观测

郭守敬望远镜,又称为大天区面积多目标光

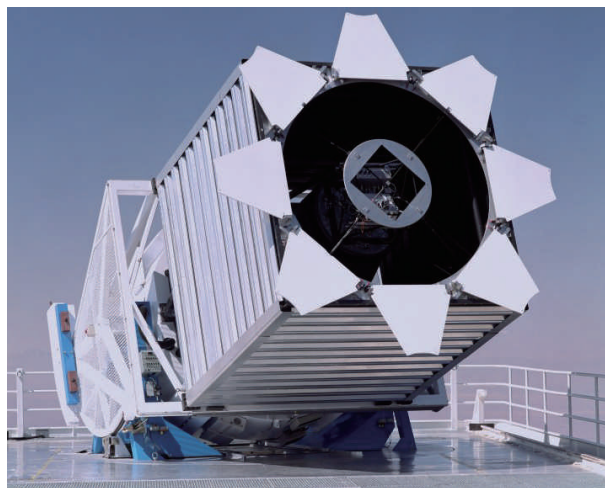


图5 位于美国新墨西哥州阿帕其观测站的2.5 m光学望远镜,用于斯隆数字巡天(SDSS)项目(图片来自SDSS网站:<http://www.sdss.org>)

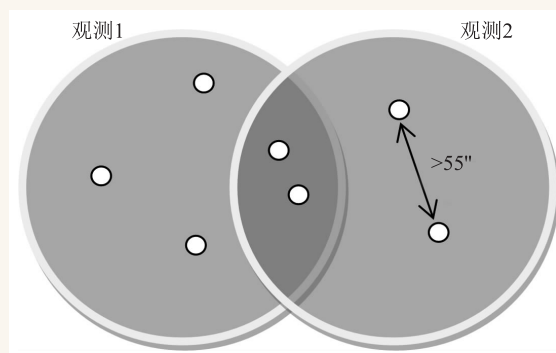


图6 光纤碰撞效应(同一次观测中任意两根光纤之间的距离不能小于55角秒。只有位于两次观测的重合天区,距离小于55角秒的星系对才可能都被分配到光纤)

纤光谱天文望远镜(The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, 简称为LAMOST)⁵⁾,是我国自主研制的大型天文科学装置。这是一台大视场兼备大口径的创新型望远镜,并且应用了薄镜面主动光学加拼接镜面主动光学技术。其有效口径约为4 m,视场达20平方度,焦面板上配备有4000个可遥控的光纤配置单元,能同时获得4000个天体的光谱,是目前世界上光谱获取率最高的望远镜。LAMOST的光谱覆盖的波长范围为3700—9000 Å,光谱分辨率和SDSS相当^[15]。

3) <http://www.sdss.org>。

4) 在SDSS的第三期观测计划(2008—2014年)中,其一次光纤光谱观测的数目被扩展为1000个。

由于观测地条件的限制(天气天光等)以及国际上其他河外巡天计划(如SDSS)的进展, LAMOST目前主要聚焦于恒星巡天, 以期解决恒星物理和银河系结构的重要科学问题。尽管如此, 河外星系的巡天仍然是LAMOST巡天的的重要组成部分。SDSS中由于光纤碰撞效应而未获得光谱观测的主星系样本就是LAMOST河外巡天的一个组成部分。这些星系在LAMOST巡天中被称为补充星系样本, 数目有68772个。

该补充星系样本和SDSS的主星系样本一样分布在约8000平方度的天区中。这些补充星系样本的数密度较低(仅每平方度约9个), 因此在LAMOST巡天中被赋予了较高的优先级。另一方面, 由于星系是面源, 其光谱观测相比于同样亮度的恒星来说, 需要更长的曝光时间才能获得同样的信噪比。因此, 在LAMOST正式巡天中, 星系观测源放在观测条件较好、曝光时间较长的板

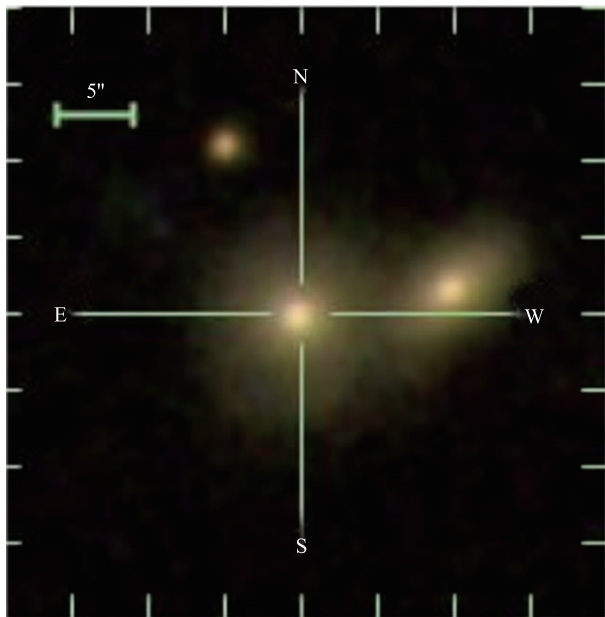


图7 一个通过LAMOST和SDSS新证认的邻近星系对的例子($Ra=200.439$, $Dec=22.137$)。星系图像来自于SDSS。在SDSS中, 左边星系的光谱红移为0.0581, 但右边的星系没有进行光谱观测。LAMOST给出的该星系的红移测量值为0.0585, 因此可证认这两个星系为一对物理上的邻近星系对)

块(M Plate)中进行观测。由于M plate的观测条件要求较高, 目前的观测数目还较少, 因此, LAMOST中获得光谱观测的补充样本数目也还比较少。到2014年9月为止, 在68772个补充星系样本中, 获得LAMOST光谱观测和红移测量的星系约3500个, 其中3000个为LAMOST提供的唯一红移⁶⁾。在这些观测数据中, 观测质量较好且红移测量较为精确的约占一半。

虽然说LAMOST观测的补充星系样本还只占总的补充星系星表的一小部分(约5%), 但是却具有较高的科学价值。如前所述, 这些补充星系样本大部分在天球投影上有一个邻近星系(小于55角秒)。因此, 它们有很大的概率是物理上的星系对(即具有相同的红移), 通过对比这些补充星系的红移和其邻近星系的红移, 即可有效地证认它们是否是真实的星系对。图7中给出这样一个例子, 左边的星系在SDSS中获得了光谱观测, 其红移为0.0581, 右边的星系虽然 r 波段星等为16.57, 但由于光纤碰撞效应, 在SDSS中未能进行光谱观测, 该星系属于LAMOST河外巡天的补充星系样本, 并获得了较好质量的光谱观测, 其测量的红移值为0.0585。由这两个星系的红移可知它们的退行速度差 $\Delta V=120$ km/s, 再加上这两个星系之间的投影距离仅为13 kpc, 因此可认定这两个星系是物理联系的邻近星系对。

基于3000个LAMOST独家提供的星系红移样本, 我们将它们与SDSS的图像和光谱数据库进行匹配, 并对图像和光谱逐一进行了人工检查, 最终证认出850对星系对样本(定义为 $P<100$ kpc, $\Delta V<500$ km/s)。为了说明我们这850个星系对样本的特殊性和重要性, 我们在图8中给出这850对星系对的成员星系之间距离分布的直方图(实线), 并和单独基于SDSS数据的星系对样本(虚线)作比较。首先, 从图8的上半部分给出的角距离分布可看出, SDSS数据给出的星系对样本(虚线)在55角秒处存在严重的选择效应。由于这个选

5) <http://www.lamost.org>。

6) 部分LAMOST中的补充星系样本在SDSS的第三期巡天中也获得了光谱观测结果, 也就是说, LAMOST观测不再是唯一的。另外500个星系就属于这样的情况。

择效应，SDSS 数据给出的星系对样本会偏向于物理距离较大的系统(图 8 下半部分)。我们基于 LAMOST 得到的星系对样本(实线)则和 SDSS 的数据互补，它们的角距离大部分小于 55 角秒，一半以上的投影距离小于 50 kpc。

综上所述，如果我们能将基于 LAMOST 数据得到的星系对样本和原来 SDSS 提供的星系对样本相结合，这样可以大大提高星系对样本的完备性，并有利于改正星系对样本中的选择效应。基于更大、更完备的星系对样本，我们对星系对的统计研究以及对星系并合这一星系形成和演化中的重要物理过程的理解将更上一层楼^[6]。

5 总结与展望

在本文中，我们首先简单介绍了星系和星系对的观测发展历史以及星系对与星系并合这一物理过程在星系形成和演化中的重要作用。在此基础上，我们重点阐述了现代星系巡天 SDSS 和 LAMOST 巡天在星系对的观测研究中所起的作用及二者的特色和优势。最后，我们介绍了利用 LAMOST 现有数据在星系对的证认工作方面所取得的一些进展。

在 SDSS 中，虽然星系对样本具有高度的不完备性，但由于其主星系样本数目巨大，可获得的星系对样本仍远远超过我们基于 LAMOST 数据的结果。我们的科学研究也仍然以 SDSS 的星系

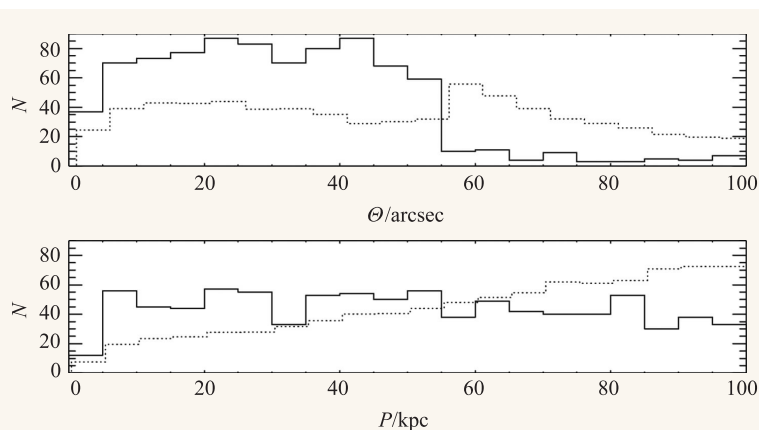


图 8 星系对样本的成员距离分布直方图(上图横坐标 Θ 是天球坐标上的投影角距离(单位是角秒)，下图横坐标 P 是物理空间上的投影距离(单位是千秒差距)。实线直方图是利用 LAMOST 和 SDSS 数据证认出的星系对样本，而虚线是 SDSS 数据中的星系对样本。虚线的面积被归一化到和实线相同)

对样本为主，以 LAMOST 证认的星系对作为补充。但是，随着 LAMOST 观测的进行，我们的补充星系样本将能获得更多的有效红移观测，因此可证认出的星系对数目也将进一步提高。

目前，我们正力求利用 LAMOST 的高效光谱观测模式获取所有补充星系样本的准确红移测量。如果这一目标完成，将使得 SDSS 主星系样本的红移完备性从 90% 提高到 100%。这样 100% 完备的红移样本的科学意义是巨大的，该完备样本除了将在本文所述的在星系对和星系并合的相关研究中起到重要作用外，还有望帮助星系的小尺度结构上的环境、卫星星系等多个研究方向取得重要进展。如果这一目标完成，LAMOST 虽然只贡献 10% 的红移测量，但是它的成果必将和 SDSS 一起成为天文学研究的一项重大遗产。

参考文献

- [1] Lundmark K. *Medd. Uppsala Obs.*, 1927, 30:3
- [2] Holmberg E. *Annals Lund Obs.*, 1937, 6:5
- [3] Nikolic B, Cullen H, Alexander P. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2004, 355:874
- [4] Karachentsev I D. *Publ. Special Astrophys. Obs. Acad. Sci. USSR*, 1972, 7:3
- [5] Springel V, Di Matteo T, Hernquist L. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2005, 361:776
- [6] Toomre A, Toomre J. *Astrophys. J.*, 1972, 178:623
- [7] Larson R B, Tinsley B M. *Astrophys. J.*, 1978, 219:46
- [8] Elbaz D *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2011, 533:119
- [9] Hopkins P F, Hernquist L, Cox T J *et al.* *Astrophys. J. Suppl.*, 2008, 175:356
- [10] Di Matteo T, Springel V, Hernquist L. *Nature*, 2005, 433:604
- [11] Ellison S L *et al.* *Astron. J.*, 2008, 135:1877
- [12] York D G *et al.* *Astron. J.*, 2000, 120:1579
- [13] Stoughton C *et al.* *Astron. J.*, 2002, 123:485
- [14] Patton D R, Atfield J E. *Astrophys. J.*, 2008, 685:235
- [15] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q *et al.* *RAA*, 2012, 12:723
- [16] Shen S *et al.* *RAA*, 2015, in preparation