

卫星星系动力学状态对星系属性的依赖

裴 远[†] 王慧元

(中国科学技术大学天文学系 合肥 230026)

摘要 基于Sloan Digital Sky Survey (SDSS)数据,采用van den Bosch等发展的自适应方法从星系样本中挑选出中央星系及其卫星星系,然后研究卫星星系速度弥散与中央星系/卫星星系属性的关系.和之前的研究一致,卫星星系平均速度弥散随着中央星系质量增大而增大,并且红中央星系所在星系群的速度弥散比蓝中央星系要大.发现平均而言,在红中央星系周围,卫星星系的速度弥散和其质量之间没有明显关联.但是在蓝中央星系周围,质量大的卫星星系速度弥散偏大,而红卫星星系的速度弥散要比蓝卫星星系偏大.进一步的研究表明,在相同的暗晕中,卫星星系速度弥散和卫星星系质量并不相关.有意思的是,如果红中央星系周围同时有红和蓝卫星星系,那么红卫星星系的速度要小,对其中的物理机制进行了初步的探讨.此外还发现,若中央星系周围只有红或蓝(质量大或小)的卫星星系时,有红(或质量大)的卫星星系所在的暗晕的速度弥散要大于有蓝(或者质量小)的卫星星系的暗晕,这表明卫星星系属性对于暗晕质量测量是有影响的.

关键词 星系: 暗晕, 星系: 运动学与动力学, 方法: 统计

中图分类号: P152; **文献标识码:** A

1 引言

星系是宇宙的基本组成单元.星系不仅是金属元素和恒星的形成场所,而且反映了宇宙的时空结构.现今宇宙中的相当一部分星系以星系团或星系群的形式聚集,其中星系的数密度是宇宙中星系平均数密度的几十到几百倍^[1].星系群和星系团是宇宙中质量最大的维里化物体,而且由于它们包含很多亮星系,可以在很远的距离外被观测到,因此是研究宇宙的有力工具.在主流的星系形成理论中,星系形成于暗物质晕提供的引力势阱之中,很多具体的重子物理过程都和暗物质晕的质量以及其他属性息息相关^[2],因此确定星系团/群所在的暗物质晕的质量有着重要意义.前人使用多种方法获得暗晕质量,包括利用引力透镜^[3-4]、利用X射线辐射^[5-6]以及abundance matching方法^[7],各有其优劣之处.

动力学方法是测量暗晕质量的重要方法之一^[8-10].在暗晕基本处于维里化状态的假设下,卫星星系的速度在统计上和暗晕的维里速度相当,这意味着卫星星系的速度弥散可以作为暗晕质量的量度.质量非常大的暗晕往往对应着星系团,其中含有足够数量

2016-11-29收到原稿, 2017-02-07收到修改稿

[†]peiyuan@mail.ustc.edu.cn

的卫星星系, 可以较为可靠地拟合速度分布, 从而获得速度弥散; 对于质量较小的暗晕, 除了近邻的星系群(例如本星系群), 可以观测到的卫星星系数目太少, 无法获得可靠的速度弥散. 所以早期的相关研究通常聚焦于大质量星系团^[11]或本星系群^[12-13].

近来的研究通过假设具有相似属性(例如光度、质量)的中央星系位于质量相近的暗晕中, 就可以将它们的卫星星系放在一起统计研究, 这样得到的速度弥散具有可靠的信噪比^[14-15]. 近些年来, 随着天文观测技术的不断发展, 例如Sloan Digital Sky Survey (SDSS)^[16], Two Degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS)^[17]等大尺度巡天项目的开展大大提高了星系的观测数量和质量, 从而大大提高了卫星星系动力学研究的数据质量. 在利用这些数据的前期工作中, 星系群/团成员的认定采用的是一种严格的选择标准^[18-20], 例如Norberg等^[20]为了尽量减小其他星系的污染, 排除了星系团附近的星系系统, 只考察密度较低区域的星系系统, 而Conroy等^[19]要求中央星系和卫星星系的光度具有显著的差异, 这导致符合标准的只有那些较孤立的星系. 这样从星系样本中选出的中央星系和卫星星系的数目均很少, 造成得到的速度弥散值有较大的统计误差. 同时由于中央星系的光度范围较小, 其所反映的暗晕质量范围也受到限制. van den Bosch等^[21]发展了一种自适应的方法来选择星系团/群(类似于本文使用的方法, 具体见下文), 这种方法打开了一扇大门, 让我们可以充分利用丰富的红移巡天数据去探索卫星星系的动力学状态, 并且使可以探索的暗晕范围扩大到从低于银河尺度暗晕(galactic-sized dark halo, $< 10^{12}h^{-1} M_{\odot}$, 其中 h 为哈勃常数, M_{\odot} 为太阳质量)到星系团尺度暗晕(cluster-sized dark halo, $\geq 10^{14}h^{-1} M_{\odot}$). 基于此方法前人进行了一系列研究^[8-10], 揭示了中央星系质量(光度)和所在暗晕质量(卫星星系速度弥散)之间的关系, 其依赖于中央星系的颜色, 并且存在一定的弥散. 前人的工作充分显示了动力学方法的可靠性.

本文将采用更大的星系样本(SDSS DR7), 利用动力学方法深入探讨卫星星系速度弥散与中央星系属性和卫星星系属性的依赖关系. 我们考虑的星系属性包括星系质量和颜色. 为了探究得到关系的物理本质, 尤其要注意不同依赖关系之间可能出现的简并效应. 例如速度弥散对于卫星星系属性的依赖既可以理解为所在暗晕质量对这个属性的依赖, 也可以理解为对卫星星系动力学状态的直接依赖, 与暗晕质量无关. 我们将仔细区分这些关系.

2 选星系群方法

本文所使用的星系数据来自Yang等^[7]为构造星系群(自本章起, 除非特指, 我们统一用星系群表示星系群/团)而采用的星系样本¹. 这个样本的主体来自SDSS DR7, 实际使用的是纽约大学进行改进后的结果(NYU-VAGC), 选择其中 r 波段视星等 >17.72 mag、红移范围在 $[0.01, 0.2]$ 之间、红移完备度大于0.7的星系, 共计599301个星系. 样本中另有2450个星系来自2dFGRS, 819个星系来自KSG-VAGC. 样本中还有36759个光纤碰撞星系和30个X射线星系团的中央星系. 这样, 星系样本总计639359个星系. 本文在使用时排除了上述最后两类星系, 最终共计602570个星系作为我们的研究对象.

研究发现星系的颜色具有双正态分布^[22], 据此可将其分为红星系和蓝星系两类. 由

¹<http://gax.shao.ac.cn/data/Group.html>

每个绝对星等bin下颜色分布的双峰平均值, 最佳线性拟合可得红蓝星系分界值^[23]

$$^{0.1}(g-r) = 1.022 - 0.0651x - 0.00311x^2, \quad (1)$$

其中 $x = ^{0.1}M_r - 5 \lg h + 23.0$, M_r 是 r 波段的绝对星等, g 、 r 分别表示红移为 0.1 处的 g 波段和 r 波段的视星等. 如果星系的颜色值比按其星等算出的此分界值大, 即为红星系, 反之则为蓝星系.

我们用之前的卫星星系动力学研究中通常采用的圆柱体方法来确定中央星系以及卫星星系^[18, 20-21, 24]. 如图 1 所示, 选取某种属性(红/蓝)的星系作为中央星系候选体, 以它所在位置为中心, 作一个 $R < R_h$, $|\Delta V| < (\Delta V)_h$ 的圆柱. 此处 R 为垂直红移方向的投影距离, ΔV 为视线方向的速度差. 在这个圆柱内, 如果它的质量比其他星系(并不要求和中央星系候选体具有相似属性)至少大 f_h 倍, 那么这个星系即为可能的中央星系. 然后分别以每个可能的中央星系为中心, 作 $R < R_s$, $|\Delta V| < (\Delta V)_s$ 的圆柱. 如果与中心处的星系相比较, 该圆柱中的其他星系(同样不要求和中心处的星系具有相似属性)质量至少小 f_s 倍, 那么中心处的星系即为中央星系, 其余星系为其卫星星系. 如果不满足该标准, 那么中心处的星系就不再可能为中央星系. 如果该圆柱中除中心处的星系以外没有其他星系, 那么它也不计入中央星系列表, 换言之, 我们考察的中央星系必须至少有一个卫星星系.

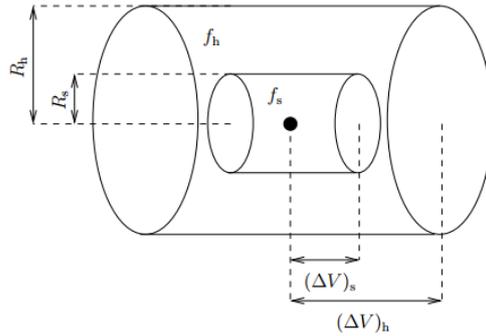


图 1 星系群的选择标准示意图^[9], 其中圆柱轴线沿视线方向, 具体说明见正文.

Fig. 1 Schematic diagram of a selection criterion^[9]. The axis of the cylinder is along the line of sight. See the text for details.

中央星系及其卫星星系的选择依赖于 6 个参数: R_h 、 $(\Delta V)_h$ 与 f_h 限定中央星系, R_s 、 $(\Delta V)_s$ 与 f_s 限定卫星星系. 在选择过程中还须考虑到, 有些卫星星系原本不属于其中央星系所在暗晕, 即物理上并不是该中央星系的卫星星系, 称为闯入者(interlopers). 还有一些星系, 本来不是其所在暗晕中质量最大的星系, 却被误选为中央星系, 称为非中央星系(non-central hosts). 参数的选择会影响这两类星系的数目. 要想减少闯入者的数目, 可以将 R_s 、 $(\Delta V)_s$ 与 f_s 取得尽量小些; 要想减少中央星系的数目, 可以将 R_h 、 $(\Delta V)_h$ 与 f_h 取得尽量大些. 当然, 从另一方面看, 以上选择也可能减少了中央星系和卫星星系的数目, 导致最终的统计结果由于星系数目过少而不准确.

在过去的很多研究工作中, 都将这 6 个参数设为定值. 实际上, 由于暗晕质量与其中央星系光度或质量正相关, 可以预见这些参数值也与所考虑的星系群有关, 取决于其中

央星系的光度或质量. 基于此想法, van den Bosch等^[21]采用了可变的参数来选取中央星系和卫星星系. 为获取尽可能多的中央星系和卫星星系, 同时尽量减少闯入者和非中央星系的数目, 并顾及到选取的中央星系光度范围不应过窄(文中利用星系光度选择星系群), 在利用模拟样本做了各种不同大小参数的测试后, 最终选取

$$R_h = 0.004\sigma_{\text{sat}}h^{-1} \text{ Mpc} , \quad (2)$$

$$(\Delta V)_h = 5\sigma_{\text{sat}} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} , \quad (3)$$

$$f_h = 1 , \quad (4)$$

$$R_s = 0.00075\sigma_{\text{sat}}h^{-1} \text{ Mpc} , \quad (5)$$

$$(\Delta V)_s = 2000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} , \quad (6)$$

$$f_s = 1 , \quad (7)$$

此处 σ_{sat} 表示卫星星系的速度弥散. 值得注意的是, σ_{sat} 是中央星系光度的函数, 这就自然地让不同的星系群有不同的选择标准. 此外, 在这样的数值选择下, R_h 和 R_s 大约分别对应于星系群所在暗晕的维里半径的2倍和0.375倍, 这也满足了同时减少闯入者和非中央星系污染的要求.

本文采用完全一样的圆柱参数来选取星系群样本. 唯一不同的是, 我们把速度弥散和中央星系的质量而非光度关联起来. 具体来说, 用多项式

$$\lg \sigma_{\text{sat}} = \lg \sigma_{10} + a_1 \lg M_{10} + a_2 (\lg M_{10})^2 \quad (8)$$

来刻画中央星系的质量 M_{host} 和卫星星系的速度弥散 σ_{sat} 之间的关系, 其中 $M_{10} = M_{\text{host}}/(10^{10}h^{-2} M_{\odot})$, σ_{10} 、 a_1 、 a_2 为参数. 这样, 确定每个星系团成员所需的6个参数, 其具体值便与中央星系的质量相联系. 之前的研究^[10, 21]多将星系光度作为选择标准, 即可能的中央星系比圆柱中其他星系至少亮 f_h 倍, 卫星星系比其中央星系至少暗 f_s 倍, 其他条件不变. More等^[10]分别以星系光度与星系质量为标准选群, 在此基础上研究中央星系光度或质量与其所在暗晕质量间的关系, 并探究中央星系的颜色对上述关系的影响. 结果发现, 当中央星系光度一定时, 红中央星系平均而言位于更大质量的暗晕中; 当中央星系质量一定时, 特别对于小质量中央星系, 红中央星系与蓝中央星系所在暗晕的质量差别不大. 可见: 相比中央星系光度, 中央星系质量能更好地和暗晕质量也即卫星星系的速度弥散相关. 我们也做过类似的检验, 发现结果确实如此. 所以此处我们利用星系质量而非星系光度作为选择星系群的标准.

这一选群方法依赖参数 σ_{10} 、 a_1 、 a_2 , 显然其数值可以通过迭代的方法来确定. 现将该方法详述如下. 第1步, 对上述中央星系候选体中的每一个星系, 分别以其为中心做上述圆柱, 判断其是否为中央星系, 若是的话找到它的卫星星系. 圆柱大小及判断标准由(2)–(8)式确定, 并将初始参数设定为 $\sigma_{10} = 193$ 、 $a_1 = 0.48$ 、 $a_2 = 0.13$. 第2步, 基于选取的中央星系和卫星星系样本, 估算卫星星系的速度弥散 σ_{sat} (见下文). 第3步, 利用(8)式拟合新获得的 $M_{\text{host}}-\sigma_{\text{sat}}$ 关系, 从而获得新的 σ_{10} 、 a_1 、 a_2 取值. 有了新的参数值后再迭代这3步过程, 直到获得的 $M_{\text{host}}-\sigma_{\text{sat}}$ 关系收敛为止. 此时选取的星系群样本就作

为我们最终的样本. 值得注意的是, 参数初值取自van den Bosch等^[21]设定的初值. 虽然其方法与此处略有不同, 而且使用的是星系光度作为选择标准, 但经过检验(选用不同参数初值, 按本文方法选择星系群), 参数初值的选择对最终结果影响不大, 所以此处即直接采用. 此外我们的测试显示, 通常迭代3-4次就能够得到收敛的结果.

有了星系群样本, 我们用如下方法获得卫星星系速度弥散 σ_{sat} . 每个中央星系-卫星星系对, 用如下公式获得速度差:

$$\Delta V = c \times [(1 + z_{\text{sat}})/(1 + z_{\text{host}}) - 1], \quad (9)$$

其中 c 为光速, z_{sat} 与 z_{host} 分别表示卫星星系与其中央星系的红移. 基于此数据并不能直接计算卫星星系的速度弥散, 因为星系群样本中还可能存在一定的闯入者. 我们需要获得 ΔV 的分布, 并进行细节处理.

由于大部分星系群中的卫星星系数目很少, 在单个星系群内统计 ΔV 分布必然造成很大误差. 为了获得可靠的信噪比, 可将具有相近质量的中央星系的星系群放在一起研究. 此处即按中央星系的质量将上述星系对划分为数个bin, 对每个质量bin内的星系对, 统计其 ΔV 的分布. 理论上, 星系群分布在暗晕中, 如果暗晕已经很好地维里化, 卫星星系相对中央星系的速度分布趋向高斯分布. 因此可以预见, 上述中央星系质量bin内的 ΔV 分布为高斯分布. 当然, 这是在不考虑误选闯入者影响的情形.

图2分别给出具有不同属性中央星系的 ΔV 的分布. 图中上下两行分别对应中央星系为红星系和蓝星系的星系群. 每行的两个子图分别表示两个中央星系质量bin内的速度分布(中央星系质量范围已在图中标出).

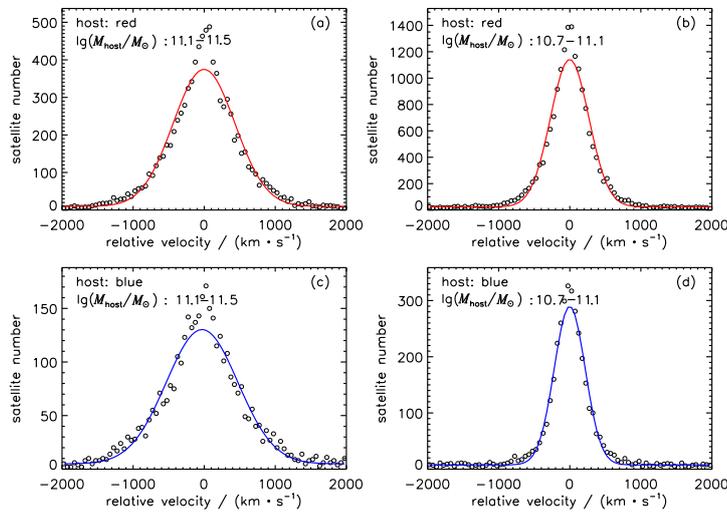


图 2 中央星系为红星系(上行)和蓝星系(下行)的星系群, 其两个中央星系质量bin内中央星系和卫星星系的相对速度分布. 中央星系质量范围在图中标出. 相对速度定义见(9)式.

Fig. 2 The distribution of the relative velocity between host and satellite galaxies for red (upper) and blue (lower) hosts in two mass bins as indicated in the panels. See Eq. (9) for the definition of the relative velocity.

由图2可见, 速度分布可以较好地拟合为高斯函数加上一个常数的形式, 此处常数表示闯入者的影响. 闯入者所占比重明显很小, 表明此选群方法确实能够很有效地去除闯入者. 拟合获得的高斯成分的速度弥散记作 σ_g , 并不直接用作卫星星系的速度弥散, 而是要经过进一步的误差修正. 考虑到每个星系的视向速度观测误差约为 $35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 则中央星系与卫星星系的相对速度误差取为 $\sqrt{2} \times 35 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} = 49.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. 最终所得卫星星系的速度弥散

$$\sigma_{\text{sat}} = \sqrt{\sigma_g^2 - 49.5^2}, \quad (10)$$

值得注意的是, 如果某中央星系质量bin内卫星星系太少, 高斯拟合结果将不可靠. 因此我们将少于100个星系对的bin从结果中舍去.

为了验证这种方法的可靠性, 我们不区分中央星系的属性, 对样本中的每个星系使用这种方法进行选群, 将所得星系群的卫星星系速度弥散值与More等^[10]的结果进行比较, 发现两者是一致的, 这说明本文的方法是可靠的.

3 卫星星系动力学研究结果

我们按照(1)式获得红星系和蓝星系两个样本作为中央星系的候选体. 对于每个样本中的每个星系, 我们都用上述圆柱体方法来确定其是否为中央星系及其卫星星系. 图3中左右两个子图分别展示了红中央星系和蓝中央星系星系群的卫星星系速度弥散随中央星系质量的变化关系, 每个子图中的红、紫、蓝、绿、黑5条曲线分别代表第1、2、3、4、5次迭代后得到的最佳拟合曲线(见(8)式). 曲线逐渐收敛, 表明迭代3-4次后星系群的组成不再发生大的变化.

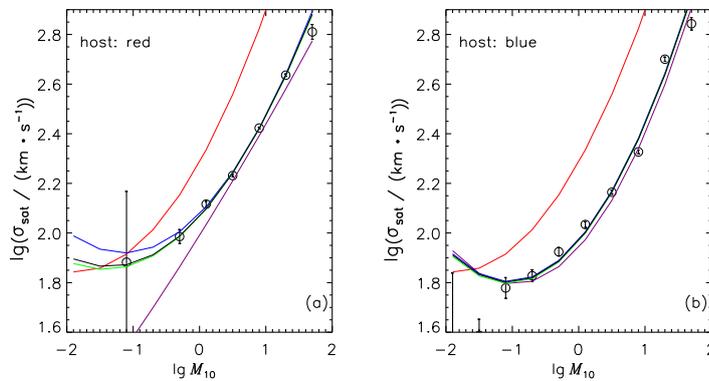


图3 卫星星系的速度弥散随中央星系质量的变化关系, 其中 $M_{10} = M_{\text{host}} / (10^{10} h^{-2} M_{\odot})$, 左右两个子图分别对应中央星系为红星系和蓝星系的星系群. 每个子图中的红、紫、蓝、绿、黑5条曲线分别代表第1、2、3、4、5次迭代选群后得到的最佳拟合曲线. 最后一次选群后得到的速度弥散值如带误差棒的空心点所示.

Fig. 3 The velocity dispersion of satellites as a function of host galaxy mass M_{10} , where $M_{10} = M_{\text{host}} / (10^{10} h^{-2} M_{\odot})$. The left and right panels show the results for red and blue hosts, respectively. And the red, purple, blue, green, and black lines show the best fitting curve of the first to fifth iteration, respectively. The circles with error bars show the data points calculated from the finally selected host-satellite sample.

图3中带误差棒的空心点表示最后一次迭代得到的结果. 如上文中提到, 速度弥散通

过拟合给定属性和质量的中央星系周围的卫星星系的相对速度分布来获得, 图2即给出具有不同属性中央星系的卫星星系相对速度分布. 将最后一次选出的星系群作为最终结果. 表1列出了具有不同属性中央星系的星系群的中央星系和卫星星系总个数. 如前所述, 我们也曾改变参数初值重新选群, 最终得到的最佳拟合曲线并未发生很大改变. 可见选群方法相当稳定, 结果与参数初值的选择无关.

表 1 选群结果
Table 1 The selected host-satellite sample

Host galaxy color	Host galaxy number	Satellite galaxy number
red	23619	36920
blue	8228	12909

为了更好地比较不同中央星系周围卫星星系的速度弥散, 我们把红中央星系和蓝中央星系的结果放在一张图上(见图4). 从整体上看, 无论红蓝中央星系, 其卫星星系的速度弥散随着中央星系质量的增大而增大(以下各图均反映此趋势). 理论上, 暗晕质量与中央星系质量正相关^[7], 且大质量暗晕的卫星星系速度弥散较大, 与上述总趋势相符. 但是, 比较两种星系群的速度弥散值, 两者并不相同: 在大部分中央星系质量范围内, 红中央星系所在星系群的速度弥散值都较蓝中央星系大; 在最大的两个中央星系质量bin, 蓝中央星系所在星系群的速度弥散值较大. More等^[10]也对比了红中央星系和蓝中央星系所在星系群的速度弥散, 结果并没有发现上述“交叉”趋势, 而是显示: 在各中央星系质量处, 均有红中央星系所在星系群的速度弥散值较大. 不过他们选取的样本红移范围较小($z < 0.072$), 结果并没有涉及到很大质量的中央星系. 王文婷^[25]发现红色中央星系所在的暗晕质量要比相同质量的蓝色中央星系更大. 总的来说, 我们的结果显示给定中央星系质量, 红中央星系所在星系群的速度弥散较大, 这暗示相对于蓝中央星系所在星系群, 其倾向于分布在质量较大的暗晕中.

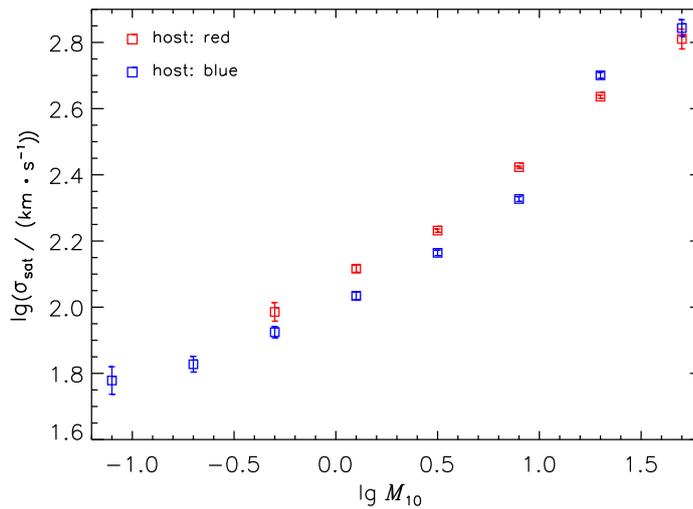


图 4 中央星系为红星系和蓝星系的星系群, 其卫星星系的速度弥散随中央星系质量的变化关系

Fig. 4 The velocity dispersion of satellites as a function of host galaxy mass for red and blue hosts

前人的研究主要分析的是中央星系的性质,如其光度、质量、颜色等与其卫星星系的速度弥散的关联,此处将探究卫星星系的性质对其速度弥散的影响,这对于我们了解星系形成的物理机制有着重要的意义.

图5显示的是按中央星系颜色分类的星系群,其不同性质的卫星星系的速度弥散随中央星系质量的变化关系,其中左边两个图反映的是红中央星系星系群,右边两个图反映的是蓝中央星系星系群.(a)、(c)探究的是速度弥散与卫星星系质量(M_{sat})的关系,其中卫星星系按其质量小于和大于其中中央星系质量的1/5分为两类.(a)中,在红中央星系周围,当中央星系质量较大时,小质量卫星星系与大质量卫星星系的速度弥散无显著差异;当中央星系质量较小时,大质量卫星星系的速度弥散稍微偏大,这应该是受卫星星系数目较少导致拟合误差的影响所致.可见总体上两类卫星星系的速度弥散差别不大.(c)中,在蓝中央星系周围,当中央星系质量较小时,大质量卫星星系的速度弥散比小质量卫星星系要大,而且这种差异明显比红中央星系周围显著;当中央星系质量较大时,小质量卫星星系的速度弥散稍微偏大,即出现微弱的“交叉”趋势,不过由于大质量的蓝中央星系较少,这一趋势有待进一步检验.(b)、(d)探究的是卫星星系颜色的影响.每幅图中的卫星星系分为红卫星星系和蓝卫星星系两类.在红中央星系周围,与蓝卫星星系相比较,红卫星星系的速度弥散出现明显的系统性偏大,且这个偏差随着中央星系的质量增加而减小.在蓝中央星系周围,同样发现这种趋势.

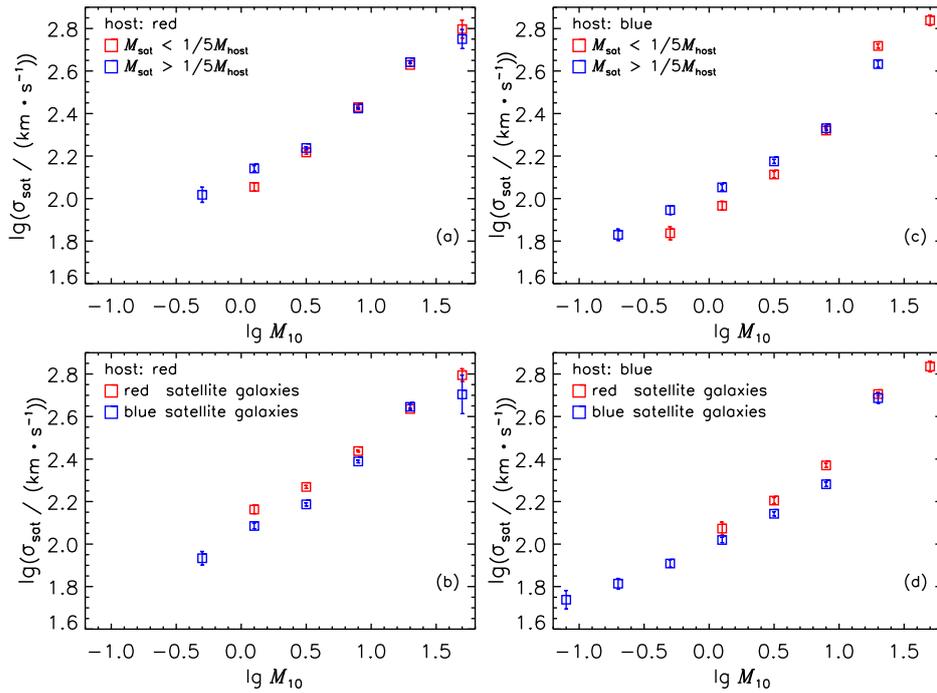


图5 不同性质的卫星星系的速度弥散随中央星系质量的变化关系. 左边两个图表示红中央星系星系群, 右边两个图表示蓝中央星系星系群. 上面一行的两幅图比较了大质量和小质量卫星星系的速度弥散, 其中 M_{sat} 表示卫星星系质量. 下面一行的两幅图比较了红和蓝卫星星系的速度弥散.

Fig. 5 The velocity dispersion-host galaxy mass relation for satellites with different properties. The left two panels show the results for red hosts, while the right two panels show those for blue hosts. The upper two panels compare the results between high and low mass satellites, where M_{sat} is satellite mass. The lower two panels compare the results between red and blue satellites.

上面展示的结果表明卫星星系的属性(质量和颜色)确实和其动力学状态存在一定的关联, 这些关联有时候依赖于中央星系的属性, 而且总体而言也较弱. 之前的研究通常把卫星星系的速度弥散 σ_{sat} 直接和所在寄主暗晕的质量关联在一起, 认为较大的速度弥散意味着较大的暗晕质量, 但是这样的解释过于简单化, 因为动力学方法通常是通过很多不同暗晕内的卫星星系叠加来获得可靠的结果, 可能混合了很多不同的物理机制. 以 σ_{sat} 和卫星星系颜色的相关性为例, 这种现象存在两种可能的物理原因: 其一, 卫星星系的速度弥散与其颜色属性并无直接关系, 而是由其所在暗晕的质量决定. 给定中央星系属性后, 红卫星星系倾向位于质量较大的暗晕中, 导致其速度弥散较大; 其二, 速度弥散与卫星星系的颜色直接相关, 也即在相同质量的暗晕中, 红卫星星系的速度弥散值倾向大于蓝卫星星系.

为了区分这两种潜在的物理可能性, 我们需要对所选星系群进行一定的区别对待. 在选出的星系群样本中, 有的星系群只有某种性质(例如红或蓝)的卫星星系, 有的星系群同时包含两种对应性质(例如红和蓝)的卫星星系. 为了进一步弄清卫星星系的性质与其速度弥散的关系, 我们首先在这些星系群中挑选出那些同时包含两种对应性质的卫星星系的星系群. 这样, 两种对应性质的卫星星系的速度弥散差异就不会是所在寄主暗晕质量不同导致的了. 但是需要注意的是, 通常在单个星系群中两种卫星星系的个数可能不一样, 如果个数差异也和质量有关的话, 就会在最终的统计结果中再次引入质量因素或者其他复杂因素. 为了避免这一效应, 在接下来的统计中, 两种对应性质的卫星星系在每个星系群中都取相同的数目. 如假设某个星系群有红卫星星系2个, 蓝卫星星系3个, 那么两个红卫星星系全部用于统计, 在蓝卫星星系中随机抽取2个作为统计之用. 对于任一类中央星系(给定质量、颜色), 我们就可以同时获得其周围两种卫星星系的速度分布, 然后分别利用高斯+常数方法拟合速度分布获得 σ_{sat} . 结果展示在图6中. 由于满足条件的星系较少, 只有较大质量的中央星系有结果.

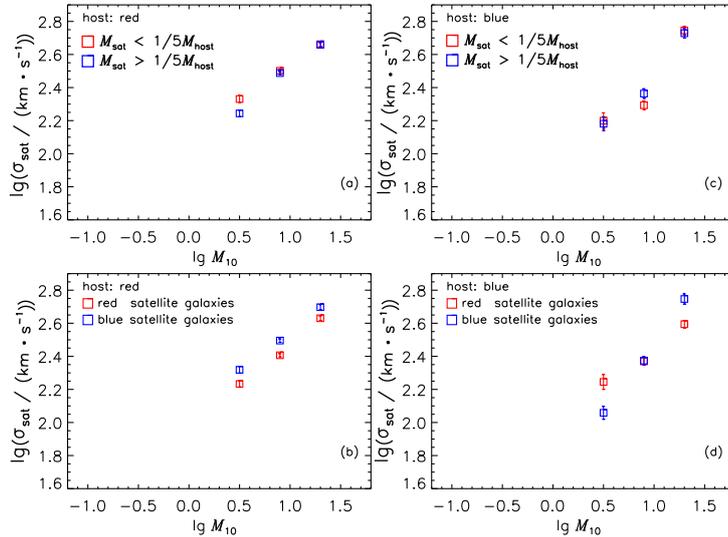


图 6 同图5, 但选取的是同时包含至少一个大质量和小质量卫星星系的星系群(上面两幅图), 以及同时包含至少一个红和蓝卫星星系的星系群(下面两幅图).

Fig. 6 Similar to Fig.5. But here, we only show the results for groups with at least one high mass and one low mass satellites (upper panels) and with at least one red and one blue satellites (lower panels).

对于速度弥散对卫星星系质量的依赖问题, 前面的结果显示: 在蓝中央星系周围, 卫星星系的速度弥散和其质量具有一定的相关性, 可当我们选取同一星系群里不同质量的卫星星系时, 结果显示大质量和小质量卫星星系的速度弥散差异基本上消失了. 这表明在同一个暗晕中, 不同质量的卫星星系速度弥散统计上并没有本质区别. 更有意思的结果是: 当卫星星系分为红/蓝时, 同一星系群中表现出明显不同的动力学状态. 在红中央星系周围, 红卫星星系的速度弥散明显比蓝卫星星系要小. 这一结果让人惊讶, 因为和之前的结果(图5)正好相反. 这直接表明, 在给定暗晕中, 红卫星星系的运动速度统计上就是要慢于蓝卫星星系. 当中央星系为蓝星系时, 红蓝卫星星系的速度弥散没有太显著的区别, 这也和之前的结果并不一致. 这种不一致性强烈地反映了存在多种机制导致了图5中的情形, 也即红蓝卫星星系所在暗晕质量不同, 或者暗晕质量相同但是两者速度弥散不同.

在图6 (b)中我们进一步尝试探讨在相同质量的暗晕中, 红中央星系周围红卫星星系的速度弥散比蓝卫星星系小的原因. 数值模拟显示了暗晕以及暗物质的速度弥散随其到暗晕中心的距离减小而增大^[26-31]. 图7显示的是同时包含投影距离 R 大于和小于 $1/2R_s$ 的卫星星系的红中央星系星系群, 其两种卫星星系的速度弥散随中央星系质量的变化关系, 其中 R_s 表征暗晕半径. 可以看出, 距离较近的卫星星系速度弥散较大, 这与数值模拟的结果相符. 因此图6 (b)中红卫星星系的速度弥散较小可能是其与中央星系的距离较大所致. 我们进一步检查了其中红卫星星系和蓝卫星星系的平均投影距离, 却发现红卫星星系更靠近中央星系. Nascimento等^[32]最近在研究中等红移星系时也发现类似的现象, 暗示不同动力学特征的暗晕中红与蓝卫星星系的运动学状态可能不同^[32-34]. 如果我们选取的同时有红、蓝卫星星系的星系群样本比同时有远、近距离卫星星系的星系群样本要显著年老, 而红星系又受到动力学摩擦的影响速度降低, 那么发现的这些矛盾可能可以得到调和. 显然, 红卫星星系速度弥散较小的原因还需更多研究来进一步探讨.

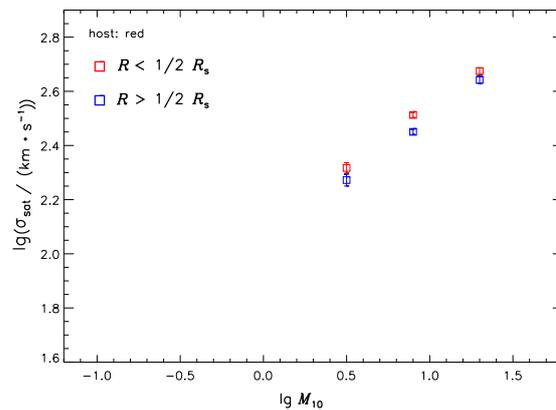


图 7 同图5的左下图, 但选取的是包含至少两个卫星星系的星系群, 其中至少有一个投影距离小于 $1/2R_s$ 的卫星星系, 同时至少有一个投影距离大于 $1/2R_s$ 的卫星星系.

Fig. 7 Similar to the lower left panel of Fig.5. But here, we only show the results for groups with more than two satellites, among which, at least one has the projected distance to the host less than $1/2R_s$ and at least one has the projected distance to the host more than $1/2R_s$.

为了更完整地分析卫星星系的性质与其速度弥散的关系, 我们再从原先的星系群样本中挑选出那些只包含某种性质的卫星星系的星系群, 然后按它们的卫星星系性质分类, 类似图5, 研究其速度弥散随中央星系质量的变化关系, 如图8所示. 在去掉了同时包含对应性质的卫星星系之后, 相比较之前的结果, 有的相关性变得更加显著, 而有的相关性基本消失了. 图8 (a)、(c)显示, 与只有小质量卫星星系的星系群相比, 那些只有大质量卫星星系的星系群, 其卫星星系的速度弥散出现明显的系统性偏大. 这一结果与图5中相比明显更加显著, 原因很简单, 我们去除了同时包含大质量和小质量卫星星系的星系群, 而在同一星系群中, 这两者之间的速度弥散并没有显著差异, 自然就使得图5中的速度弥散差异变得不明显. 从另外一个角度也反映出, 给定中央星系属性, 卫星星系质量越大, 暗晕质量也越大. 图8 (b)、(d)显示, 与只有蓝卫星星系的星系群相比, 那些只有红卫星星系的星系群, 其卫星星系的速度弥散出现明显的系统性偏大. 这一结果同样比图5中要显著很多, 反映出给定中央星系属性, 包含红卫星星系的暗晕质量也偏大. 由于红星系质量一般来说要比蓝星系偏大一些, 这一结果和图8 (a)、(c)可能有着相同的起源. 我们同样检查了图8 (b)中红卫星星系和蓝卫星星系的平均投影距离, 同样发现红卫星星系更靠近中央星系, 这也可以部分解释红卫星星系的速度弥散较大.

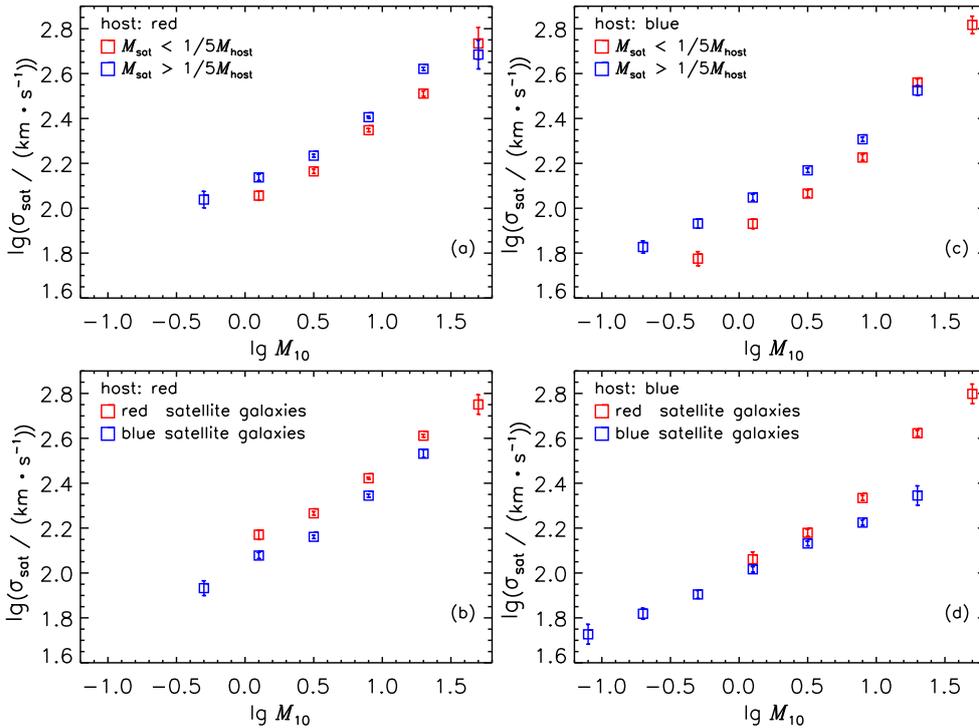


图 8 同图5, 但选取的是只包含某种性质的卫星星系的星系群. 上面两幅图中, 红色方框表示只包含小质量卫星星系的星系群, 蓝色方框表示只包含大质量卫星星系的星系群. 下面两幅图中, 红色方框表示只包含红卫星星系的星系群, 蓝色方框表示只包含蓝卫星星系的星系群.

Fig. 8 Similar to Fig.5. But here we only show the results with special satellites. For the upper two panels, the red squares show the results for groups with only low mass satellites, and the blue squares for groups with only high mass satellites. For the lower two panels, the red squares show the results for groups with only red satellites, and the blue squares for groups with only blue satellites.

4 总结

现在的星系形成理论认为星系形成于暗晕之中,暗晕的属性对星系的形成与演化有主导性的影响.观测上已经发展出很多测量暗晕质量的方法,利用卫星星系动力学研究暗晕质量在近几年获得了越来越多的关注,尤其是van den Bosch等^[21]发展了一套自适应方法来确定中央星系及其卫星星系.这一方法假设中央星系属性和暗晕质量(卫星星系速度弥散)之间有着一对一的相关性,在这一假设的基础上,之后的研究很好地确定了中央星系质量/光度和暗晕质量/卫星星系速度弥散的平均关系,发现这个关系依赖于中央星系的颜色,并且存在一定的弥散.

基于纽约大学对SDSS的第7次发布数据进行改进后的星系样本,我们采用van den Bosch等^[21]发展的方法详细研究了卫星星系动力学.除了探讨卫星星系速度弥散和寄主星系属性(质量、颜色)的关系之外,还详细研究了其与卫星星系属性(质量、颜色)的关系.这些研究除了可以帮助我们了解暗晕质量对卫星星系属性的依赖,还可以告诉我们卫星星系的动力学状态是否和其本身属性相关,为我们研究星系形成提供了有力的观测证据.

首先考虑中央星系属性的影响.我们发现:若按中央星系的颜色分类,一般来说,给定中央星系质量,红中央星系所在星系群的速度弥散比蓝中央星系偏大,这和之前的结果一致.我们还发现当中央星系质量很大时,蓝中央星系所在星系群的速度弥散较大,这可能是大质量时颜色分类不够精确所致.可见,中央星系的颜色与速度弥散有关.

接下来研究卫星星系本身的属性与其速度弥散的关系.在红中央星系周围,卫星星系的速度弥散和其质量之间并没有明显关联,但是在蓝中央星系周围,两者存在较强关联,卫星星系质量越大,速度弥散越大;无论红蓝中央星系,红卫星星系的速度弥散要比蓝卫星星系大.总的来说,卫星星系动力学状态和其性质之间的关系相对较弱.

卫星星系动力学状态和其性质之间的关系存在两种可能的解释.一种可能是:卫星星系属性和所在暗晕质量之间存在相关性,例如给定中央星系属性,红卫星星系所在暗晕质量大,所以其速度弥散大;另一种可能是:卫星星系属性和暗晕质量无关,和其动力学状态直接关联,例如在给定质量的暗晕中,红卫星星系的速度弥散较大.如果后者正确,将会为星系形成模型提供额外的限制.为了区分这两种可能的解释,我们挑选了一类特殊的星系群样本进行研究.这类特殊的星系群同时包含两种对应性质的卫星星系.研究这类星系群的动力学状态可以有效排除暗晕质量不同的效应.

我们发现在这类特殊的星系群中,无论中央星系属性如何,卫星星系的速度弥散和其质量之间没有相关性.红卫星星系的速度弥散要比蓝卫星星系小,这直接反映了给定暗晕质量的情况下,红卫星星系的速度整体比蓝卫星星系要“慢”,和整体样本中的结果相反.我们发现这些红卫星星系的质量要比蓝卫星星系大,到中央星系的距离也比蓝卫星星系小.这可能预示着一些复杂的物理过程.

去除了这类特殊的星系群后,我们又考察了只包含某类性质卫星星系的星系群的卫星星系动力学状态.我们发现,无论中央星系是红还是蓝,卫星星系质量大的速度弥散大,而且这一结果的显著度要明显高于整体样本.同样的,红卫星星系的速度弥散要比蓝卫星星系大.由于红卫星星系的质量在统计上要大于蓝卫星星系,速度弥散对于质量和颜色的依赖本质上可能是一致的.这强烈表明:给定中央星系属性后,暗晕质量和卫

星星系质量之间存在系统的关联, 卫星星系质量越大, 暗晕质量越大. 可见, 卫星星系质量也是一个影响暗晕质量的重要参数. 我们还发现红卫星星系更靠近中央星系, 这也可以部分解释红卫星星系的速度弥散较大.

参 考 文 献

- [1] Mo H J. *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge New York: Cambridge University Press, 2010
- [2] White S D M, Rees M J. *MNRAS*, 1978, 183: 341
- [3] Hoekstra H, Yee H K C, Gladders M D. *ApJ*, 2004, 606: 67
- [4] Mandelbaum R, Seljak U, Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2006, 368: 715
- [5] Rykoff E S, Evrard A E, McKay T A, et al. *MNRAS*, 2008, 387: L28
- [6] Leauthaud A, Finoguenov A, Kneib J P, et al. *ApJ*, 2010, 709: 97
- [7] Yang X, Mo H J, van den Bosch F C, et al. *ApJ*, 2007, 671: 153
- [8] More S, van den Bosch F C, Cacciato M. *MNRAS*, 2009, 392: 917
- [9] More S, van den Bosch F C, Cacciato M, et al. *MNRAS*, 2009, 392: 801
- [10] More S, van den Bosch F C, Cacciato M, et al. *MNRAS*, 2011, 410: 210
- [11] Carlberg R G, Yee H K C, Ellingson E, et al. *ApJ*, 1996, 462: 32
- [12] Little B, Tremaine S. *ApJ*, 1987, 320: 493
- [13] Lin D N C, Jones B F, Klemola A R. *ApJ*, 1995, 439: 65
- [14] Erickson L K, Gottesman S T, Hunter J H Jr. *Nature*, 1987, 325: 779
- [15] Zaritsky D, Smith R, Frenk C, et al. *ApJ*, 1993, 405: 464
- [16] York D G, Adelman J, Anderson J E Jr, et al. *AJ*, 2000, 120: 1579
- [17] Colless M, Dalton G, Maddox S, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 1039
- [18] Brainerd T G, Specian M A. *ApJ*, 2003, 593: L7
- [19] Conroy C, Newman J A, Davis M, et al. *ApJ*, 2005, 635: 982
- [20] Norberg P, Frenk C S, Cole S. *MNRAS*, 2008, 383: 646
- [21] van den Bosch F C, Norberg P, Mo H J, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1302
- [22] Li C, Jing Y P, Kauffmann G, et al. *MNRAS*, 2007, 376: 984
- [23] Yang X, Mo H J, van den Bosch F C. *ApJ*, 2008, 676: 248
- [24] Conroy C, Coil A L, White M, et al. *ApJ*, 2005, 635: 990
- [25] 王文婷. *天文学报*, 2013, 54: 584
- [26] Jing Y P, Borner G, Valdarnini R. *MNRAS*, 1995, 277: 630
- [27] Battaglia G, Helmi A, Morrison H, et al. *MNRAS*, 2005, 364: 433
- [28] Wojtak R, Lokas E L, Gottlöber S, et al. *MNRAS*, 2005, 361: L1
- [29] Faltenbacher A, Diemand J. *MNRAS*, 2006, 369: 1698
- [30] 骆初嘉. *天文学报*, 2015, 56: 554
- [31] Luo C J. *ChA&A*, 2016, 40: 483
- [32] Nascimento R S, Ribeiro A L B, Lopes P A A. *MNRAS*, 2017, 464: 183
- [33] Fadda D, Girardi M, Giuricin G, et al. *ApJ*, 1996, 473: 670
- [34] Menci N, Fusco-Femiano R. *ApJ*, 1996, 472: 46

The Dependence of Satellite Galaxy Kinematics on Galaxy Properties

PEI Yuan WANG Hui-yuan

(Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

ABSTRACT The relation between the satellite kinematics and the properties of host and satellites is investigated in this paper. Our host and satellite sample are selected from Sloan Digital Sky Survey (SDSS) data by adopting a self-adapted method developed by van den Bosch et al. Consistent with the previous studies, the average velocity dispersion increases with the mass of host galaxy, and is larger for red hosts than for blue hosts. We find that, on average, the velocity dispersion is independent of satellite mass around red hosts, however it increases with satellite mass around blue hosts, and red satellites have larger velocity dispersions than their blue counterparts. Our further investigations show that in the same halo, the velocity dispersions are independent of satellite mass, regardless of the host color. Interestingly, around the red host, red satellites tend to have smaller velocity dispersion than the blue ones. It implies some interesting processes. In addition, we also find that, if host galaxies only have red or blue (high mass or low mass) satellites, the system with red (high mass) satellites have larger velocity dispersions than blue (low mass) satellites. It suggests that satellite properties are important for dark halo mass measurement.

Key words galaxies: dark halo, galaxies: kinematics and dynamics, methods: statistical