



星系空间取向的理论和观测研究

康熙^{1*}, 王鹏^{1,2}, 罗煜^{1,2}, 夏千里^{1,2}, 潘恒星^{1,2}

1. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;

2. 中国科学院大学研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: kangxi@pmo.ac.cn

收稿日期: 2016-07-28; 接受日期: 2016-08-30; 网络出版日期: 2017-01-10

国家重点基础研究发展规划 (编号: 2015BC857003, 2013CB834900)、江苏省杰出青年基金 (编号: BK20140050) 和国家自然科学基金重点项目 (编号: 11333008) 资助

摘要 星系在空间的分布并非随机, 在不同的尺度上呈现不同的排列特征. 在星系和星系团等中小尺度上, 卫星星系的分布倾向于分布在中央星系的主轴方向上. 在大尺度上, 中央星系的主轴倾向于指向大尺度的物质分布, 如平行于大尺度的纤维结构. 在更大尺度上, 星系的主轴之间也有一定的取向关联. 此外, 星系的角动量也与大尺度物质分布有一定的关联. 本文将回顾星系空间取向的相关理论和观测研究的进展, 指出小尺度上星系的空间各项异性主要是由非球对称的暗物质晕决定的, 与大尺度物质分布的相关性正是冷暗物质模型下结构形成的典型特征, 研究星系在不同尺度上的各项异性分布有利于理解星系形成物理和限制暗物质、暗能量模型.

关键词 大尺度结构, 星系形成, 暗物质, 数值模拟, 星系演化

PACS: 03.67.Mn, 03.65.Ud, 03.67.Ac

1 引言

目前流行的宇宙结构形成模型是冷暗物质 (Cold Dark Matter, CDM) 模型, 在这种模型下, 结构形成是自下而上, 等级成团而形成的. 宇宙早期的微小扰动被引力逐渐放大, 形成了所谓的暗物质晕 (暗晕), 小质量暗晕之间通过进一步的合并, 吸积物质成长为更大质量的暗晕, 该模型预言的宇宙结构跟观测在不同的尺度上符合得非常好^[1]. 星系一般在暗晕中间形成, 并跟随暗晕的并合进入到更大质量的暗晕中. 暗

晕成长过程中留下的痕迹体现在今天看到的星系分布上面, 因此研究星系在不同尺度的空间排列和取向, 不仅可以揭示暗物质晕的形成历史、暗晕和大尺度物质分布的关联, 而且可以限制星系本身的形成过程. 近十年的研究对不同尺度上的星系排列、空间取向进行了大量观测和理论研究, 取得了不少成果. 关于这一方向的最新总结性文章, 也可以参考 Joachimi 等人^[2]2015年的相关工作.

星系、星系团处在不同质量的暗晕内, 在暗晕中心的一般称为中央星系, 而处在中央星系周围, 且处

引用格式: 康熙, 王鹏, 罗煜, 等. 星系空间取向的理论和观测研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049803

Kang X, Wang P, Luo Y, et al. The spatial alignment of galaxies on different scales: A review on the theoretical and observational progress (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 049803, doi: 10.1360/SSPMA2016-00349

在暗晕维里半径以内的其他星系称为卫星星系. 一般来说中央星系光度、质量最大, 而卫星星系的质量较小, 且有一定的分布特点. 利用星系的图像, 天文学家可以测量星系的形状, 大多数情况下星系的形状可以用一个椭圆来描述. 对于椭圆, 可以定义一个主轴、次轴和短轴 (详见第 2.3 节). 最近二三十年内人们研究了各种可能的星系排列现象, 不同尺度的各种可能的相关性可见文献 [3] 中的图 3. 在图 1 中给出了几种常见的星系空间取向, 本文将主要讨论这几种星系空间排列.

图中左边示意单个暗晕内部的排列, 中央星系 C 的主轴为 CM 方向, S 为暗晕维里半径内的卫星星系, 这里最常见的排列是卫星星系的位置相对于中央星系主轴的分布, 即 $\theta(SCM)$ 的分布. 与暗晕占有数模型 [4] 类似, 这种分布可以认为是单个暗晕项类型 (One Halo Term). 在较大尺度上人们一般关心两个暗晕项类型 (Two Halo Term), 即中央星系 C 与 C' 的主轴之间的分布 ($C'O$ 为星系 C' 的主轴方向), 即图中 $\theta(C'OM)$ 的分布. 如果在 C 处大尺度物质结构的分布为 CF 方向 (CF 一般指 Filament 方向, 其有不同种类的定义, 常见的一般用大尺度物质分布的 Hessian 矩阵 [5] 来描述), 中央星系与大尺度物质的相关可以表示为 $\theta(FCM)$ 的分布. 在第 3 节中将详细介绍这几种排列的观测和理论研究进展. 下面先简单回顾其观测进展.

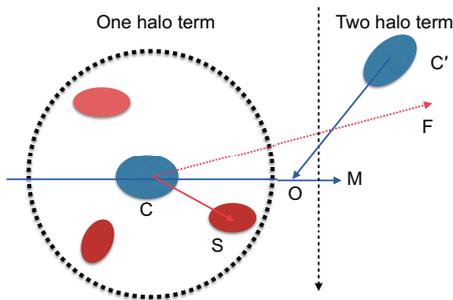


图 1 (网络版彩图) 单个暗晕项类型: 暗晕主轴方向 CM , 卫星星系空间分布 CS , 暗晕所处的大尺度方向 CF 的示意图. 两个暗晕项类型: 暗晕之间的主轴方向分布 $\theta(C'OM)$ 示意图

Figure 1 (Color online) Illustration of one halo term: CM is the direction of the major axis of halo. CS describes the distribution of satellite galaxies. CF is the direction of the Large Scale Structure where the halo is embedded. Illustration of two halo term: $\theta(C'OM)$ describes the alignment distribution of major axis of two halos.

早期研究星系排列主要集中在星系团. 1967 年 Rood 和 Baum [6] 研究了 Coma 星系团, 他们并没有发现卫星星系的分布与中央星系的指向有任何关系, 紧接着 Sastry [7] 研究了 9 个 Abell 星系团, 发现 5 个星系团内卫星星系的分布倾向于分布在中央星系的主轴沿线方向, 但是不同星系团之间有很大的差异. Holmberg [8] 于 1969 年指出, 对于场星系, 其卫星星系的分布与星系团内的相反: 场星系的卫星星系分布倾向于分布在中央星系的次轴上.

Lynden-Bell [9] 于 1976 年指出, 同样的分布也适用于我们所在的银河系, 即银河系的大部分卫星星系分布在与银盘垂直的一个平面上, 这就是所谓的 Holmberg 效应. 早期的研究受限于星系样本数量和形状测量精度. 2006 年 Yang 等人 [10] 利用斯隆数字化巡天 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 的数据发现卫星星系倾向于分布在中央星系的主轴, 且与星系的性质相关, 该结论引发大量后续研究并被证实.

利用大规模的星系样本, 人们还研究了大尺度星系之间的形状相关. 2000 年 Pen 等人 [11] 利用 Tully 星表给出的 12122 个旋涡星系研究了星系角动量的相关性, 首次测量了星系在大尺度上的角动量相关性. 2002 年, Brown 等人 [12] 利用 SuperCOSMOS 星表给出的星系形状, 直接测量了星系的椭圆率相关性. 随后的研究者 [13-17] 利用更大规模的星表进一步测量了星系的形状相关及其对星系性质的影响. 研究者还利用数值模拟和半解析模型研究了不同尺度上的星系形状相关, 具体内容将在第 3 节进行介绍. 由于星系在大尺度上的形状相关对于利用弱引力透镜测量宇宙学参数非常重要: 在利用剪切场相关信号导出宇宙学参数时, 必须扣除星系的内在形状相关. 关于星系内在形状相关对弱引力透镜宇宙学应用的影响, 有兴趣的读者可以参考最近的两篇综述文章 [18, 19].

星系的形状也与其所在的大尺度物质环境有相关性. 不同于前面两种星系取向, 星系形状与大尺度环境的相关研究开展得较晚. 一方面此研究需要大量的星系样本, 另一方面在定义大尺度环境时缺乏清晰明确的定义和方法 [20]. 空间任意处的大尺度环境一般有如下几种 [5]: 空洞 (Void)、薄片 (Sheet or Wall)、丝状结构 (Filament)、节点 (Node or Knot), Trujillo 等人 [21] 在 2007 年利用两度视场星系红移

巡天 (2 Degree Field Galaxy Redshift Survey, 2dFGRS) 和 SDSS 首次研究了星系的角动量与 Void 的相关性, 发现星系的角动量处在 Void 的表面. Lee 和 Erdogdu^[22]、Paz 等人^[23]、Tempel 等人^[24] 和 Zhang 等人^[25] 分别于 2007 年、2008 年、2013 年和 2015 年利用不同的数据进一步研究了星系角动量与大尺度的相关. 这些研究的一个普遍结论是星系的角动量与大尺度环境存在相关性, 且与星系质量有关: 大质量星系的角动量倾向与 Filament 的方向垂直, 而小质量星系的角动量有平行于 Filament 的趋势. Kang 和 Wang^[26] 利用数值模拟对该依赖性进行了详细研究. Zhang 等人^[27] 还发现星系的主轴也与 Filament 方向有很好的关联.

2 理论背景

为了理解不同尺度上星系的排列现象, 这里介绍与这些排列相关的背景理论和相关知识.

2.1 Zel'dovich 近似理论与大尺度结构

观测上星系的分布呈现出宇宙网络结构 (Cosmic Web) 分布, 最早的 CFA 巡天就发现星系在空间并非均匀分布, 而是呈现出不同的大尺度结构, 如空洞、薄片、丝状结构. 研究发现这些宇宙网络结构的形成可以很好地用 Zel'dovich^[28] 于 1970 年给出的线性近似理论来描述. 考虑一个无压、均匀流体系统, 流体粒子在欧拉空间的坐标为 \mathbf{x} , 其在拉格朗日坐标的位置为 q , 在线性阶段, 流体粒子以不变的速度 $S(q)$ 运动, 其坐标满足

$$\mathbf{X}(q, D(t)) = q + D(t)S(q), \quad (1)$$

这里 $D(t)$ 是线性密度增长因子. 由质量守恒, 可以得到其密度变化为

$$\rho(x, t) = \bar{\rho}(t)J[\mathrm{d}\mathbf{x}/\mathrm{d}\mathbf{q}]^{-1}, \quad (2)$$

其中 $J[\mathrm{d}\mathbf{x}/\mathrm{d}\mathbf{q}]$ 是雅克比行列式, 由粒子初始位置 q_i 决定, 形变张量 $d_{ij} = -\partial s_i/\partial q_j$, 在正交化后, 可以得到 d_{ij} 的本征值分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, 对应的本

征方向分别为 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$, 可以得到

$$\rho(x, t) = \bar{\rho}(t)/[(1 - D(t)\lambda_1)(1 - D(t)\lambda_2)(1 - D(t)\lambda_3)],$$

因此可以看到密度无穷大 (塌缩) 首先出现在 $1 - D(t)\lambda_1 = 0$, 即沿着 \mathbf{e}_1 方向. 上式具体推导过程也可参见 Hidding 等人^[29] 的工作或 Mo 等人^[30] 的星系形成教科书.

可以看到, 在 Zel'dovich 近似的表述下物质首先沿着 \mathbf{e}_1 方向塌缩, 形成一个所谓的薄平面分布 (Pancake), 一旦满足 $1 - D(t)\lambda_2 = 0$, 物质沿着 \mathbf{e}_2 方向的塌缩也开始, 形成了丝状结构 (Filament), 最终第 3 个方向的塌缩也开始, 形成所谓的节点 (Knot, 有时也叫 Node 和 Cluster).

上面的描述给出了一个物质在大尺度结构上的演化图像, 但是在实际观测中或数值模拟中如何划分不同的大尺度结构呢? Hahn 等人^[5] 最早借鉴了 Zel'dovich 近似的描述, 提出利用引力势的 Hessian 矩阵来描述暗晕周围大尺度环境. 在不考虑哈勃膨胀的情况下, 点粒子的运动为 $\ddot{\mathbf{x}} = -\nabla\phi$, 在暗晕中心 $\bar{\mathbf{x}}_k$, 引力势一般为局域极值, 即 $\nabla\phi(\bar{\mathbf{x}}_k) = 0$, 一个附近的粒子 \mathbf{x} 相对于暗晕中心的运动可以泰勒展开为

$$\ddot{x}_i = -T_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_k)(x_j - \bar{x}_{k,j}), \quad (3)$$

这里潮汐场 T_{ij} 由引力势的 Hessian 矩阵给出, 即

$$T_{ij} = \partial_{ij}\phi, \quad (4)$$

因此靠近局域引力势极值附近的运动完全可以由潮汐场的本征值和本征方向确定. 类比 Zel'dovich 近似, 可以利用潮汐场 T 的本征值的符号 (正或负) 来定义暗晕 (或密度场中任意一处) 的大尺度环境. 定义其本征值为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ (对应的本征方向分别为 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$) 定义其环境如下:

- 空洞 (Void), 所有的本征值为负 (没有稳定的轨道);
- 薄片 (Sheet or Wall), 一个正值, 两个负值 (一维稳定);
- 丝状结构 (Filament), 两个正值, 一个负值 (二维稳定);
- 节点 (Cluster, Node, Knot), 三个本征值都是正值 (稳定结构).

对于数值模拟或观测, 物质场的分布由一系列不连续的物体构成, 如数值模拟中的单个暗物质、观测中的单个星系. 关于如何从观测的星系构建物质密度场, 可参考 Wang 等人 [31] 的工作. 这里介绍一下数值模拟对暗物质的常用做法. 根据 Poisson 等式, 引力势与密度场的关系为

$$\nabla^2\phi = 4\pi G\rho, \quad (5)$$

这里 ρ 表示在某处的物质密度. 由于数值模拟中用单个粒子代替了密度场, 一般需要对密度场进行平滑, 常用的方法是将空间均匀划分为多个格点, 将每个粒子按照某种方法 (常见的是 Cloud-in-Cell 插值) 分配到附近的几个格点上去, 然后将格点上的粒子平滑到任意一处. 常见的平滑方法为利用一个高斯函数, 这时需要引入一个平滑尺度 R_s , 来平滑各个格点的物质. 对于平滑后的密度场, 可以通过快速傅立叶变换来得到任意处的引力势 (更常见的做法是直接利用快速傅立叶变换得到某处的潮汐场 T_{ij}).

需要进一步说明的是, 上述采取高斯平滑 (或其他平滑方法) 时, 其平滑尺度不能从理论上直接给出, 主要由研究物体的性质和研究的问题来决定. 如想考察一个半径为 100 kpc 的暗晕周边的大尺度环境, 采取的平滑尺度则必须大于暗晕的尺寸. 与此同时, 平滑尺度又不能过大, 否则其周边的环境会受到临近更大尺度物质分布的干扰. 关于平滑尺度如何选择及对结果的影响, Hahn 等人 [5]、Kang 和 Wang [26] 的文章都有所讨论.

实际上还有一些别的方法来划定大尺度结构的环境. Aragón-Calvo 等人 [32] 和 Zhang 等人 [33] 采用密度场的 Hessian 矩阵, Libeskind 等人 [34] 利用速度场来划分大尺度环境, Cautun 等人 [35] 采取不同平滑尺度来界定大尺度环境, Sousbie 等人 [36] 提出利用宇宙网络的几何结构特征来划分大尺度环境, Tempel 等人 [37] 采取了 boshi 等方法来划分. 除了 Sousbie 和 Tempel 等人的方法, 其他方法都有比较明确的物理含义. 关于这些不同方法得到的大尺度环境对星系排列结果的比较, 可以参考 Forero-Romero 等人 [38] 的文章.

2.2 星系角动量的潮汐起源及相关

早在 20 世纪五六十年代, Hoyle [39], Peebles [40] 和 Doroshkevich [41] 就先后指出星系的角动量起源于附近物质对原初星系的潮汐相互作用, 一般称 Tidal-Torque Theory (TTT), 随后 White [42] 和 Porciani 等人 [43] 给出了线性密度扰动和 Zel'dovich 近似下的 TTT 描述. 这里给出 Mo 等人 [30] 的描述. 对于欧拉空间, 其共动坐标为 \mathbf{x} , 假设原初星系占有体积元 V_L , 其角动量为

$$J = \int_{V_L} d^3x_i \bar{\rho}_m a^3 (a\mathbf{x} - a\bar{\mathbf{x}}) \times \mathbf{v} = \bar{\rho}_m a^5 \int_{V_L} d^3x_i (x - \bar{x}) \times \dot{x},$$

这里 \bar{x} 是原初星系体积元的中心, a 是宇宙膨胀因子. 利用 Zel'dovich 近似, 上式可以写为

$$J = -\bar{\rho}_m a^5 \dot{b} \int_{V_L} d^3x_i (x_i - \bar{x}_i) \times \nabla \Psi_i,$$

这里 $b(t) = D(t)/4\pi G \bar{\rho}_m a^3$, 再利用高斯定理, 并将 $\nabla \Psi$ 在 \bar{x}_i 处一阶展开, 可以得到

$$J_i(t) = -a^2 \dot{b} \sum_{j,k,l} \epsilon_{ijk} T_{jl} I_{lk}, \quad (6)$$

其中 $T_{jl} = \nabla_j \nabla_l \Psi_i|_{\bar{x}_i}$ 是引力势在原初星系中心处的二阶张量, 有时也叫大尺度结构的潮汐场.

$$I_{lk} = \int_{V_L} (x_{i,l} - \bar{x}_{i,l})(x_{i,k} - \bar{x}_{i,k}) \bar{\rho}_m a^3 d^3x_i, \quad (7)$$

给出了原初星系在欧拉空间里的惯性张量. 在潮汐场的本征方向对应的坐标下可以得到

$$J_1 \propto (\lambda_2 - \lambda_3) I_{23},$$

$$J_2 \propto (\lambda_3 - \lambda_1) I_{31},$$

$$J_3 \propto (\lambda_1 - \lambda_2) I_{12},$$

且满足 $\lambda_3 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1$, 因此 T 和 I 没有相关的情况下一般有 J_2 最大, 导致星系的角动量方向跟 λ_2 对应的本征方向有较好的倾向性. Porciani 等人 [43] 2002 年利用数值模拟发现 TTT 理论预言的星系角动量跟模拟结果符合得较好. 在后面的章节会进一步讨论 TTT 理论对星系角动量和大尺度结构的相关性.

2.3 暗物质晕的形状和角动量

为了理解星系、暗物质在暗晕内部的分布, 以及暗晕形状与大尺度结构之间的相关性, 必须了解如何

描述暗晕的形状. 图 2 给出了一个数值模拟中典型的暗物质晕分布. 数值模拟发现, 暗晕的形状并非球对称的, 绝大多数情况下可以用一个三轴椭球来描述. 利用高精度的数值模拟, Jing 和 Suto [44] 于 2002 年首次研究了暗晕的三轴椭球分布, 定义在该椭球面上粒子具有相同的密度, 则球面方程可以写为

$$R^2(\rho_s) = \frac{X^2}{a^2(\rho_s)} + \frac{Y^2}{b^2(\rho_s)} + \frac{Z^2}{c^2(\rho_s)}, \quad (8)$$

通过计算该球面内物质的惯性张量可以得到三个主轴 ($a \geq b \geq c$); 通过计算不同等密度面的分布, 可以得到暗晕内部的形状变化. 图 2 给出了某个暗晕的三轴物质分布. 可以看到在不同的等密度处, 暗晕的形状都可以用一个三轴椭球来较好的描述. Jing 和 Suto 还给出了三轴椭球下的暗晕的轴比、聚集度参数 c 等随暗晕质量、红移的变化. 该三轴模型被后来的相关研究广泛应用到研究暗晕的形状、暗晕内禀形状相关等研究.

与 Jing 和 Suto 的研究不同, 另外一种比较简单

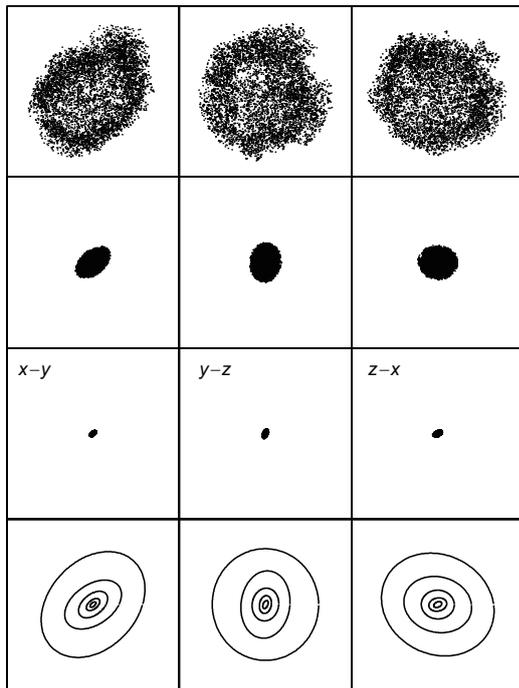


图 2 模拟中的暗晕示意图, 图中给出了三个方向暗晕的投影示意图 [44]

Figure 2 Illustration of dark matter halo in simulation. Shapes under three projection direction are shown above [44].

的描述暗晕形状的分布是利用其惯性张量, 类似于等式 (7), 暗晕的张量为

$$I_{ij} = \sum_k x_{k,i} x_{k,j} w_k, \quad (9)$$

这里 x_k 为暗晕中粒子相对于暗晕中心的位置, w_k 为对不同粒子的权重, 有些研究者取 $w = 1$, 而有些研究取 $w = 1/x_k^2$, 即用粒子相对于中心的距离平方反比作为权重, 这样可以降低暗晕外围物质或大质量子结构对暗晕形状的贡献. 从上面的惯性张量可以得到其本征值, $a \geq b \geq c$, 其中 a 表示主轴, b 表示次轴, c 表示短轴, 定义 $S = c/a$ 表示暗晕的球对称性, 定义 $T = \frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2}$ 表示暗晕的三轴椭率, 长椭球体 (橄榄球形状) 暗晕的 T 接近 1, 而扁球体的 T 接近 0, 处在 0 和 1 之间的一般叫三轴椭球 (可以想像将一个球体沿着某一方向拉伸, 得到长椭球形, 而沿着某一方向压缩则得到扁球形). 图 3 给出了数值模拟中暗晕的 T 的分布 (详见文献 [45] 中的图 2).

图 3 表明大部分暗晕的形状倾向于长椭球形状, 且大质量暗晕的轴比更小. Bailin 和 Steinmetz 还发现暗晕的具体形状跟半径有关, 内部倾向于长椭球, 而外部倾向于扁椭球. 在不同半径处, 主轴 (次轴, 最短轴) 之间的方向性保持得较好, 即它们都有比较一致的指向, 且大质量暗晕内部和外部的轴指向更趋近一致. Hahn 等人 [46] 发现小质量暗晕的形状与其环境有相关性, 而大质量暗晕的形状对环境依

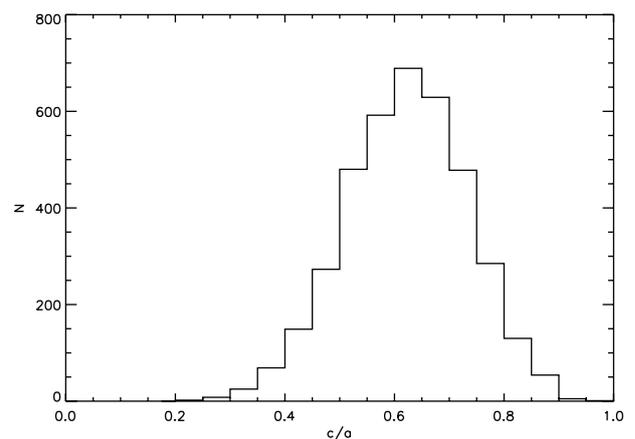


图 3 暗晕轴比 c/a 的统计分布 [45]

Figure 3 Histogram of the axis ratio c/a of dark matter halos [45].

赖性很弱. 对于小质量暗晕, 处在节点内的暗晕形状更加不对称, 更加接近长椭球形状.

除了暗晕的形状, 研究者也关心暗晕的角动量. 几乎所有的研究^[45]都发现暗晕的有效角动量 $\lambda = \frac{J}{\sqrt{2}MVR}$, 接近一个常数, 大约 0.035(当然随暗晕质量, 环境有一定的变化趋势, 但是都比较弱), 表明暗晕并非旋转主导. 其 λ 的分布可以很好地用一个 log-normal 分布来描述. 另外, 几乎所有的研究都发现, 暗晕的角动量方向与其短轴之间有很好的平行趋势, 而与长轴有垂直趋势, 具体可参考 Bett 等人^[47]的文章.

上面对相关背景知识做了简单的介绍, 它们将有助于理解下一节的相关结果. 对这些背景知识有兴趣的读者可以参考相关的文献.

3 研究进展

这一节详细介绍前述的几种最常见的星系排列现象: (1) 单个暗晕内部的卫星星系空间分布, 这一部分还将单独介绍银河系内卫星星系的分布; (2) 星系之间(主要是中央星系之间)在大尺度上的空间取向; (3) 星系与大尺度结构之间的空间排列.

3.1 暗晕内部的卫星星系空间分布

这一部分将特别介绍银河系内的分布, 因为我们可以对银河系进行高精度的观测, 同时研究银河系的一个重要意义是: 人类的家园 — 银河系, 其在宇宙中的地位是否特殊? 在 3.1.2 节, 将利用大样本, 介绍更普适的卫星星系相对于中央星系主轴的分布.

3.1.1 银河系内卫星的排列

如前所述, 最早的研究主要关注卫星星系围绕中央星系的分布. 能精确测量银河系内卫星星系的空间位置、速度分布, 因此研究银河系内卫星星系的空间分布是很自然的. Kroupa 等人^[48]在 2005 年利用银河系最靠内的 11 个卫星星系的位置, 研究了其空间分布, 发现绝大部分的卫星星系都分布在一个较薄的平面内, 该平面的厚度与宽度比只有约 0.1, 且该平面与银河系的银盘接近于垂直, 见图 4^[48].

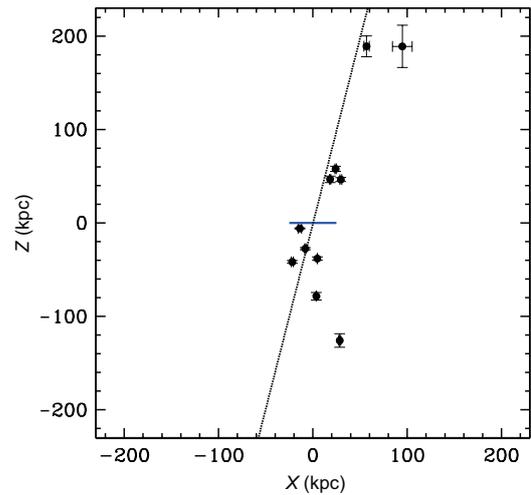


图 4 (网络版彩图) 图中给出观测中银河系卫星星系的空间分布图, 图中蓝色短线表示银河系银盘面, 长的点线表示对卫星星系空间盘状分布的拟合^[48]

Figure 4 (Color online) The observed spatial distribution of satellite galaxies of the Milky Way. The short blue line denotes the disk of the Milky Way and long dashed line is a fit for the disk-like spatial distribution of satellite galaxies^[48].

Kroupa 等人发现这样一个高度各向异性的分布与冷暗物质模型预言的子结构各向同性分布严重不符合, 其相似度小于 0.5%, 因此他们认为银河系卫星星系的空间分布对 CDM 构成了严重挑战.

在 Kroupa 等人的结果出来以后, Kang 等人^[49]很快利用数值模拟和星系形成模型对银河系大小暗晕内的卫星星系分布进行了研究. 他们发现如果银河系卫星星系的分布与暗物质粒子的分布比较相似(三轴分布, 不仅仅是径向分布), 则预言的卫星星系分布可以比较薄, 呈现类似盘状分布, 其厚度 ($\Delta/R \sim 0.17$), 跟银河系内的观测比较接近. 他们也指出该薄平面厚度的具体分布跟所选的样本数和具体的暗晕形状有关. 同时, 他们还指出如果卫星星系的分布跟所有子结构的分布类似, 其分布则很难形成一个盘状分布, 图 5 给出了他们的结果.

Kang 等人的结果表明三轴的暗物质分布是解释银河系卫星星系呈薄平面分布的主要原因, 但是他们也指出很难理解为什么观测到的卫星星系平面跟银盘接近垂直. 随后 Zentner 等人^[50]利用数值模拟的研究支持了 Kang 等人的结果, 他们还特别指出子结构的分布并非各向异性的, 而是主要分布在暗

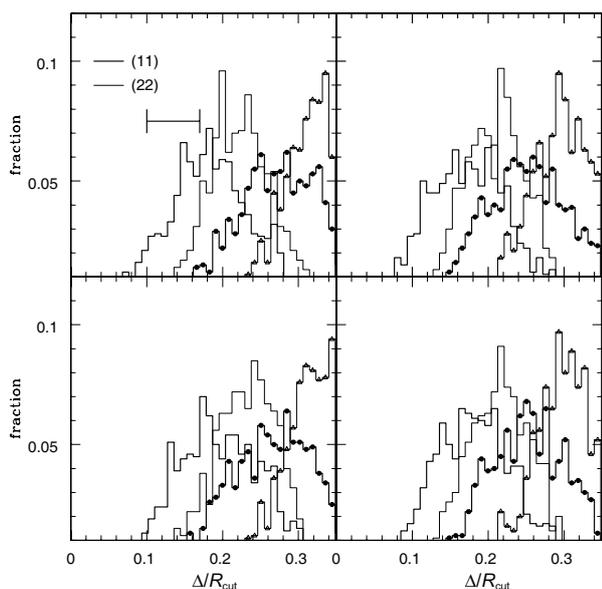


图5 银河系卫星星系呈现盘状分布, 图片给出模拟中盘状结构中盘的厚度的概率分布 [49]

Figure 5 The Milky Way's satellite galaxies show a disk-like distribution. The four panels show the distribution of the characteristic thickness of the fitted plane in the simulation for four different halos [49].

晕的主轴方向. 如果选取其中吸积质量 (子结构进入主暗晕时刻的质量) 较大的子结构, 其空间分布跟银河系观测更接近, 主要原因是他们都是沿着暗晕的 Filament 方向进入的, 因此有较窄的空间分布. 如果要求卫星星系分布的薄平面与银盘垂直, 则要求银河系暗晕的主轴方向与银盘垂直, 这跟数值模拟中星系的角动量与暗晕的短轴方向平行的事实不太符合.

Libeskind 等人 [51] 的研究也证实了 Zentner 等人的结论, 即银河系卫星星系应该与那些掉入时质量最大的子结构的分布近似. Li 等人 [52] 指出银河系的大部分卫星星系在吸积时刻应该处在一个较大的群里面, 其进入银河系后被潮汐力从该群中逐渐拉伸出来, 这样也可以很自然地形成一个薄平面分布.

Metz 等人 [53] 进一步发现银河系的卫星星系具有大致相同的轨道角动量, 这表明他们不但分布在一个较薄的平面上, 而且是旋转支撑的. 利用 SDSS 的数据, 人们在银河系内发现了更多的卫星星系, 很巧合的是大部分这些卫星星系都大致分布在以前利用 11 个经典卫星星系定义的大平面上 [54]. Pawlowski

等人 [55] 还发现银河系内的年轻星团、潮汐恒星流等也倾向于分布在这样一个大的平面. 这是否由于 SDSS 的天区覆盖局限引起的? Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS) 覆盖了更大的天区, 但是到目前也只找到了 2-3 个卫星星系, 而且其中 1 个也处在卫星星系平面上. 暗能量巡天 (Dark Energy Survey, DES) 在 SDSS 没有覆盖的天区也发现了不少卫星星系, Pawlowski 等人 [56] 发现这些新发现的卫星星系都倾向于分布在同一个平面上.

利用银河系附近的 M31 星系, 研究者也发现其大部分卫星星系分布在一个较薄的平面内 [57]. Ibata 等人 [58] 还发现这些卫星星系也具有较一致的角动量, 因此再次证明类似银河系内卫星星系的奇异分布也存在于 M31. 甚至在本星系群中的其他卫星星系都呈现类似的盘状分布 [59]. 这些研究意味着这样的分布应该不是一个简单的随机分布, 必定有共同的物理起源. 这样的盘面是稳定的吗? [60] 如何解释其起源? 最后, 卫星星系的空间分布是否跟他们的大质量卫星问题 (Too-Big-to-Fail) (也被称为速度分布问题或者大质量卫星丢失问题) 有内禀联系? 这些问题目前还没有确定的答案, 有少部分文章对此进行了讨论 [61].

上述研究中发现的卫星星系呈一个大的薄平面分布主要在银河系和 M31 内被发现 (不过 M31 内的卫星星系分布略偏离薄平面分布), 但并不意味着在其他星系内也有类似分布, 这主要是由于目前的观测能力只能很好地测量本星系群中的卫星星系空间分布. 对于遥远星系, 寻找到其大量的卫星星系还比较困难, 至于测量卫星星系的速度分布就更加困难. 因此仅仅利用银河系内卫星星系的空间分布 (或者速度分布) 来限制宇宙学模型或星系形成模型还不是特别合适, 如 Kang 等人 [62] 指出银河系内卫星星系的速度分布很有可能处在 CDM 理论分布的边缘. 如果将来能测量到更多的其他星系内的卫星星系在相空间 (位置+速度) 的分布, 则可以对宇宙学模型或星系形成过程有更强的限制.

3.1.2 卫星星系相对于中央星系的排列

这一节将介绍卫星星系相对于中央星系, 特别

相对于中央星系主轴的分布. 如前所述, 对于银河系和 M31 可以精确测量其卫星星系到很暗的星等, 因此能较全面收集其卫星星系的分布, 但是对于绝大部分星系, 只能用大量星系样本, 从统计上来研究卫星星系相对于中央星系的主轴分布, 并研究其信号对星系性质的依赖关系. 同时也会介绍利用数值模拟和星系形成模型开展的相关研究.

如前所述, 早期研究发现卫星星系分布在中央星系的次轴上 [8], 但是后来的一些研究并没有发现类似的现象 [63,64]. 利用 2dFGRS 的大量星系样本, Sales 和 Lambas [65] 发现卫星星系倾向于分布在中央星系的次轴上. 2005 年 Brainerd [66] 利用 SDSS 的星系样本, 发现卫星星系分布在中央星系的主轴方向. 2006 年 Yang 等人 [10] 利用 SDSS 数据构建了星系群样本, 再次对该问题进行了详细研究, 他们的结果证实了 Brainerd 的结论, 发现卫星星系的确倾向于分布在中央星系的主轴方向, 同时他们也指出 Sales 和 Lambas 等人的结果没有问题, 但是由于他们把星系的倾角方向定义标反了, 经过简单的修正后 2dFGRS 的数据也支持主轴分布. 图 6 给出了 Yang 等人的结果.

可以看到星系的排列信号 (Alignment) 跟星系的性质也存在相关. 红色的卫星星系 (即星系的 $g-r$ 颜色大于某个给定的阈值), 其 Alignment 信号比蓝色卫星星系要强. 对于蓝色中央星系, 其卫星星系的分布倾向于随机分布, 而红色中央星系中卫星星系的 Alignment 信号最强, 且最强的信号来自于红色中央星系和红色卫星星系的 Alignment. Yang 等人还发现 Alignment 信号依赖于主暗晕的质量和卫星星系的距离: 大质量暗晕内卫星星系的 Alignment 信号更强, 暗晕内部的卫星星系更倾向于分布在中央星系的主轴. 后续研究都证实卫星星系的确倾向分布在中央星系的主轴方向 [67,68]. 一些相关研究还发现在其他星系巡天 [69] 和红移 $z > 0$ 处也有类似的 Alignment 现象 [70,71].

Agustsson 和 Brainerd [72] 利用 GIF 数值模拟和其模拟星表从理论上研究了星系的 Alignment, 发现如果中央星系的形状与投影暗物质晕的形状一致, 则模型中卫星星系也呈现出沿着中央星系主轴的分布, 不过 Alignment 信号比观测要强. 他们提出对于旋涡

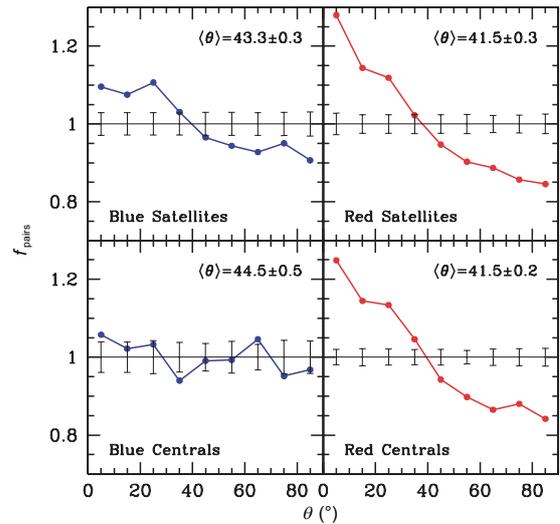


图 6 (网络版彩图) 卫星星系相对于中央星系主轴的分布. 图中纵坐标 $f_{\text{pairs}} = 1$ 表示随机分布, 蓝线表示中央星系为蓝星系, 红线表示中央星系为红星系 [10]

Figure 6 (Color online) Distribution of satellite galaxies positions relative to the major axis of the central galaxy. Here, $f_{\text{pairs}} = 1$ corresponds to random distribution. Blue line means the central galaxy is a blue galaxy, and red line means the central galaxy is a red galaxy [10].

星系, 如果其形状为一个星系盘, 则投影后中央星系的椭圆率可以大大降低, 但是卫星星系的具体 Alignment 信号依赖于如何选取星系的角动量: 如果星系角动量与 (三轴) 暗晕的最短轴平行, 则模型预言的 Alignment 信号偏高, 大约 35° , 而观测数据大约 40.5° . 如果星系角动量与暗晕角动量平行, 则模型预言的 Alignment 比观测要弱, 约 42° . 因此他们没有找到一个很好的解释. Kang 等人 [73] 利用更高精度的数值模拟和半解析模型给出的模拟星表, 对该问题进行了更详细的研究. 他们发现如果星系的次轴与暗晕的角动量平行, 则预言的 Alignment 信号及其对星系颜色、暗晕质量的依赖关系跟观测都比较符合. 另外如果中央星系的次轴与暗晕的次轴有一个大约 40° 的夹角, 则模型预言同样与观测接近. Wang 等人 [74] 利用高分辨 N -Body 数值模拟研究了 Alignment 信号对子结构吸积历史的依赖, 他们发现不同半径处的暗晕之间存在一定的 Mis-Alignment, 如果中央星系的形状与暗晕内部物质的三轴形状一致, 则预言的 Alignment 信号跟观测较一致. 他们发现较晚吸积的子结构跟暗晕外部物质分布比较一致, 而吸积早的子结构 Alignment 信号稍弱.

在利用 N -Body 研究上述 Alignment 信号的时候, 都必须假设中央星系的形状. 同时由于缺乏星系形成过程, 不能预言 Alignment 对星系性质的依赖, 所以类似研究的局限性较大. 为了能跟观测较一致, 须采取含恒星形成的流体数值模拟. 但是流体数值模拟, 特别是包括恒星形成的模拟, 其难度较大, 非常依赖于具体的程序和实施方法, 具体见本专刊的其他文章. 尽管利用流体数值模拟研究该问题比较复杂, 一些研究者进行了尝试. Libeskind 等人^[75] 利用了含恒星形成的流体模拟研究了银河系内卫星星系的分布, 但是他们主要关注卫星星系本身的空间分布 (见第 3.1.1 节). Deason 等人^[76] 利用 zoom-in 的流体模拟研究了低质量暗晕内卫星星系相对中央星系指向的分布, 但是他们没有考察 Alignment 信号对星系性质的依赖并与观测进行比较. Dong 等人^[77] 利用 GADGET-2^[78] 含恒星形成的版本运行了一个宇宙学流体数值模拟, 详细研究了 Alignment 信号. 他们的模型预言与观测比较接近: 红色卫星星系的 Alignment 效应比蓝色卫星星系强, 且与主暗晕质量有依赖关系. 他们指出星系 Alignment 对卫星星系颜色及中央星系质量的依赖来源于两个因素: (1) 中央星系与暗晕内部形状之间存在一定的 Alignment, 且该效应随着暗晕质量增加而增加. (2) 红色卫星星系分布在暗晕内部, 蓝色卫星星系主要分布在暗晕外围. 这两个事实很容易解释 Alignment 对卫星星系颜色、主暗晕质量的依赖关系.

对于卫星星系相对于中央星系的 Alignment 现象, 到底其来源于原初分布还是演化效应, 即卫星星系吸积时刻倾向于沿着暗晕主轴还是卫星星系在暗晕中经过一定时间演化而具有类似暗晕内物质的空间分布? 前面的研究表明, 暗晕的三轴各向异性分布的确可以解释卫星星系的 Alignment 现象, 说明暗晕本身的形状是决定卫星星系各向异性的主要原因. Pápai 和 Sheth^[79] 在 2013 年也提出暗晕和大尺度结构的相关性来源于原初 shear 场. 但是, 相关研究表明子结构的确倾向于在吸积时刻沿着暗晕的主轴方向被吸积^[80,81]. Kang 和 Wang^[26] 还发现子结构被吸积时的位置分布与暗晕主轴的 Alignment 与 $z=0$ 时刻主暗晕的质量相关 (见图 7).

对于大质量暗晕其子结构在吸积时刻与暗晕主

轴的 Alignment 强, 小质量弱; 相比于 $z=0$ 时刻子结构与暗晕主轴的 Alignment, 他们发现在中小质量暗晕内, $z=0$ 时刻的 Alignment 比吸积时刻强, 这是因为在小质量暗晕内子结构进入时间相对较早, 受到主暗晕的演化影响较大, 因此具有了跟主暗晕较一致的空间分布. 由于吸积时刻和 $z=0$ 时刻子结构的 Alignment 都比观测到的星系 Alignment 信号强, 因此目前很难说星系的 Alignment 到底是来源于原初信号还是演化效应.

3.2 星系 - 星系取向关联

由于引力透镜效应, 特别是在弱引力的情况下, 星系的光子在穿过宇宙密度场时会发生微小的弯曲, 导致观测的星系形状相对于星系内禀形状会产生一定的形变. 在利用弱引力透镜提取宇宙密度场信息时, 人们一般利用星系形状之间的相关性来得到密度功率谱, 星系内禀形状之间的指向相关 (Intrinsic Alignment, IA) 会对弱引力透镜信号产生贡献, 其贡献幅度可达 10%, 对下一代弱引力透镜巡天精确测量宇宙学参数和暗能量密度的贡献不可忽略, 必须要准确扣除. 关于星系之间指向相关性对弱引力透镜宇宙学的应用相关讨论, 具体可见 Troxel 和 Ishak^[82] 的综述文章. 因此这一节主要介绍 IA 的相关观测和理论研究.

20 世纪 90 年代, 研究者开始研究星系对之间的形状相关. 这里给出其最常见的描述, 具体可参考文献 [83, 84]. 考虑天空中的一对星系 a 和 b , 定义 x, y 轴为平行或垂直该星系对的连线方向, 星系 a 的椭率为 ϵ , 其主轴相对于 x 轴的夹角为 β , 则该星系在 x 轴和与 x 轴成 45° 方向上的椭率可以分别表示为

$$\epsilon_1 = \epsilon \cos(2\beta), \epsilon_2 = \epsilon \sin(2\beta), \quad (10)$$

其中 $\epsilon = (1 - q^2)/(1 + q^2)$, q 为椭圆的轴比 b/a ($b < a$). 星系的椭率相关函数一般定义为

$$\xi_1(\theta) = \langle \epsilon_{1,a} \epsilon_{1,b} \rangle_\theta, \xi_2(\theta) = \langle \epsilon_{2,a} \epsilon_{2,b} \rangle_\theta, \quad (11)$$

等式右边是对角距离为 θ 的星系对 a, b 进行平均. Jing^[85] 于 2002 年利用数值模拟测量了 ξ_1, ξ_2 (不过 Jing 用的是 C_{11}, C_{22} 来描述), 他们发现 C_{11}, C_{22} 与暗晕的质量有很大的依赖关系, 并给出了一个拟合

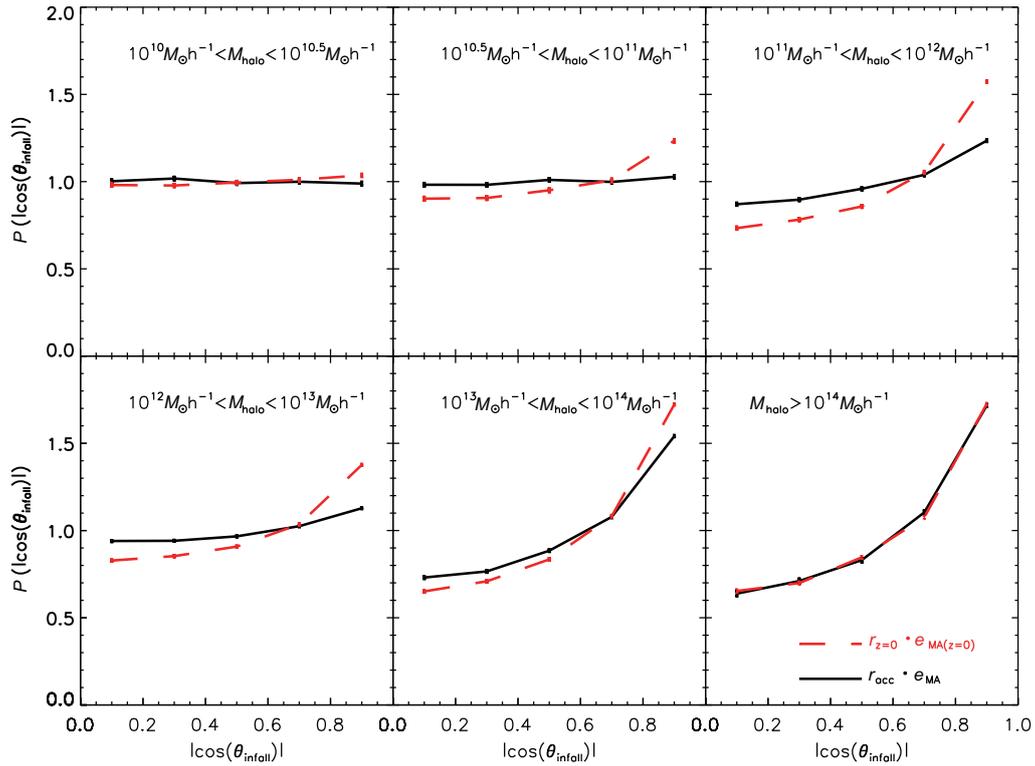


图7 (网络版彩图) 暗晕子结构在红移 $z=0$ 时于暗晕主轴的 Alignment (红色虚线), 与暗晕子结构被吸积时的位置相对于当时暗晕主轴的 Alignment. 可以发现中等质量的主暗晕中, 现在时刻的 Alignment 信号比吸积时刻的信号要强, 这意味着暗晕内部存在着强烈的非线性演化过程

Figure 7 (Color online) The current alignment of subhaloes with the halo major axis at $z=0$ (red dashed lines), and the alignment at accretion (black solid lines). It is found that the current alignment with the halo major axis is higher than that in the past, indicating a non-linear evolution effect which is more obvious in intermediate halo masses.

公式

$$C_{11}(r; \geq M_h) = \frac{3.6 \times 10^{-2} \left(\frac{M_h}{10^{10} h^{-1} M_\odot} \right)^{0.5}}{r^{0.4} (7.5^{1.7} + r^{1.7})}, \quad (12)$$

这里 M_h 为暗晕的质量, 上式给出了质量大于 M_h 的暗晕主轴之间的相关函数. 需要指出的是该公式是在某个特定暗晕定义和形状测量方法下得到的, 不同的暗晕寻找方法和投影形状计算方法之间对结果会有一定的依赖性.

Okumura 等人^[15]2009 年利用 SDSS 里面的亮红星系 (平均红移 0.3) 测量了亮红星系之间主轴的相关. 他们发现亮红星系主轴之间的相关可以延伸到较大的尺度上, 即 ~ 30 Mpc/h. 通过与数值模拟的结果进行比较, 他们发现亮红星系的主轴与暗晕的主轴之间有一个 Mis-Alignment, 平均值为 35.4° . 最

近 Xia 等人¹⁾利用数值模拟发现 C_{11} 还依赖于暗晕的大尺度环境和形成时间. 星系内禀形状之间的相关对弱引力透镜的剪切场功率谱贡献可达 5%, 因此对于利用弱引力透镜精确测量限制不同的宇宙学模型必须加以考虑.

另一种常见的描述星系指向相关的是定义其相关函数. Faltenbacher 等人^[16]2009 年将常用的二维星系投影相关函数 $\xi(r_p, \pi)$ ^[86] 扩展到三维 $\xi(r_p, \pi, \theta_p)$, 即考虑同时处在与星系主轴成夹角 θ_p 内的星系对, 这里给出 Li 等人^[17]的描述. 考虑一对星系, 其中一个为本文要研究的样本 Q , 另一个为参考样本 G , 定义一个随机样本 R , 相关函数可以表示为

$$\xi(\theta_p, s) = \frac{N_R}{N_G} \frac{QG(\theta_p, s)}{QR(\theta_p, s)} - 1, \quad (13)$$

1) Xia Q, Kang X, Luo Y, et al. Halo intrinsic alignment: Dependence on mass, formation time and large-scale environment. In preparation

这里 s 是红移空间星系对的距离, N_G, N_R 分别为处在参考样本和随机样本内的星系数目, $QG(\theta_p, s), QR(\theta_p, s)$ 为 Q 样本内的星系与 G, R 样本内星系的对数目 (处在距离 s , 样本 G, R 内的星系处在 Q 样本内星系主轴的 θ_p 方向). 相比 $\xi(s)$, 在 $\theta_p \leq 45^\circ$ 内较高的 $\xi(\theta_p, s)$ 意味着星系倾向于分布在星系的主轴方向上, 而在 $\theta_p \geq 45^\circ$ 意味着星系倾向于分布在其次轴方向上. 与 $\xi(\theta_p, s)$ 相关的另一个统计量是 $\cos(2\theta_p)$,

$$\langle \cos(2\theta_p) \rangle(s) = \frac{\int_0^{\pi/2} \cos(2\theta_p) \xi(\theta_p, s) d\theta_p}{\int_0^{\pi/2} \xi(\theta_p, s) d\theta_p}, \quad (14)$$

上式的范围为 -1 和 1 . 正和负值分别意味着星系之间沿着主轴和次轴的排列倾向. 原则上上述两种定义星系方向相关的方法是等价的, 不过不同的研究者喜好不同的定义方式, 如何将 $\xi(\theta_p, s)$ 与 $C11(r)$ 等联系起来, 可参考 Troxel^[18] 综述文章内的讨论和其引用的相关文献.

Faltenbacher 等人利用 SDSS 的数据对星系排列的上述统计进行分析, 发现对于红星系, 其邻近星系有更多几率排列在星系的主轴方向, 该效应可达到 60 Mpc/h 的尺度, 且该效应随星系的亮度增加而变强, 对于蓝星系, 其位置排列与星系的主轴指向没有太大关联. Li 等人^[17] 在 2013 年利用 SDSS 的 BOSS 巡天, 测量了红移 0.6 左右的亮红星系的指向相关.

图 8 给出了其测量的统计量 $\cos(2\theta_p)$.

从图 8(a) 可以看到, 在沿着星系主轴 $0^\circ < \theta_p < 30^\circ$ 的范围内, 星系的对数目 (成团性) 的确要比星系整体的成团性在该尺度上要强, 其相关性可以达到 70 Mpc/h . 而在星系的次轴方向上 ($60^\circ < \theta_p < 90^\circ$), 星系的成团性较整体平均分布弱. 图 8(b) 表示 $\langle \cos(2\theta_p) \rangle$, 其表达了与图 8(a) 一样的结果, 即星系倾向于分布在彼此的主轴方向上, 相关长度达到了约 100 Mpc/h . 值得指出的是, 图中深色黑线是数值模拟的理论预言, 其表明如果星系的主轴与其所在暗晕的主轴方向完全一致, 则模型预言的星系 Alignment 比观测数据要高, 而如果星系形状与暗晕之间存在一定的偏差 (如 35°), 灰色虚线表明理论结果和观测非常接近. 这和前面人们研究星系尺度上 Alignment 得到的结果非常一致^[73].

从理论上研究星系内秉形状的相关比较困难, 因为不知道星系的形状主要由那些物理过程决定: 一般来说对于不同类型的星系, 椭圆或者旋涡星系, 其与周围环境的作用不一样, 而且恒星形成、星系并合等过程都影响到星系自身的形状. 关于各种可能描述星系内秉形状相关的模型, 可参见文献 [2] 中第 6 节或文献 [82] 中第 3 节的内容. 这里只对相关理论做简单介绍. Catelan 等人^[87] 于 2001 年最早提出星系的内秉形状与引力势有如下关系:

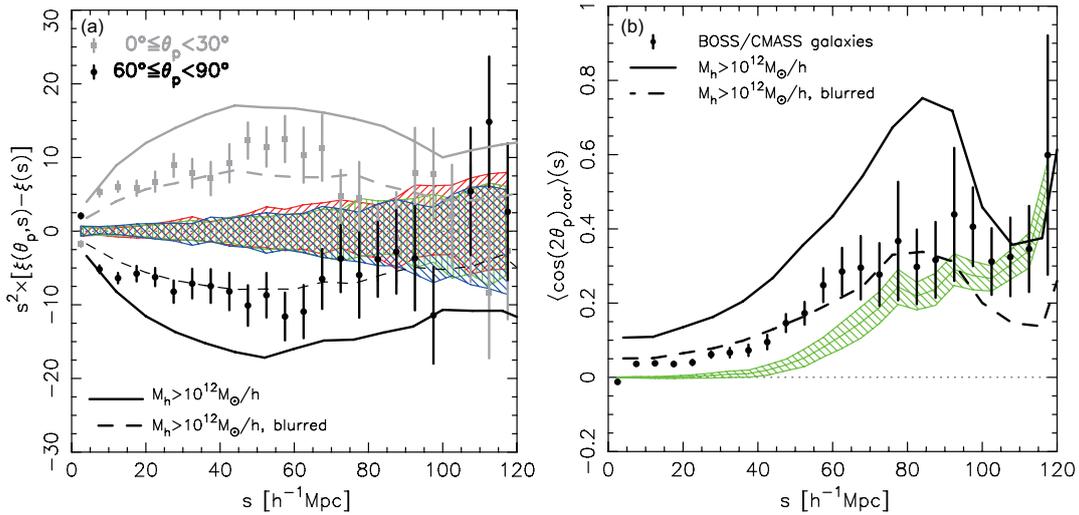


图 8 (网络版彩图) 星系的对数目 (a) 和统计量 $\cos(2\theta_p)$ 随尺度的相关性分布 (b)^[17]

Figure 8 (Color online) The distribution of galaxy pair number (a) and the statistics $\cos(2\theta_p)$ as a function of scale length (b) [17].

$$\gamma^J = (\gamma_+, \gamma_{ix}) = -\frac{C_1}{4\pi G} (\nabla_x^2 - \nabla_y^2, 2\nabla_x \nabla_y) S(\Psi_p), \quad (15)$$

其中 S 是一个对引力势 Ψ_p 的一个平滑, C_1 是一个归一化常数, 可以通过观测低红移星系内乘形状相关来确定, 从理论上讲也可以从星系形成的半解析模型 (如果能够给出星系的形状) 或者流体数值模拟来决定 (其自然地预言了星系的形状). Hirata 和 Seljak^[88] 于 2004 年在此基础上导出了椭圆星系的内乘相关功率谱和相关函数

$$P_{\delta I}(k, z) \propto \rho_{\text{crit}} \frac{\Omega_m}{D(z)} P_{\delta\delta}^{\text{lin}}(k, z),$$

$$P_{II}(k, z) \propto (\rho_{\text{crit}} \frac{\Omega_m}{D(z)})^2 P_{\delta\delta}^{\text{lin}}(k, z),$$

$$w_{\delta+}(r_p, z) = -\int_0^\infty \frac{dk}{2\pi} k J_2(kr_p) P_{\delta I}(k, z).$$

在此基础上, Blazek 等人^[89] 进一步得到了其与星系对之间常用的统计量 $\langle \cos(2\theta) \rangle$ ^[90] 之间的关系

$$w_{\delta+} = \frac{4\bar{\varepsilon}}{\pi} \langle \cos(2\theta) \rangle (r_p, z), \quad (16)$$

这里 $\bar{\varepsilon}$ 为星系的平均椭率.

对于旋涡星系, 其椭率的分布可以这样得到: 假设盘星系的角动量由大尺度的潮汐场决定, 对于一个具有角动量的星系盘, 其在视线方向上的投影给出其椭率分布. Catelan 等人^[87] 2001 年的工作假设盘星系的椭率由潮汐场的 2 阶导数决定 (Quadratic Alignment Model)

$$\gamma^J = C_2 (T_{x\mu}^2 - T_{y\mu}^2, 2T_{x\mu} T_{y\mu}), \quad (17)$$

$$T_{\mu\nu} = \frac{1}{4\pi G} (\nabla_\mu \nabla_\nu - 1/3 \mu\nu \nabla^2) S[\Psi_p]. \quad (18)$$

利用如上的假设, Hirata 和 Seljak^[88] 给出了其功率谱的表达, 具体可参考他们的文章. 上述公式引入了一个很强的假设是星系的角动量完全由潮汐场决定, 实际上如果原初星系的惯性张量与潮汐场是耦合的话, 上面给出的结果与数值模拟结果不符合. Lee 和 Pen^[90] 在 2000 年及其后来的工作对潮汐场导致的角动量相关进行了修正, 并给出了参数化的模型, 具体参见 Lee 和 Pen 的相关文章. 另外, 上面关于椭圆星系、旋涡星系的椭率相关的描述中主要用的是线性功率谱, 没有考虑非线性效应. Bridle 和

King^[91] 对线性模型进行了修正, 其预言的结果跟观测更加接近.

除了上述关于潮汐场的模型外, 还有其他一些预言星系内乘形状相关的模型, 如暗晕模型^[92]、半解析模型^[93]. 这些模型不同程度地借鉴了上面关于椭圆星系、旋涡星系 (适用于中央星系) 的空间椭率分布描述. 与此同时, 暗晕模型、半解析模型还考虑了卫星星系的椭率分布与其寄主暗晕的关系, 但是这些假设都太简单, 一般需要利用流体数值模拟给出的关于卫星星系椭率分布的描述. 从这方面讲, 含恒星形成的流体模型可以很好地预言星系的内乘形状相关, 相关的结果可参见最近 Hilbert 等人^[94] 利用 ILLUSTRIS 模拟得到的结果或者 Chisari 等人^[95] 用 Horizon-AGN 模拟得到的结果.

3.3 星系取向与大尺度结构的相关

如前所述, 关于暗晕 (星系) 形状或角动量与大尺度结构的关系, 观测研究要晚于理论研究, 主要是需要大量的观测样本、精确测量的星系形状和较准确的大尺度结构划分方法. 在开始下面的讨论之前, 需要对一些概念进行说明. 首先观测上一般研究的是星系形状与大尺度结构之间的取向排列, 而大部分数值模拟实际上研究的是暗晕的形状、角动量等与大尺度结构的关系, 因此会在相关的地方明确说明是暗晕或者是星系. 其次, 大尺度结构的概念比较笼统, 有时候说的大尺度结构指的是 Filament, 有时候指 Sheet 或者 Wall, 一般来说 Filament 结构的方向指的是沿着 Filament, 而定义 Sheet 的方向一般指 Sheet 平面的法线方向, 需要在阅读相关文献时注意, 本文会在相关的文字处给予明确说明.

3.3.1 暗晕 (星系) 形状与大尺度结构的相关

这一节讨论暗晕 (星系) 的形状与大尺度结构的关系. Van Haarlen 和 Van De Weygaert^[96] 于 1993 年首次指出暗晕的形状与大尺度结构之间存在一定的相关性. Hahn 等人^[46] 在 2007 年利用数值模拟进行了较早的, 也最详细的研究. 后来的相关研究结论跟 Hahn 等人的结果非常接近, 因此这里主要概括 Hahn 等人的研究结果. 他们利用数值模拟和 2.1 节所描述

大尺度结构环境, 给出了不同环境中暗晕的形状随质量、红移的变化. 图 9 是他们的结果, 可以看出在不同的环境、不同时刻, 低质量的暗晕更接近球对称, 其三轴分布更接近扁球形 (可以认为是球形沿某个方向压缩), 这个关系对红移的依赖性很小. 同时从图 9 可以看出暗晕的形状对环境的依赖性很弱, 比较明显的趋势是处在 Sheet 里面的小质量暗晕比其他环境的暗晕形状更接近长椭球形, 而对于大质量暗晕, 处在 Filament 环境下的暗晕更扁. 图 10 给出暗晕的主轴与表征大尺度方向的夹角. 对于 Filament, 其大尺度环境方向为沿着 Filament 的方向, 对于 Sheet, 其方向为 Sheet 的法线方向 (垂直于 Sheet 平面的). 从图中可以看出暗晕形状与环境方向的相关也对暗晕质量依赖性很强: 在 Filament 环境中, 小质量暗晕的指向与环境无关, 而大质量暗晕的主轴倾向于沿着 Filament 方向, 且高红移的指向性略弱; 对于处在 Sheet 环境下的暗晕, 其主轴倾向于沿着 Sheet 的法线方向, 而大质量暗晕的主轴倾向于处在 Sheet 平面内.

Forero-Romero 等人 [38] 总结了不同的研究结果, 表明几乎所有的数值模拟研究都发现暗晕的主轴与 Filament 的方向存在一定的倾向性, 且随暗晕质量增加而变强. Kang 和 Wang [26] 在 2015 年得到了一个更

普适的关系, 他们发现暗晕的主轴与大尺度潮汐场本征值的最短轴 (塌缩最弱的方向 e_3 , 见 2.1 节) 有很好的倾向性. 图 11 给出了他们的结果, 其表明暗晕的主轴有平行于 e_3 方向的趋势, 该一致性随暗晕质量增加而变强, 该趋势与红移、平滑尺度存在一定的依赖性. 这主要是因为暗晕内的物质在 e_1, e_2 等快速塌缩方向受到了较大的压缩, 暗晕中的物质更倾向于沿着塌缩最慢的方向运动. Kang 和 Wang 的结果比其他人的结果更普适, 因为其不依赖于不同环境下 (Filament, Sheet) 如何定义大尺度方向, 而是统一地用最慢塌缩方向来描述. 最近 Chen 等人 [97] 发现暗晕的长、中、短轴分别与潮汐场 (其定义的潮汐场与一般利用 Hessian 矩阵定义略有不同, 其优点是不依赖于平滑尺度, 具体参见其文章) 的本征方向有一定的平行趋势, 其中长轴、短轴的倾向性最强, 而中轴的倾向性最弱. 他们还发现, 如果不用暗晕的质量而是用密度对比来描述, 其对红移的依赖性消失, 得到一个更普适的关系.

上述的研究都来源于数值模拟, 而观测上的进展并不大, 这主要是因为观测上很难定义大尺度结构的方向. Wang 等人 [98] 利用 Yang 等人 [99] 在 2007 年给出的 SDSS 星系群样本构建了大尺度的潮汐场,

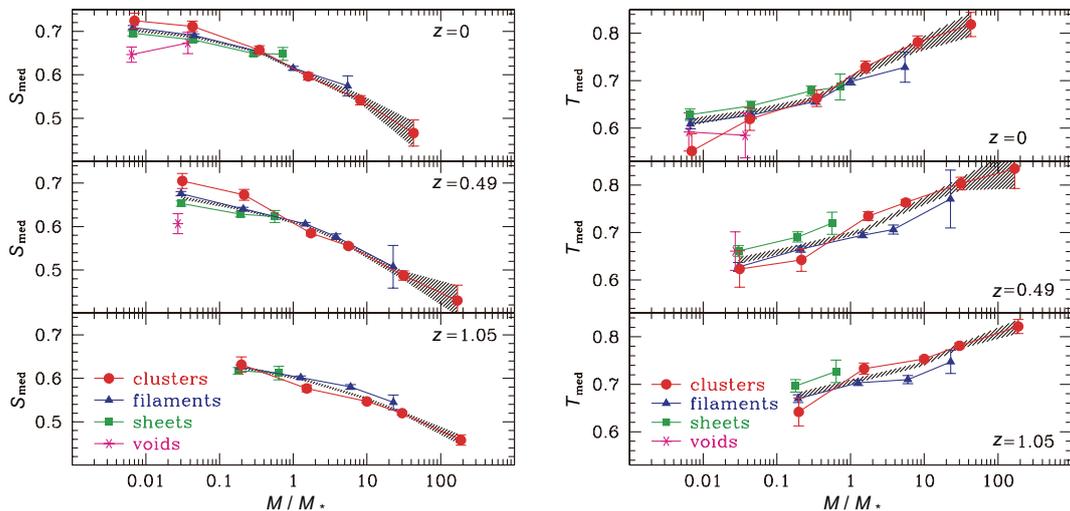


图 9 (网络版彩图) 暗晕轴比 S 和暗晕的形状 T 随暗晕归一化质量的相关性分布, 图中不同颜色给出了此种相关性与大尺度环境的依赖, 不同的小图给出了此种相关性与红移的依赖 [46]

Figure 9 (Color online) The axis ratio S and shape parameter T of dark matter halo as of halo normalized mass. Different colors lines represent different large scale environment and each panel shows the results in different redshift, respectively [46].

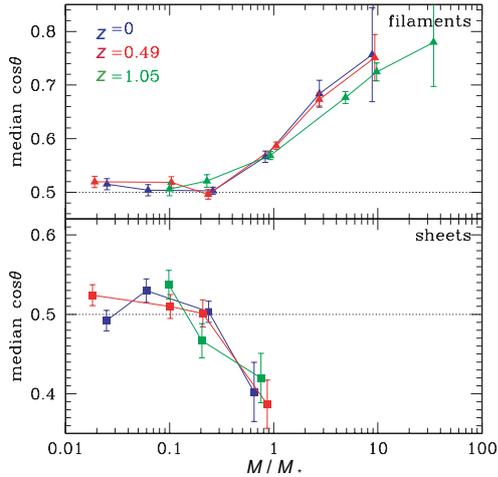


图 10 (网络版彩图) 暗晕主轴与大尺度方向的夹角随暗晕归一化质量的相关性分布, 在 Filament 环境中, 大尺度方向为 Filament 走向, 在 Sheet 环境中, 大尺度方向为 Sheet 平面法线方向. 图中同时给出了暗晕主轴与大尺度方向的夹角的相关性和红移的依赖性 [46]

Figure 10 (Color online) The distribution of alignment angles between the halo major axis vectors and the direction of large scale structure which are pointing in the direction of filaments in filament environment and normal to the sheet plane in sheet environment, respectively. Redshift dependence can be seen from different colors [46].

给出了其环境和本征值方向. 在此基础上, Zhang 等人 [27] 在 2013 年研究了星系的主轴与 Filament 方向之间的相关性. 他们发现红色中央星系的主轴与 Filament 的方向有较好的倾向性, 平均角度为 43.26° , 而蓝色中央星系的主轴与 Filament 之间只有很弱的相关性.

3.3.2 星系 (暗晕) 角动量与大尺度结构的相关性

这一节讨论暗晕 (星系) 的角动量与大尺度结构的相关性. 相比于暗晕形状 - 大尺度结构相关性, 对角动量 - 大尺度结构的研究开始得更早、更多. 一方面是潮汐理论预言了星系角动量的起源, 可以从理论上开展相关研究. 另外由于观测上大部分场星系都是旋涡 (盘) 星系, 其形状或其他性质与其角动量的大小非常相关. 在 2.2 节介绍了角动量起源的 TTT 理论, 这里主要介绍数值模拟和观测上得到的暗晕 (星系) 角动量与大尺度结构的相关性.

利用数值模拟, Aragón-Calvo 等人 [100] 2007 年发现对于处在 Sheet 环境中的暗晕, 其角动量倾向于处

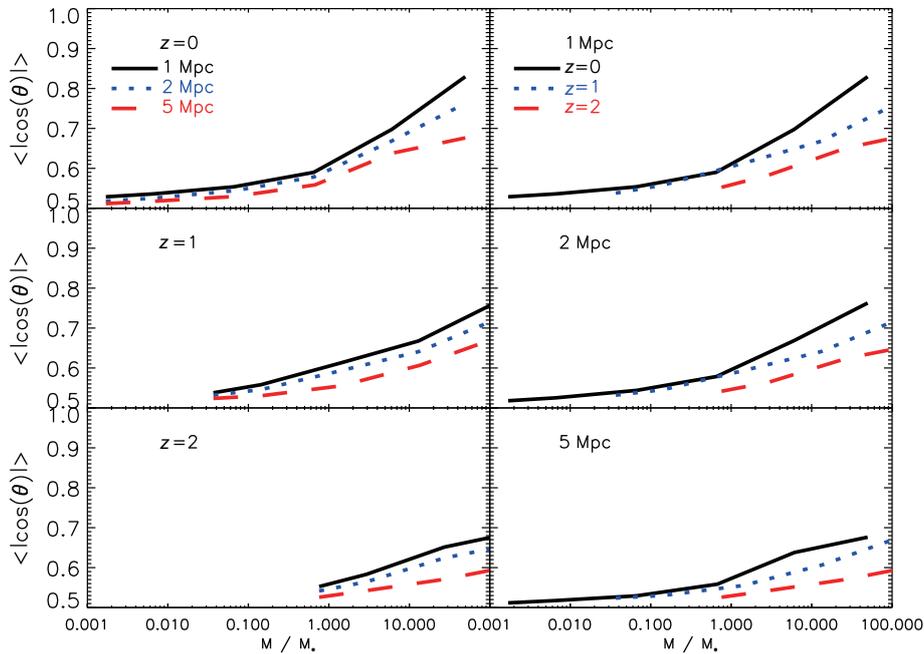


图 11 (网络版彩图) 暗晕主轴与大尺度结构塌缩最弱的方向 e_3 之间的夹角与暗晕归一化质量的相关性, 图中给出了此种相关性与红移、大尺度结构计算方法的依赖性 [26]

Figure 11 (Color online) The mean angle between the halo major axis and the slowest collapse direction on large scales, e_3 , calculated from the Hessian matrix using different smooth length. The plot shows this dependence on redshift and the smooth length [26].

在 Sheet 平面, 且对暗晕质量的依赖性较弱; 对于处在 Filament 环境中的暗晕, 角动量与 Filament 方向的趋势与暗晕质量有关: 低质量暗晕的角动量与 Filament 有平行趋势, 大质量暗晕的角动量与 Filament 呈垂直趋势. 后面的相关研究都证实了 Aragon-Calvo 等人的结论. 需要提醒的是这些平行或垂直的信号都比较弱, 在 $50^\circ - 40^\circ$ 之间. 角动量与 Filament 相关性处于反转的质量大约在 $5 \times 10^{11} M_\odot - 5 \times 10^{12} M_\odot$ 之间, 具体依赖于如何定义大尺度结构、潮汐场的平滑因子长度等. 利用观测数据测量星系角动量 - 大尺度结构的相关性的结论之间略有差别. Lee 和 Pen^[101]2002 年利用 IRAS 点源红移巡天 (Point Source Catalog Redshift, PSCz) 发现星系的角动量与 Filament 方向垂直. Temple 等人^[24]2013 年利用 SDSS 巡天发现旋涡星系的角动量倾向于与 Filament 平行, 而椭圆星系的角动量倾向于与 Filament 垂直. Zhang 等人^[25]在 2015 年发现旋涡星系的角动量与 Filament 有垂直趋势. 表面上看来这些不同观测数据的结果略有矛盾, 但是由于星系 - 大尺度结构之间的平行或者垂直趋势都非常弱, 不同的研究选取的星系样本、定义的大尺度结构方法都不一样, 因此可以理解他们之间的细微差别. 目前大部分研究者都倾向于认为星系角动量 - 大尺度结构之间的关系应该与数值模拟的结论比较一致: 小质量星系的角动量与 Filament 有平行趋势, 大质量星系的角动量与 Filament 有垂直趋势.

实际上更感兴趣的不仅仅是角动量 - 大尺度结构相关性对暗晕质量依赖性的反转到底是发生在多大质量的暗晕或者是多亮的星系, 而是为什么角动量 - 大尺度结构相关性会发生反转. 可以确定的是这种反转不是数值效应, 几乎所有的数值模拟都发现了这个现象. 一些研究^[102-105]指出这可能跟不同质量暗晕的并合历史有关: 他们推测, 大质量暗晕的物质吸积或并合主要是沿着 Filament 方向, 而小质量暗晕的物质吸积主要是沿着垂直于 Filament 方向. 假设吸积物质的角动量转化为暗晕的角动量, 可以很自然地预言角动量 - 大尺度结构对暗晕质量的依赖性. 可惜的是他们^[102-105]只是推测, 并没有给出直接的证据. Kang 和 Wang^[26]利用一组高分辨的数

值模拟, 追踪不同质量暗晕的形成历史. 他们选取了红移 $z = 0$ 的不同质量暗晕, 计算了其形成历史中子结构被吸积进入主暗晕的夹角, 图 12 给出了他们的结果.

图中红色虚线表示子结构进入主暗晕时与当时主暗晕大尺度结构的最慢塌缩方向 e_3 的夹角, 黑色实线为子结构与当时主暗晕主轴方向的夹角. 可以看出子结构的吸积沿着暗晕主轴方向是普适的, 信号随着主暗晕质量的增加而变强. 有意思的是子结构进入主暗晕与 e_3 方向并非普适的, 对于小质量暗晕其子结构倾向于沿着垂直于 e_3 方向进入, 而对于大质量暗晕, 其子结构是沿着 e_3 方向进入的, 如果假设子结构的轨道角动量转化为主暗晕最后的角动量, 可以很自然地预测到暗晕角动量 - 大尺度结构的质量依赖性. Libeskind 等人^[105]2014 年也研究了子结构进入暗晕时与 e_3 方向的夹角. 需要指出的是他们的研究与 Kang 和 Wang 的研究有几点不同: (1) 他们定义大尺度结构环境不是用密度场, 而是用速度场. (2) 他们采用速度场的平滑因子是与暗晕的维里半径有关, 而 Kang 和 Wang 用的是一个对暗晕质量无关的平滑因子. Libeskind 等人发现子结构进入主暗晕时与 e_3 方向的夹角是一个普适关系, 都是沿着 e_3 方向进入的, 只是强度随主暗晕质量增加而变强. 如果该关系对所有质量主暗晕都适用, 则很难解释为什么会出现角动量 - 大尺度结构方向质量依赖性中的反转. Kang 和 Wang 指出其实 Libeskind 等人得出这个结论的主要原因是他们选取主暗晕质量时采取的质量范围太大, 低质量主暗晕的信号被掩盖了.

最近 Wang 和 Kang^[2]继续研究了暗晕角动量 - 大尺度结构相关性反转的物理起源. 他们发现对于红移 $z = 0$ 的大质量暗晕, 其早期角动量也倾向于平行大尺度结构的 e_3 方向, 且早期其前身主暗晕大部分处在 Sheet 环境中, 因此角动量处在 e_3, e_2 构成的平面内. Zel'dovich 近似理论表明在 Sheet 形成时物质主要沿着 Sheet 的法线方向进入, 因此很自然可以得到暗晕的角动量处在 e_3, e_2 构成的平面内. 但是当暗晕的环境从 Sheet 变为 Filament 时, 物质吸积则主要是沿着 Filament 方向进行的. Wang 和 Kang 进一步指

2) Wang P, Kang X. The nature of the correlation between dark matter halo spin and the large scale environment. In preparation

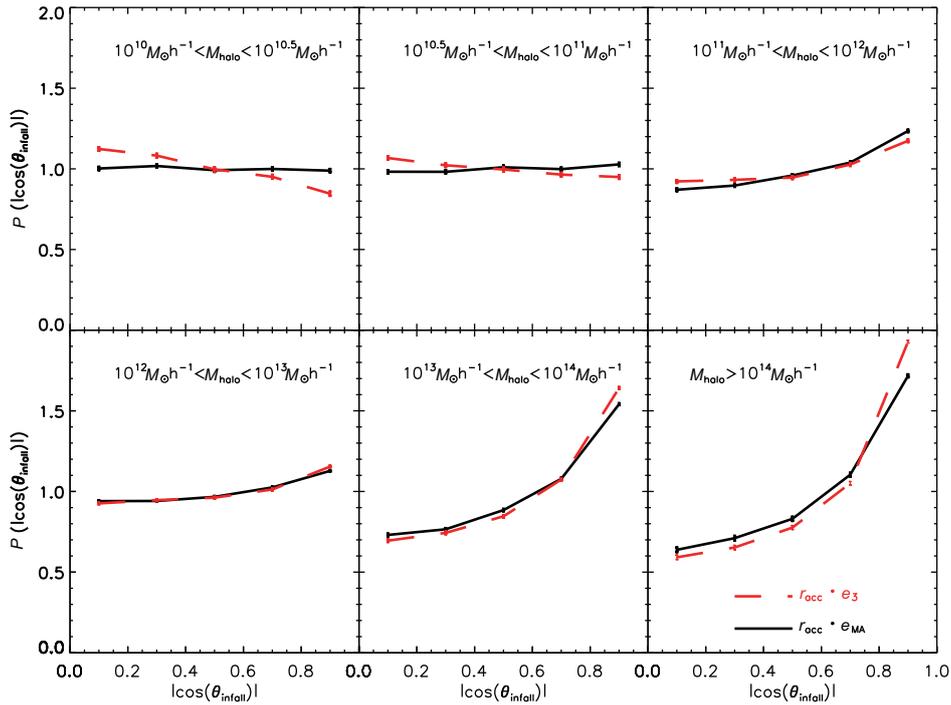


图 12 (网络版彩图) 子结构被吸积进入主暗晕的夹角的概率分布, 每个小图中的暗晕质量范围表示为暗晕在 $z=0$ 时刻的维里质量范围 [26]

Figure 12 (Color online) The probability distribution of alignment angle at their time of being accreted. Different panels are for the final host haloes at $z=0$ with different virial mass [26].

出, 低质量暗晕形成时间较早, 大质量暗晕形成时间较晚, 但是低质量暗晕的大尺度环境由 Sheet 变为 Filament 的时间较晚, 而大质量暗晕则较早进入 Filament. 因此大质量暗晕的质量增长主要在 Filament 内, 其物质吸积主要沿着 Filament 方向, 而小质量暗晕的质量增长主要在 Sheet 环境中, 尽管其后来进入了 Filament, 但是在 Filament 内吸积的物质总量只占其总质量的少部分, 所以其大部分物质是沿着垂直于 Filament 的方向进入的. 总体来说, 是由于不同质量暗晕的形成时间和进入 Filament 时间的差异导致了暗晕角动量 - 大尺度结构相关性对质量的依赖性和反转.

4 总结与展望

本文回顾了在不同尺度上的星系排列现象, 这里简单总结一下. 研究者一般关注如下 3 种排列情况:

(1) 暗晕内卫星星系的分布. 银河系和 M31 内的卫星星系分布在一个较薄的平面内, 特别是银河系卫星星系分布在一个跟银盘垂直的平面内. 同时大部分卫星星系还具有较一致的角动量方向, 这表明这些卫星星系可能有共同的起源. 关于该分布目前较主流的看法是卫星星系倾向于沿着暗晕的主轴方向进入到主暗晕. 但是很难解释为什么卫星星系具有一致的角动量方向. 有研究表明同时具有薄平面分布和共同角动量的概率小于 1%, 因此银河系可能并非冷暗物质模型中的典型星系, 总之对这一问题还有争论. 利用 SDSS 的大量星系样本, 研究者发现暗晕内的卫星星系倾向于分布在中央星系的主轴方向, 且该排列对于红色中央星系或红色卫星星系信号最强. 主流解释认为是因为暗晕的形状本身并非球对称, 而是呈三轴椭球分布. 流体数值模拟研究表明中央星系的形状与暗晕内部形状之间的指向性较好, 且随暗晕质量增加而变强, 这个说法能解释为什么卫星星系排列依赖于中央星系的颜色和光度.

(2) 中央星系之间的指向相关. 大量巡天数据表明明亮红星系的主轴之间存在一定的排列相关, 该信号可延伸到几十 Mpc 的尺度. 利用数值模拟研究表明这主要是宇宙大尺度潮汐场导致, 但是要解释观测到的信号强度, 要求中央星系与暗晕形状之间存在约 $30^\circ - 40^\circ$ 的偏差. 中央星系形状之间的指向相关对弱引力信号测量非常关键, 值得更进一步研究.

(3) 星系和大尺度结构之间的指向相关. 观测和数值模拟都表明暗晕(星系)的主轴与大尺度结构之间一定的相关性, 特别是处在 Filament 环境的暗晕, 其主轴都倾向于沿着 Filament 的方向, 且指向性随暗晕质量增加而变强. 暗晕的角动量与大尺度环境之间存在相关: 暗晕角动量与潮汐场的中轴有平行趋势, 符合潮汐扭矩理论 (TTT) 预言. 处在 Sheet 环境中的暗晕, 其角动量倾向于处在 Sheet 平面, 且对暗晕质量依赖性较弱; 处在 Filament 中的暗晕, 其角动量与 Filament 之间的倾向性与暗晕质量有关: 大质量暗晕的角动量倾向于垂直 Filament 方向, 小质量

暗晕的角动量倾向于平行 Filament 方向. 星系的观测也有类似的角动量反转现象. 有研究表明这与物质进入暗晕时的方向有关.

总的来说, 星系或暗晕在空间的排列、指向相关等与冷暗物质理论比较符合. 冷暗物质理论预言在不同尺度上, 暗晕或大尺度结构的形成, 都是各向异性的. Zel'dovich 近似理论可以很好地描述大尺度结构各向异性的形成, 而非线性演化则主要影响暗晕的形状和小尺度上物质的分布, 但非线性演化并未完全抹平原初物质的各向异性吸积, 因此在不同的尺度上都能看到一定的空间排列相关. 对于下一步的研究, 我们认为在观测方面需要进一步研究星系在不同尺度上的排列对星系性质、大尺度环境的依赖关系, 这有助于理解星系形成的物理过程及其对环境的依赖. 理论上我们需要理解是否能利用星系的排列、大尺度结构的统计特性来限制暗物质性质(冷暗物质或温暗物质)或者暗能量模型(宇宙学常数或其他引力理论等). 目前这一方面的研究还很少, 需要进一步加强.

参考文献

- 1 Springel V, White S D M, Jenkins A, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 2015, 435: 629–636
- 2 Joachimi B, Cacciato M, Kitching T D, et al. Galaxy alignments: An overview. *Space Sci Rev*, 2015, 193: 1–65
- 3 Kiessling A, Cacciato M, Joachimi B, et al. Galaxy alignments: Theory, modelling & simulations. *Space Sci Rev*, 2015, 193: 67–136
- 4 Cooray A, Sheth R. Halo models of large scale structure. *Phys Rep*, 2002, 372: 1–129
- 5 Hahn O, Porciani C, Carollo C M, et al. Properties of dark matter haloes in clusters, filaments, sheets and voids. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 375: 489–499
- 6 Rood H J, Baum W A. Photographic brightness profiles of coma cluster galaxies. I. Catalogue of program galaxies. *Astron J*, 1967, 72: 398–406
- 7 Sastry G N. Clusters associated with supergiant galaxies. *Publ Astron Soc Pacific*, 1968, 80: 252–262
- 8 Holmberg E. A study of physical groups of galaxies. *Arkiv Astron*, 1969, 5: 305–343
- 9 Lynden-Bell D. Dwarf galaxies and globular clusters in high velocity hydrogen streams. *Mon Not R Astron Soc*, 1976, 174: 695–710
- 10 Yang X, Van Den Bosch F C, Mo H J, et al. The alignment between the distribution of satellites and the orientation of their central galaxy. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 369: 1293–1302
- 11 Pen U L, Lee J, Seljak U. Tentative detection of galaxy spin correlations in the tully catalog. *Astrophys J*, 2000, 543: L107–L110
- 12 Brown M L, Taylor A N, Hambly N C, et al. Measurement of intrinsic alignments in galaxy ellipticities. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 333: 501–509
- 13 Hirata C M, et al, (PHENIX Collaboration). Galaxy-galaxy weak lensing in the Sloan digital sky survey: Intrinsic alignments and shear calibration errors. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 353: 529–549
- 14 Heymans C, Brown M, Heavens A, et al. Weak lensing with COMBO-17: Estimation and removal of intrinsic alignments. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 347: 895–908
- 15 Okumura T, Jing Y P, Li C. Intrinsic ellipticity correlation of SDSS luminous red galaxies and misalignment with their host dark matter halos. *Astrophys J*, 2009, 694: 214–221

- 16 Faltenbacher A, Li C, White S D M, et al. Alignment between galaxies and large-scale structure. *Res Astron Astrophys*, 2009, 9: 41–58
- 17 Li C, Jing Y P, Faltenbacher A, et al. The detection of the large-scale alignment of massive galaxies at $z \sim 0.6$. *Astrophys J*, 2013, 770: L12
- 18 Troxel M. Weak lensing in the dark energy survey. In: *Proceedings of APS April Meeting Abstracts*. Salt Lake, 2016
- 19 Kirk D, et al. (PHENIX Collaboration). Cross-correlation of gravitational lensing from DES science verification data with SPT and Planck lensing. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 459: 21–34
- 20 Leclercq F, Lavaux G, Jasche J, et al. Comparing cosmic web classifiers using information theory. arXiv: 1606.06758
- 21 Trujillo I, Carretero C, Patiri S G. Detection of the effect of cosmological large-scale structure on the orientation of galaxies. *Astrophys J*, 2007, 640: L111–L114
- 22 Lee J, Erdogdu P. The alignments of the galaxy spins with the real-space tidal field reconstructed from the 2MASS redshift survey. *Astrophys J*, 2007, 671: 1248–1255
- 23 Paz D J, Stasyszyn F, Padilla N D. Angular momentum-large-scale structure alignments in Λ CDM models and the SDSS. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 389: 1127–1136
- 24 Tempel E, Libeskind N I. Galaxy spin alignment in filaments and sheets: Observational evidence. *Astrophys J*, 2013, 775: L42
- 25 Zhang Y, Yang X, Wang H, et al. Spin alignments of spiral galaxies within the large-scale structure from SDSS DR7. *Astrophys J*, 2015, 798: 17
- 26 Kang X, Wang P. The accretion of dark matter subhalos within the cosmic web: Primordial anisotropic distribution and its universality. *Astrophys J*, 2015, 813: 6
- 27 Zhang Y, Yang X, Wang H, et al. Alignments of galaxies within cosmic filaments from SDSS DR7. *Astrophys J*, 2013, 779: 160
- 28 Zel'dovich Y B. Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations. *Astron Astrophys*, 1970, 5: 84–89
- 29 Hidding J, Shandarin S F, Van De Weygaert R. The Zel'dovich approximation: Key to understanding cosmic web complexity. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 437: 3442–3472
- 30 Mo H, Van Den Bosch F C, White S. *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- 31 Wang H, Mo H J, Jing Y P, et al. Internal properties and environments of dark matter haloes. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 413: 1973–1990
- 32 Aragón-Calvo M A, Jones B J T, Van De Weygaert R, et al. The multiscale morphology filter: Identifying and extracting spatial patterns in the galaxy distribution. *Astron Astrophys*, 2007, 474: 315–338
- 33 Zhang Y, Yang X, Faltenbacher A, et al. The spin and orientation of dark matter halos within cosmic filaments. *Astrophys J*, 2009, 706: 747–761
- 34 Libeskind N I, Hoffman Y, Knebe A, et al. The cosmic web and the orientation of angular momenta. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 421: L137–L141
- 35 Cautun M, Van De Weygaert R, Jones B J T. NEXUS: Tracing the cosmic web connection. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 1286–1308
- 36 Sousbie T, Pichon C, Colombi S, et al. The 3D skeleton: Tracing the filamentary structure of the universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 383: 1655–1670
- 37 Tempel E, Stoica R S, Martínez V J, et al. Detecting filamentary pattern in the cosmic web: A catalogue of filaments for the SDSS. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 438: 3465–3482
- 38 Forero-Romero J E, Contreras S, Padilla N. Cosmic web alignments with the shape, angular momentum and peculiar velocities of dark matter haloes. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 443: 1090–1102
- 39 Hoyle F. On the cosmological problem. *Mon Not R Astron Soc*, 1949, 109: 365–371
- 40 Peebles P J E. Origin of the angular momentum of galaxies. *Astrophys J*, 1969, 155: 393–402
- 41 Doroshkevich A G. The space structure of perturbations and the origin of rotation of galaxies in the theory of fluctuation. *Astrofizika*, 1970, 6: 581–600
- 42 White S D M. Angular momentum growth in protogalaxies. *Astrophys J*, 1984, 286: 38–41
- 43 Porciani C, Dekel A, Hoffman Y. Testing tidal-torque theory-I. Spin amplitude and direction. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 332: 325–338
- 44 Jing Y P, Suto Y. Triaxial modeling of halo density profiles with high-resolution N-body simulations. *Astrophys J*, 2002, 574: 538–553
- 45 Bailin J, Steinmetz M. Internal and external alignment of the shapes and angular momenta of Λ CDM halos. *Astrophys J*, 2005, 627: 647–665
- 46 Hahn O, Carollo C M, Porciani C, et al. The evolution of dark matter halo properties in clusters, filaments, sheets and voids. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 381: 41–51
- 47 Bett P, Eke V, Frenk C S, et al. The spin and shape of dark matter haloes in the Millennium simulation of a Λ cold dark matter universe. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: 215–232
- 48 Kroupa P, Theis C, Boily C M. The great disk of Milky-Way satellites and cosmological sub-structures. *Astron Astrophys*, 2005, 431: 517–521
- 49 Kang X, Mao S, Gao L, et al. Are great disks defined by satellite galaxies in Milky-Way type halos rare in Λ CDM? *Astron Astrophys*, 2005, 437: 383–388
- 50 Zentner A R, Kravtsov A V, Gnedin O Y, et al. The anisotropic distribution of galactic satellites. *Astrophys J*, 2005, 629: 219–232

- 51 Libeskind N I, Frenk C S, Cole S, et al. The distribution of satellite galaxies: The great pancake. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 363: 146–152
- 52 Li Y S, Helmi A. Infall of substructures on to a Milky Way-like dark halo. *Mon Not R Astron Soc*, 2008, 385: 1365–1373
- 53 Metz M, Kroupa P, Libeskind N I. The orbital poles of Milky Way satellite galaxies: A rotationally supported disk of satellites. *Astrophys J*, 2008, 680: 287–294
- 54 Kroupa P, Famaey B, De Boer K S, et al. Local-group tests of dark-matter concordance cosmology. Towards a new paradigm for structure formation. *Astron Astrophys*, 2010, 523: A32
- 55 Pawlowski M S, Pflamm-Altenburg J, Kroupa P. The VPOS: A vast polar structure of satellite galaxies, globular clusters and streams around the Milky Way. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 423: 1109–1126
- 56 Pawlowski M S, McGaugh S S, Jerjen H. The new Milky Way satellites: Alignment with the VPOS and predictions for proper motions and velocity dispersions. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 453: 1047–1061
- 57 Metz M, Kroupa P, Jerjen H. The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 374: 1125–1145
- 58 Ibata R A, et al, (PHENIX Collaboration). A vast, thin plane of corotating dwarf galaxies orbiting the Andromeda galaxy. *Nature*, 2013, 493: 62–65
- 59 Pawlowski M S, Kroupa P, Jerjen H. Dwarf galaxy planes: The discovery of symmetric structures in the local group. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 435: 1928–1957
- 60 Pawlowski M S, Kroupa P. The rotationally stabilized VPOS and predicted proper motions of the Milky Way satellite galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 435: 2116–2131
- 61 Pawlowski M S, Famaey B, Merritt D, et al. On the persistence of two small-scale problems in Λ CDM. *Astrophys J*, 2015, 815: 19
- 62 Kang X, Wang L, Luo Y. The gap of stellar mass in galaxy groups: Another perspective of the too-big-to-fail problem in the Milky Way. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 460: 2152–2156
- 63 Hawley D L, Peebles P J E. Distribution of observed orientations of galaxies. *Astron J*, 1975, 80: 477–491
- 64 Sharp N A, Lin D N C, White S D M. A test of the tidal hypothesis for the origin of galactic angular momentum. *Mon Not R Astron Soc*, 1979, 187: 287–291
- 65 Sales L, Lambas D G. Anisotropy in the distribution of satellites around primary galaxies in the 2dF galaxy redshift survey: The Holmberg effect. *Mon Not R Astron Soc*, 2004, 348: 1236–1240
- 66 Brainerd T G. Anisotropic distribution of SDSS satellite galaxies: Planar (not polar) alignment. *Astrophys J*, 2005, 628: L101–L104
- 67 Azzaro M, Patiri S G, Prada F, et al. Angular distribution of satellite galaxies from the Sloan digital sky survey data release 4. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 376: L43–L47
- 68 Faltenbacher A, Li C, Mao S, et al. Three different types of galaxy alignment within dark matter halos. *Astrophys J*, 2007, 662: L71–L74
- 69 Hirata C M, Mandelbaum R, Ishak M, et al. Intrinsic galaxy alignments from the 2SLAQ and SDSS surveys: Luminosity and redshift scalings and implications for weak lensing surveys. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 381: 1197–1218
- 70 Donoso E, O’Mill A, Lambas D G. Alignment between luminous red galaxies and surrounding structures at $z \sim 0.5$. *Mon Not R Astron Soc*, 2006, 369: 479–484
- 71 Nierenberg A M, Auger M W, Treu T, et al. Luminous satellites of early-type galaxies. I. Spatial distribution. *Astrophys J*, 2011, 731: 44
- 72 Agustsson I, Brainerd T G. The locations of satellite galaxies in a Λ CDM universe. *Astrophys J*, 2011, 650: 550–559
- 73 Kang X, Van Den Bosch F C, Yang X, et al. The alignment between satellites and central galaxies: Theory versus observations. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 378: 1531–1542
- 74 Wang Y O, Lin W P, Kang X, et al. Satellite alignment. I. Distribution of substructures and their dependence on assembly history from N -body simulations. *Astrophys J*, 2014, 786: 8
- 75 Libeskind N I, Cole S, Frenk C S, et al. Satellite systems around galaxies in hydrodynamic simulations. *Mon Not R Astron Soc*, 2007, 374: 16–28
- 76 Deason A J, McCarthy I G, Font A S, et al. Mismatch and misalignment: Dark haloes and satellites of disc galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415: 2607–2625
- 77 Dong X C, Lin W P, Kang X, et al. The distribution of satellites around central galaxies in a cosmological hydrodynamical simulation. *Astrophys J*, 2014, 791: L33
- 78 Springel V. The cosmological simulation code GADGET-2. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 364: 1105–1134
- 79 Pápai P, Sheth R K. On the anisotropic density distribution on large scales. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 429: 1133–1138
- 80 Benson A J. Orbital parameters of infalling dark matter substructures. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 358: 551–562
- 81 Wang H Y, Jing Y P, Mao S, et al. The phase-space distribution of infalling dark matter subhaloes. *Mon Not R Astron Soc*, 2005, 364: 424–432

- 82 Troxel M A, Ishak M. The intrinsic alignment of galaxies and its impact on weak gravitational lensing in an era of precision cosmology. *Phys Rep*, 2015, 558: 1–59
- 83 Miralda-Escude J. The correlation function of galaxy ellipticities produced by gravitational lensing. *Astrophys J*, 1991, 380: 1–8
- 84 Heavens A, Refregier A, Heymans C. Intrinsic correlation of galaxy shapes: Implications for weak lensing measurements. *Mon Not R Astron Soc*, 2000, 319: 649–656
- 85 Jing Y P. Intrinsic correlation of halo ellipticity and its implications for large-scale weak lensing surveys. *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 335: L89–L93
- 86 Landy S D, Szalay A S. Bias and variance of angular correlation functions. *Astrophys J*, 1993, 412: 64–71
- 87 Catelan P, Kamionkowski M, Blandford R D. Intrinsic and extrinsic galaxy alignment. *Mon Not R Astron Soc*, 2001, 320: L7–L13
- 88 Hirata C M, Seljak U. Intrinsic alignment-lensing interference as a contaminant of cosmic shear. *Phys Rev D*, 2004, 70: 063526
- 89 Blazek J, McQuinn M, Seljak U. Testing the tidal alignment model of galaxy intrinsic alignment. *J Cosmology Astro-Particle Phys*, 2011, 5: 010
- 90 Lee J, Pen U L. Cosmic shear from galaxy spins. *Astrophys J*, 2000, 532: L5–L8
- 91 Bridle S, King L. Dark energy constraints from cosmic shear power spectra: Impact of intrinsic alignments on photometric redshift requirements. *New J Phys*, 2007, 9: 444
- 92 Schneider M D, Bridle S. A halo model for intrinsic alignments of galaxy ellipticities. *Mon Not of R Astron Soc*, 2010, 402: 2127–2139
- 93 Joachimi B, Semboloni E, Bett P E, et al. Intrinsic galaxy shapes and alignments-I. Measuring and modelling COSMOS intrinsic galaxy ellipticities. *Mon Not R Astron Soc*, 2013, 431: 477–492
- 94 Hilbert S, Xu D, Schneider P, et al. Intrinsic alignments in the illustris simulation. *arXiv: 1606.03216*
- 95 Chisari N, Codis S, Laigle C, et al. Intrinsic alignments of galaxies in the horizon-AGN cosmological hydrodynamical simulation. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 454: 2736–2753
- 96 Van Haarlem M, Van de Weygaert R. Velocity fields and alignments of clusters in gravitational instability scenarios. *Astrophys J*, 1993, 418: 544
- 97 Chen S, Wang H, Mo H J, et al. Alignments of dark matter halos with large-scale tidal fields: Mass and redshift dependence. *Astrophys J*, 2016, 825: 49
- 98 Wang H, Mo H J, Yang X, et al. Reconstructing the cosmic velocity and tidal fields with galaxy groups selected from the Sloan digital sky survey. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 420: 1809–1824
- 99 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C, et al. Galaxy groups in the SDSS DR4. I. The Catalog and basic properties. *Astrophys J*, 2007, 671: 153–170
- 100 Aragón-Calvo M A, Van De Weygaert R, Jones B J T, et al. Spin alignment of dark matter halos in filaments and walls. *Astrophys J*, 2007, 655: L5–L8
- 101 Lee J, Pen U L. Detection of galaxy spin alignments in the point source catalog redshift survey shear field. *Astrophys J*, 2002, 567: L111–L114
- 102 Codis S, Pichon C, Devriendt J, et al. Connecting the cosmic web to the spin of dark haloes: Implications for galaxy formation. *Mon Not R Astron Soc*, 2012, 427: 3320–3336
- 103 Welker C, Devriendt J, Dubois Y, et al. Mergers drive spin swings along the cosmic web. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 445: L46–L50
- 104 Codis S, Pichon C, Pogosyan D. Spin alignments within the cosmic web: A theory of constrained tidal torques near filaments. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 452: 3369–3393
- 105 Libeskind N I, Knebe A, Hoffman Y, et al. The universal nature of subhalo accretion. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 443: 1274–1280

The spatial alignment of galaxies on different scales: A review on the theoretical and observational progress

KANG Xi^{1*}, WANG Peng^{1,2}, LUO Yu^{1,2}, XIA QianLi^{1,2} & PAN HengXing^{1,2}

¹ *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

² *Graduate School, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

The spatial distribution of galaxies in our universe is not random, and they demonstrate different alignment patterns on different scales. On the scale of galaxy and galaxy clusters, satellite galaxies tend to be distributed along the major axis of the central galaxy. On large scales, major axis of a central galaxy tends to point towards large scale matter distribution, for example, along the large scale filamentary structure. Even on larger scales, the major axes of different galaxies still have non-negligible correlations. Besides, the angular momentums of galaxies are also correlated with the mass distribution on large scales, with different correlations. This article will review the relative theories and observational developments in galaxies' alignment and spatial distribution, it will show that the anisotropic distributions of galaxies on small scales are determined by the non-spherical nature of dark matter halo, and the correlations with large-scale mass distribution are also the natural predictions of cold dark matter theory, and this article also indicates that studies of galaxy alignment help us to understand the physics of galaxy formation and could be used to constrain the nature of dark matter and dark energy.

large scale structure, galaxy formation and evolution, dark matter, numerical simulation, galaxy evolution

PACS: 03.67.Mn, 03.65.Ud, 03.67.Ac

doi: 10.1360/SSPMA2016-00349