

对N体数值模拟中暗物质晕的卫星星系空间分布的研究*

骆初嘉^{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 北京 100049)

摘要 对N体数值模拟中暗物质晕的卫星星系的空间分布进行三轴椭球拟合,以拟合椭球的轴比来衡量该分布的扁平程度,通过比较不同条件下的轴比分布分析样本数量、样本选取方式以及对样本径向分布的归一化对计算结果的影响,并考察了暗晕所在的大尺度结构的空问方向与拟合椭球的空问取向之间的关系.发现对样本径向分布的归一化对计算结果具有较大影响,同时发现大尺度丝状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴更趋于与丝状结构的方向垂直,而大尺度片状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴则更趋于与片状结构的法线方向平行.

关键词 星系: 群: 普通, 暗物质, 方法: 数值

中图分类号: P157; **文献标识码:** A

1 引言

在 Λ CDM宇宙学模型中,较大的暗物质晕是以等级成团的形式,通过较小的暗物质晕之间的并合形成的.这些较小的暗物质晕在进入宿主暗晕后成为宿主暗晕的次级结构,此后重子物质经过气体冷却、恒星形成及反馈等一系列物理过程,在这些次级结构中形成星系.这些星系就成为宿主暗晕的中央星系的卫星星系.这些卫星星系的空间分布能在一定程度上反映出这些次级结构在进入宿主暗晕及之后的演化过程^[1-2].

Kroupa等^[3]通过分析观测中银河系最亮的一部分卫星星系的空间分布,发现这些卫星星系中的大部分都分布在一个与银盘接近垂直的平面内.而在此基础上,Metz等^[4]又发现这些卫星星系绕银河系公转的轨道中心有明显的聚集,这一发现表明这个卫星星系所分布的平面是由旋转支撑的.此后,Libeskind、Zentner、Lovell以及Wang等人分别进行了大尺度N体数值模拟,试图在模拟结果中找到与观测相类似的分布.Libeskind等^[5]指出,在他们进行的6个暗物质晕的模拟中,每个晕中最亮的若干个卫星星

2015-04-20收到原稿, 2015-05-12收到修改稿

* 江苏省杰出青年科学基金项目(BK20140050), 科技部973项目(2015CM857003, 2013CB834900), 国家自然科学基金项目(11333008, 11173056)及中国科学院B类先导项目(XDB09010403)资助

[†] cjluo@pmo.ac.cn

系都分布在一个较薄的盘状结构中, 他们认为这种分布反映出卫星星系在通过吸积进入暗物质晕的时候倾向于沿着大尺度结构. 而Zentner等^[6]发现如果选择较亮的卫星星系, 这些卫星星系在模拟得到的3个银河系大小的暗物质晕中的分布与观测的银河系的卫星星系分布较一致, 这种分布源于这些卫星星系是沿着大尺度结构被吸积以及之后它们的轨道在一个扁长的、三轴的势阱中的演化. 之后Libeskind等^[7]又通过模拟得到了436个暗物质晕, 并发现其中大部分的暗物质晕中的最亮的卫星星系中至少有3个的角动量方向沿着卫星星系分布的短轴. 而Lovell等^[8]则认为与观测中类似的卫星星系的空间分布在 Λ CDM模型的宇宙学模拟中可以自然地产生. 这一发现支持了Libeskind等的结果. 然而Wang等^[9]则检验了千年II模拟中的1 686个银河系大小的暗物质晕和由Aquarius project模拟的6个暗物质晕, 他们发现其中仅5%到10%的卫星星系分布类似银河系. 同时Pawlowski等^[10-11]也认为 Λ CDM模拟并不会大量产生观测到的轨道中心的聚集.

观测中M31的卫星星系空间分布也被认为是非各向同性的^[12-13]. Ibata等^[14]注意到有一个由卫星星系环绕M31的轨道构成的薄平面的存在. 他们分析了由Pan-Andromeda Archaeological Survey证认出的27个卫星星系并发现其中15个卫星星系位于一个平均厚度仅 (12.6 ± 0.6) kpc的薄平面内. 更进一步地, 其中13个卫星星系围绕M31的公转方向是一致的. Ibata等^[14]发现如果假设观测区域内的卫星星系绕M31公转的轨道平面的空间取向是随机的, 那将只有0.13%的几率使得这些卫星星系的轨道构成的平面如同观测到的那么薄, 随后Ibata等分别从卫星星系通过吸积进入暗物质晕和卫星星系由本地产生两个方面讨论了这个薄平面产生的可能性, 但最终他们认为这两种方式均无法完全解释观测到的薄平面的存在.

观测中银河系和M31当中分别有一部分卫星星系的空间分布呈现强烈的非各向同性这一重要的共同点反映出两者可能具有相同的形成历史^[15]. 但仍然有M31和银河系分别独立形成, 而观测中的平行关系只是随机现象而非普遍现象的可能性. 同时通过 Λ CDM模拟对这一现象的普遍性进行检验时产生的争议, 受到对卫星星系空间分布进行描述时是否对卫星星系的径向分布进行了归一化处理、采用的卫星星系样本的选取方式和数量等因素的影响.

本文利用三轴椭球拟合来定量分析N体宇宙学数值模拟结果中质量与银河系相近的暗物质晕的卫星星系的空间分布, 并检验不同的拟合方式和卫星星系的样本选取方式以及数量对结果的影响, 之后在不同的大尺度结构中进行统计, 分析大尺度结构对这一分布的影响. 在第2节中, 将简要介绍本文的数据来源和对数据处理的方法, 统计的结果将在第3节中展示, 而第4节将给出结论.

2 数据来源和数据处理方法

2.1 观测数据

我们使用的观测数据如表1^[16], 按V波段的绝对星等 M_V 排列, 其中 l 和 b 分别是卫星星系的银经和银纬, $r_\odot$ 为卫星星系到太阳的距离, (x, y, z) 是卫星星系在以银心为原点的坐标系中的位置.

表 1 观测中银河系卫星星系的空间分布

Table 1 The observed spatial distribution of the satellite galaxies in the MW

No.	Satellite galaxies	$l/(^{\circ})$	$b/(^{\circ})$	$r_{\odot}/\text{kpc}$	x/kpc	y/kpc	z/kpc	M_V/mag
1	LMC	280.5	-32.9	51	-0.50	-42.10	-27.70	-18.1
2	SMC	302.8	-44.3	64	16.51	-38.50	-44.70	-16.8
3	Canis Major	240.0	-0.8	7	-11.80	-6.06	-0.098	-14.4
4	Sagittarius	5.6	-14.2	26	16.79	2.46	-6.378	-13.5
5	Fornax	237.1	-65.7	147	-41.16	-50.79	-133.98	-13.4
6	Leo I	226.0	49.1	254	-123.8	-119.6	191.99	-12.0
7	Sculptor	287.5	-83.2	86	-5.24	-9.71	-85.40	-11.1
8	Leo II	220.2	67.2	233	-77.26	-58.28	214.79	-9.8
9	Sextans	243.5	42.3	86	-36.68	-56.93	57.88	-9.3
10	Carina	260.1	-22.2	105	-25.01	-95.77	-39.67	-9.1
11	Draco	86.4	34.7	76	-4.38	62.36	43.27	-8.8
12	Ursa Minor	105.0	44.8	76	-22.36	52.09	53.55	-8.8
13	CVn I	74.3	79.8	218	2.15	37.16	214.56	-8.6
14	Hercules	28.7	36.9	132	84.29	50.69	79.27	-6.6
15	Bootes I	358.1	69.6	66	14.69	-0.76	61.86	-6.3
16	Leo IV	265.4	57.4	154	-14.95	-82.70	129.74	-5.8
17	Bootes III	35.4	75.4	47	1.36	6.86	45.48	-5.8
18	Ursa Major I	159.4	54.4	97	-61.17	19.84	78.87	-5.5
19	Leo V	261.9	58.5	178	-21.40	-92.08	151.77	-5.2
20	Psc II	79.2	-47.1	182	14.91	121.70	-133.3	-5.0

2.2 N体模拟和半解析模型

为了通过数值模拟对暗物质晕的卫星星系的空间分布进行统计, 我们需要产生一个包含星系足够多并且分辨率足够高的星系样本. 我们利用N体数值模拟来获得暗物质晕的位置分布, 该模拟采用Springel^[17]的Gadget-2代码, 宇宙学参数取 $\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, $\sigma_8 = 0.81$, $h = 0.7$, 在一个边长为 $65 h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 的立方体空间里进行, 包含粒子数为 1024^3 . 利用该模拟给出的暗物质晕分布, 先后利用FOF(friend-of-friend)算法和SUBFIND从模拟结果中找出暗物质晕及其中的次级结构, 要求找出的次级结构包含的最少粒子数为30个. 利用找出的暗物质晕及其次级结构建立暗晕的形成历史, 并引入影响恒星形成的气体冷却、星系并合以及超新星反馈等物理机制, 在各个暗物质晕及其次级结构中形成星系, 详细过程可以参考Kang等^[18]. 我们把暗物质晕中心的质量最大的星系称作中心星系, 其他星系称作其卫星星系, 本文中主要研究的就是这些卫星星系的空间分布.

2.3 三轴椭球拟合

为了描述卫星星系的空间分布, 我们用三轴椭球分别拟合各个暗物质晕的卫星星系的空间分布, 利用拟合所得的椭球的轴比来衡量其空间分布的扁平程度^[19]. 具体方法如下:

首先, 计算该分布的惯性张量,

$$T_{ij} = \frac{\sum x_{ij} \cdot x_{ik}}{K_i}, \quad (1)$$

其中 x_{ij} 和 x_{ik} ($j, k = 1, 2, 3$) 分别为第 i 个卫星星系相对于中心星系的位置矢量 $\mathbf{r}_i$ 的两个分量, $\mathbf{r}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$. K_i 为第 i 个卫星星系的归一化系数. 若在计算时需要对卫星星系的径向分布进行归一化, 则取 $K_i = \sqrt{x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + x_{i3}^2}$, 即第 i 个卫星星系到中心星系的距离; 若不需要进行归一化, 则取 $K_i = 1$.

通过上式计算得到的惯性张量 T_{jk} 是一个3阶实对称张量, 它具有3个正的实特征值. 把这3个特征值的平方根从大到小分别记为 a 、 b 、 c , 这3个值分别是拟合所得的三轴椭球的长轴、中轴和短轴的长度, 而它们所对应的特征向量, 则分别是对应轴的指向. 我们用拟合所得的三轴椭球的短轴 c 和长轴 a 的比 $\frac{c}{a}$ 来衡量卫星星系空间分布的扁平程度, 即 $\frac{c}{a}$ 越小, 拟合椭球越扁, 卫星星系的分布越接近平面, 同时我们用短轴 c 的指向来表征这个空间分布的取向.

2.4 判断暗物质晕所处的大尺度结构的类型与方向

为了考察N体数值模拟中暗物质晕所处的大尺度结构对暗物质晕中的卫星星系的空间分布的影响, 我们利用Hessian矩阵来分析暗物质晕所处的大尺度结构的类型和空间取向^[20]. 具体方法如下:

首先, 利用模拟获得的暗物质晕分布, 构建密度场 $\rho(x_1, x_2, x_3)$, 对第 i 个暗物质晕中心所在的位置 (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}) 可以计算其Hessian矩阵,

$$H_{jk} = \frac{\partial^2 \rho(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})}{\partial x_{ij} \partial x_{jk}}, \quad (2)$$

其中 x_{ij} 和 x_{jk} ($j, k = 1, 2, 3$) 分别为第 i 个暗物质晕中心相对于坐标原点的位置矢量 $\mathbf{r}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ 的两个分量.

之后计算 H_{jk} 的特征值, 并根据特征值的正负情况来判断暗物质晕所处的大尺度结构的类型, 分类如下:

- (1) 若3个特征值都为负值, 则所处的大尺度结构类型为团块结构(cluster);
- (2) 若其中一个特征值为正值, 其余两个特征值为负值, 则所处的大尺度结构类型为丝状结构(filament);
- (3) 若其中一个特征值为负值, 其余两个特征值为正值, 则所处的大尺度结构类型为片状结构(sheet);
- (4) 若3个特征值都为正值, 则所处的大尺度结构类型为空洞结构(void).

本文主要考察丝状结构和片状结构中的暗物质晕. 丝状结构的空间取向可以由其延伸方向来表征, 其Hessian矩阵的正特征值对应的特征向量的指向即为其延伸方向. 片状结构的空间取向可以由其法向量的方向来表征, 其Hessian矩阵的负特征值对应的特征向量的指向即为其法向量的指向.

3 统计结果

3.1 观测中银河系的卫星星系的空间分布

为了考察样本选取数量对计算结果的影响,我们从观测所得的银河系的卫星星系中分别选取了13个和20个最亮的卫星星系作为两组样本.同时为了考察在进行三轴椭球拟合时是否对卫星星系的径向分布进行归一化对计算结果的影响,我们对每组样本分别以进行归一化和不进行归一化两种方式进行了拟合.拟合椭球的短轴与长轴的长度的比值 $\frac{c}{a}$ 如表2所示.

表 2 对观测中银河系的卫星星系的空间分布的拟合结果
Table 2 The fitting results of the observed spatial distribution of the satellite galaxies in the MW

	13 samples	20 samples
Normalized	0.41	0.45
Unnormalized	0.17	0.27

下文中对模拟中暗物质晕的卫星星系的空间分布的扁平程度进行分析时将使用表2中的计算结果作为参照.

3.2 模拟中暗物质晕的卫星星系的空间分布

在从N体数值模拟所得的暗物质晕中选取卫星星系进行三轴椭球拟合时,我们同样分别以13和20作为选取的样本数量.我们从通过模拟获得的暗物质晕中筛选出质量在 $5 \times 10^{11} M_{\odot}$ 到 $2 \times 10^{12} M_{\odot}$ 之间且包含卫星星系数量超过我们想要选取的卫星星系样本数量的暗物质晕.在我们找出的符合要求的暗物质晕中,卫星星系数量大于13个的暗物质晕共有1 756个,其中1 050个分布在丝状结构上,436个分布在片状结构上,而卫星星系数量大于20个的暗物质晕共有1 750个,其中1 047个分布在丝状结构上,434个分布在片状结构上.为了考察样本选取方式对结果的影响,我们分别用3种不同的样本选取方式来从暗物质晕中选取用于三轴椭球拟合的卫星星系样本,这3种样本选取方式包括选取当前质量 M_{pre} 最大的若干个卫星星系,选取在落入宿主暗晕时的质量 M_{acc} 最大的若干个卫星星系以及随机选取若干个卫星星系.我们对每个暗物质晕中选出的卫星星系分别以对卫星星系的径向分布进行归一化以及不进行归一化两种形式进行了三轴椭球拟合,计算出其拟合椭球的短轴与长轴的长度的比值 $\frac{c}{a}$,并对在不同的大尺度环境下,通过不同的样本选取方式从暗物质晕中选取出的不同数量的卫星星系样本分别统计了 $\frac{c}{a}$ 的分布,结果如图1所示.

对比图1中的第1行与第3行以及第2行与第4行,不同列的曲线基本相同,因此可以认为卫星星系的样本数量对统计结果并没有很大的影响.而对比图1中的第1行与第2行以及第3行与第4行,我们可以看到对卫星星系的径向分布进行归一化后,曲线的峰值向 $\frac{c}{a}$ 值较大的一端移动,即进行归一化后的卫星星系扁平程度降低,一定程度上说明卫星星系的空间分布的扁平程度由与中心星系径向距离较大的卫星星系主导,同时表示是否进行归一化会对计算结果产生影响.再对比图中各列,可以看出随着样本选取方式的改变,曲线的形状和峰值位置并没有明显的变化.最后,对比每张图中的实线、虚线和点线,

可以看出在不同的大尺度环境中, 卫星星系的轴比分布都大致相同.

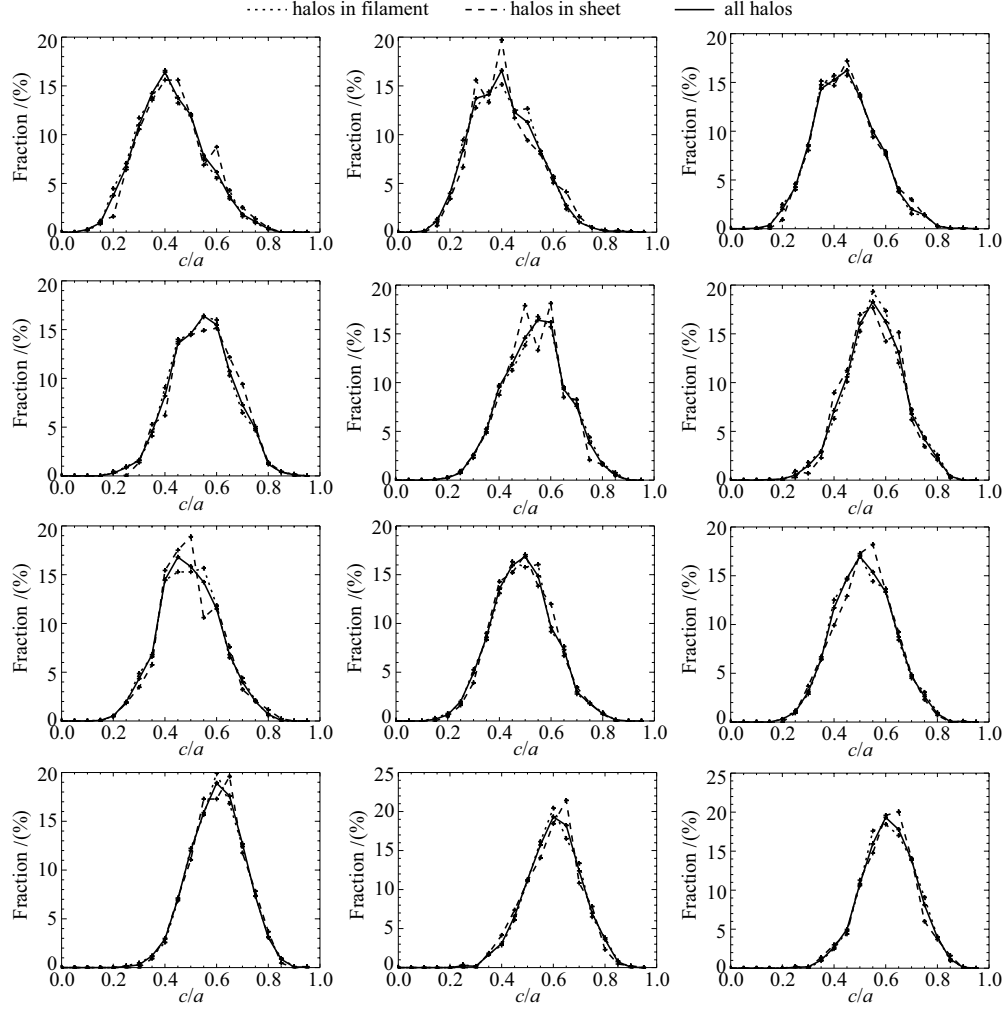


图 1 不同大尺度环境下, 通过不同的样本选取方式从模拟所得的暗物质晕中选出的不同数量的卫星星系样本的拟合椭球的轴比 $\frac{c}{a}$ 的分布. 横轴为 $\frac{c}{a}$ 的值, 而纵轴为该轴比对应的暗晕所占的百分比. 其中从上至下分别对应: (1) 取13个样本, 未进行归一化; (2) 取13个样本, 进行归一化; (3) 取20个样本, 未进行归一化; (4) 取20个样本, 进行归一化. 从左至右分别对应3种不同的样本选取方式: (1) 选取当前质量 M_{pre} 最大的若干个卫星星系; (2) 选取在落入宿主暗晕时的质量 M_{acc} 最大的若干个卫星星系; (3) 随机选取. 图中的点线对应只对丝状结构中的暗晕进行统计得到的结果, 虚线对应只对片状结构中的暗晕进行统计得到的结果, 实线对应对所有符合要求的暗晕进行统计得到的结果.

Fig. 1 The distribution of $\frac{c}{a}$ of the fitting ellipsoid of the satellite galaxies in different large scale structures with different numbers of samples chosen via different means. The x axis is $\frac{c}{a}$, and the y axis is the fraction of the halos. From top to bottom: (1) 13 samples, unnormalized; (2) 13 samples, normalized; (3) 20 samples, unnormalized; (4) 20 samples, normalized. From left to right: (1) choosing the most massive satellites at present; (2) choosing the most massive satellites at the time when they fell into the host halo; (3) choosing the satellites randomly. The dotted line is for the result of the halos in the filament, the dashed line is for the result of the halos in sheet, and the solid line is for the result of all halos.

而后我们又考察了不同情况下拟合椭球的 $\frac{c}{a}$ 比观测中银河系的卫星星系的拟合椭球的 $\frac{c}{a}$ 更小的暗晕的个数及所占的比例, 如表3所示.

表 3 模拟中拟合椭球轴比比银河系小的暗晕的个数及所占的比例
Table 3 The number and fraction of halos in simulation whose axial ratio of fitting ellipsoid smaller than MW in observation

		13 samples		20 samples	
		Normalized	Unnormalized	Normalize	Unnormalized
Filament	Most massive M_{pre}	89(8.48%)	4(0.38%)	46(4.39%)	13(1.24%)
	Most massive M_{acc}	111(10.57%)	6(0.57%)	53(5.06%)	17(1.62%)
	Random	64(6.10%)	2(0.19%)	37(3.53%)	7(0.67%)
Sheet	Most massive M_{pre}	35(8.03%)	3(0.69%)	17(3.92%)	4(0.92%)
	Most massive M_{acc}	44(10.09%)	0(0%)	26(5.99%)	4(0.92%)
	Random	24(0.55%)	0(0%)	20(4.61%)	1(0.23%)

从表3中的数据可以看出在各种情况下, 像观测中的银河系那样扁平的卫星星系的空间分布在模拟中出现的几率都不超过10%. 同时在选取较大质量的卫星星系时, 这种扁平的分布出现的几率比随机选取卫星星系时要高.

最后, 为了考察暗物质晕所在的大尺度结构对暗物质晕中卫星星系的空间分布的影响, 我们统计了不同情况下暗物质晕的拟合椭球的短轴方向与暗物质晕所在的大尺度结构的方向的夹角的余弦值的分布, 结果如图2所示.

从图2中可以看出, 在各种情况下暗晕的卫星星系的拟合椭球的短轴与大尺度结构的方向之间的关系都呈现相同的趋势, 即丝状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴更趋于与丝状结构的方向垂直, 而片状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴则更趋于与片状结构的法线方向平行.

4 结论与讨论

我们通过对N体数值模拟中与银河系质量相近的暗物质晕的卫星星系的空间分布进行三轴椭球拟合, 分析了不同因素对计算结果的影响, 并考察了暗晕所在的大尺度环境对暗晕中卫星星系的空间分布的影响. 得出以下结论:

- (1)卫星星系的样本数量和选取方式对拟合椭球的轴比分布并没有明显的影响, 不同大尺度环境中的轴比分布大致相同, 但在计算时是否对卫星星系的径向分布进行归一化则会对结果产生较大影响, 说明卫星星系的空间分布的扁平程度由距离中心星系较远的卫星星系主导.
- (2)在模拟中, 类似银河系那样的扁平分布出现的几率不超过10%. 而当选取的卫星星系样本质量较大时, 这种分布的出现几率略有上升.
- (3)丝状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴更趋于与丝状结构的方向垂直, 而片状结构中的暗晕的拟合椭球的短轴则更趋于与片状结构的法线方向平行, 这种趋势可能的产生原因是卫星星系所在的次级结构在进入宿主暗晕时的位置和运动方向可能受到宿主

暗晕所处的大尺度结构的影响.

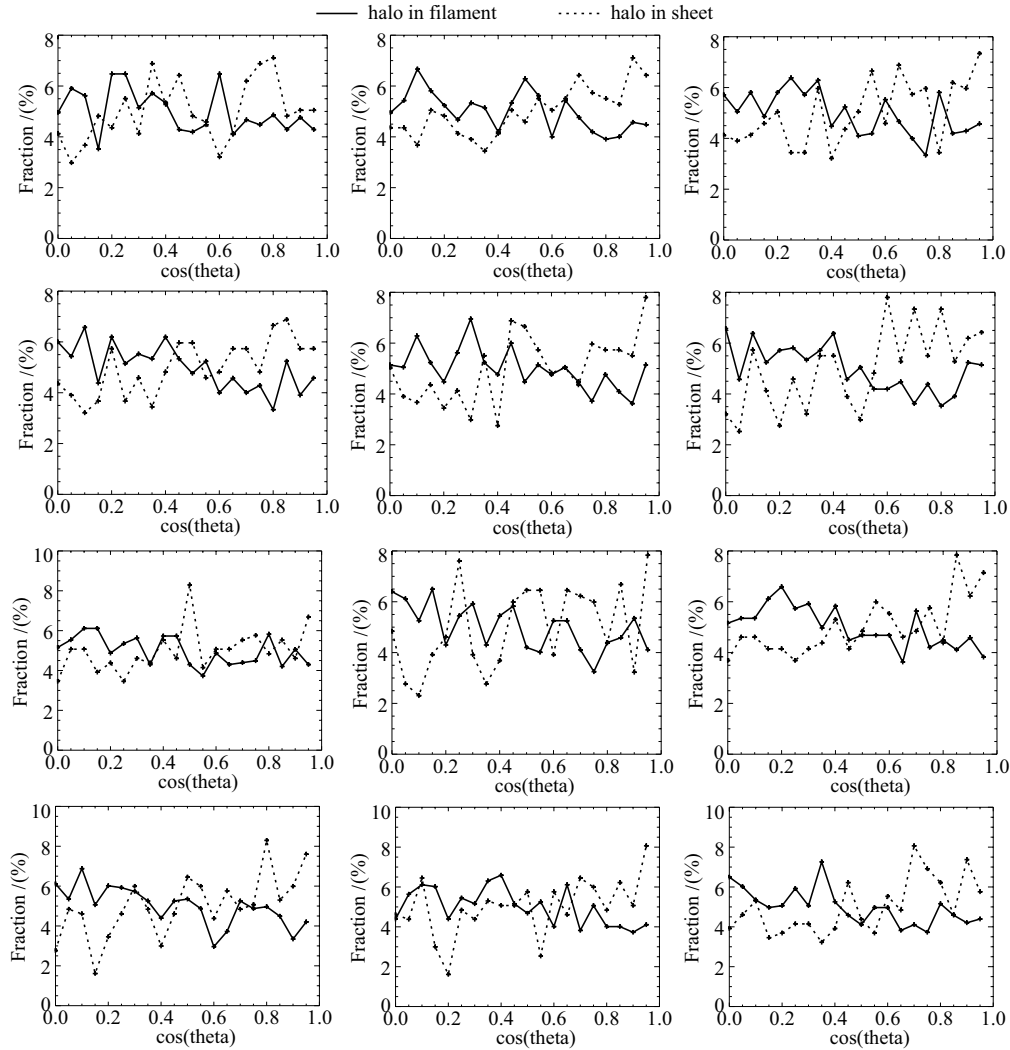


图 2 不同大尺度环境下, 通过不同的样本选取方式从模拟所得的暗物质晕中选出不同数量的卫星星系样本的拟合椭球的短轴与暗晕所在的大尺度结构的方向之间的夹角的余弦值的分布. 横轴为夹角的余弦值, 而纵轴为该余弦值对应的暗晕所占的百分比. 其中从上至下分别对应: (1) 取13个样本, 未进行归一化; (2) 取13个样本, 进行归一化; (3) 取20个样本, 未进行归一化; (4) 取20个样本, 进行归一化. 从左至右分别对应3种不同的样本选取方式: (1) 选取当前质量 M_{pre} 最大的若干个卫星星系; (2) 选取在落入宿主暗晕时的质量 M_{acc} 最大的若干个卫星星系; (3) 随机选取. 图中的实线对应只对丝状结构中的暗晕进行统计得到的结果, 点线对应只对片状结构中的暗晕进行统计得到的结果.

Fig. 2 The distribution of cosine of the angle between the large scale structure and minor axis of the fitting ellipsoid of the satellite galaxies in different large scale structures with different numbers of samples chosen via different means. The x axis is the cosine, and the y axis is the fraction of the halos.

From top to bottom: (1) 13 samples, unnormalized; (2) 13 samples, normalized; (3) 20 samples, unnormalized; (4) 20 samples, normalized. From left to right: (1) choosing the most massive satellites at present; (2) choosing the most massive satellites at the time when they fell into the host halo; (3) choosing the satellites randomly. The solid line is for the result of the halos in the filament, and the dotted line is for the result of the halos in sheet.

我们的结论与Libeskind等^[5]、Lovell等^[8]的结论不同, 在 Λ CDM模型的宇宙学模拟中出现类似观测中银河系的卫星星系那样扁平的分布的几率较低, 这一结果支持了前文提到的Wang等^[9]的观点. 但同时我们对模拟中出现的少数扁平的卫星星系分布仍无法解释其形成的根源. 卫星星系空间分布的拟合椭球的短轴与宿主暗晕所处的大尺度结构的取向之间的相关性暗示着这种扁平分布的产生可能受到宿主暗晕所处的大尺度结构的影响, 这种影响是否存在可以通过进一步研究这一方向的相关性的强弱是否会影响卫星星系分布的扁平程度来进行证实. 同时宿主暗晕本身的形状和空间取向也会对其卫星星系的分布产生一定影响, 而这一影响可以通过统计卫星星系空间分布的拟合椭球的轴比、短轴方向与宿主暗晕本身的轴比和空间方向之间是否存在相关性来进行研究.

参 考 文 献

- [1] 朱维善. 天文学报, 2013, 54: 401
- [2] 韩家信. 天文学报, 2014, 55: 268
- [3] Kroupa P, Theis C, Boily C M. *A&A*, 2005, 431: 517
- [4] Metz M, Kroupa P, Libeskind N I. *ApJ*, 2008, 680: 287
- [5] Libeskind N I, Frenk C S, Cole S, et al. *MNRAS*, 2005, 363: 146
- [6] Zentner A R, Kravtsov A V, Gnedin O Y, et al. *ApJ*, 2005, 629: 219
- [7] Libeskind N I, Frenk C S, Cole S, et al. *MNRAS*, 2009, 399: 550
- [8] Lovell M R, Eke V R, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2011, 413: 3013
- [9] Wang J, Frenk C S, Cooper A P, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 1502
- [10] Pawlowski M S, Kroupa P, de Boer K S, et al. *MNRAS*, 2012, 424: 80
- [11] Pawlowski M S, Kroupa P, Jerjen H. *MNRAS*, 2013, 435: 1928
- [12] Koch A, Grebel E K. *AJ*, 2006, 131: 1405
- [13] McConnachie A W, Irwin M J. *MNRAS*, 2006, 365: 902
- [14] Ibata R A, Lewis G F, Conn A R, et al. *Nature*, 2013, 493: 62
- [15] Hammer F, Yang Y, Fouquet S, et al. *MNRAS*, 2013, 431: 3543
- [16] McConnachie A W. *AJ*, 2012, 144: 4
- [17] Springel V. *MNRAS*, 2005, 364: 1105
- [18] Kang X, Jing Y P, Mo H J, et al. *ApJ*, 2005, 631: 21
- [19] Jing Y P, Mo H J, Fang L Z. *MNRAS*, 1995, 276: 417
- [20] Aragón-Calvo M A, Jones B J T, van de Weygaert R. *A&A*, 2007, 474: 315

A Study on the Spatial Distribution of Satellite Galaxies within Dark Matter Halos in an N-Body Numerical Simulation

LUO Chu-jia^{1,2}

(1 *Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT We fitted the spatial distribution of satellite galaxies of the dark matter halos in N-body numerical simulation to a tri-axial ellipsoid, and then used the axial ratio of the fitting ellipsoid to measure the flatness of that distribution. By comparing the axial ratio distribution under different conditions, we analyzed how the number of samples, the way in which the samples are chosen, and whether the samples are normalized affect the result, then we analyzed the correlation between the minor axis of the fitting ellipsoid and the orientation of the large scale structure. We found that whether the sample were normalized will have a great impact on the result, the minor axes of the fitting ellipsoid of the halos in filament tend to be perpendicular to the filament, and the minor axes of the fitting ellipsoid of the halos in sheet tend to be parallel to the normal vector of sheet.

Key words galaxies: groups: general, dark matter, methods: numerical