星系与子暗晕的统计联系

王岚*

中国科学院国家天文台, 北京 100012

* 联系人, E-mail: wanglan@bao.ac.cn

收稿日期: 2016-07-29; 接受日期: 2016-08-18; 网络出版日期: 2017-01-05

国家自然科学基金资助项目 (编号: 11573031, 11133003)

摘要 伴随 N 体数值模拟精度的不断提高, 不仅暗物质晕的成长历史可以被追踪, 位于暗物质晕势场中的子暗晕的成长历史也能够被追踪. 与暗物质晕相比, 子暗晕和星系的关联更为紧密. 由此发展出一系列以子暗晕为基础的研究星系与子暗晕统计联系的研究工作. 这类方法介于传统的暗晕占据分布模型和星系形成半解析模型之间. 星系的位置和速度通过追踪数值模拟中的子暗晕的轨道和并合历史来预言. 星系的物理性质如恒星成分质量、光度、颜色等由统计的参数化模型和其所在暗晕/子暗晕的性质直接联系起来, 而并不通过模拟具体的恒星形成以及反馈等过程确定. 本文总结并介绍这类星系与子暗晕的统计联系的方法, 举例说明典型模型的建立过程, 并指出星系-子暗晕关联模型的优势和应用时需要注意的问题.

关键词 星系, 暗物质, 子暗晕

PACS: 98.62.Ve, 95.35.+d, 98.62.Dm

1 引言

今天星系形成理论的主要思想可以追溯到近 70 年前. Hoyle^[1] 第一个提出星系的旋转可能由它们在塌缩过程中所经受的潮汐力矩作用产生, White 和 Rees^[2] 提出包含了对引力束缚结构的成团性、气体冷却等描述的星系形成模型, 这也构成了今天星系形成模型的基础. 他们指出星系形成包含两个阶段: 暗物质晕在无耗散引力塌缩过程中形成; 星系在这些暗物质晕结构中由重子物质的冷却形成. 同时, 他们还引入了反馈机制, 避免得到比观测多的暗星系.

为了具体知道星系是如何在暗晕中形成的, 需要将星系的性质和暗晕的性质联系起来. 通过直接测量得到暗晕质量所采用的方法包括: 研究星系的运动学特征^[3] 和星系的引力透镜现象^[4,5]. 而研究星系和它们所在的暗物质晕之间的关系主要有三种方法. 一种是进行直接的数值模拟, 除暗物质粒子外, 模拟中还包括了气体成分用于模拟星系的部分^[6-8]. 另一种方法是半解析模型, 在 N 体数值模拟的基础上, 结合简化的对星系形成过程的物理描述, 通过从星系形成之初追踪气体的冷却、恒星形成、反馈等过程而得到演化到今天星系的的各种性质^[9-11]. 这两种

引用格式: 王岚. 星系与子暗晕的统计联系. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 049806

Wang L. Statistical relation between galaxy and subhalo (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 049806, doi: 10.1360/SSPMA2016-00350

方法都对星系形成的某些物理过程如气体冷却、恒星形成等做了假设, 而目前人们对这些物理过程并没有深入的了解. 第三种方法被称为暗物质晕占据分布模型 (Halo Occupation Distribution, HOD), 这种方法主要从纯统计的角度描述暗物质晕是如何被星系占据的, 通过一些假设的星系和暗晕联系的公式来模拟星系的性质, 从经验的角度研究星系和暗晕的关系^[12,13]. 关于这几种方法的具体介绍参见本刊前面的相关综述.

N 体数值模拟已经成为研究结构形成的一个标准工具, 提供对暗晕结构成长很直接的研究方法, 并且提供了研究暗晕内部结构的可能. 传统的 HOD 模型用统计方法描述星系在暗晕中的数目和分布. 这种方法认为星系的数目和分布只依赖于暗晕的质量, 而和大尺度结构无关. 最近的一些研究表明暗晕成团性对暗晕年龄存在依赖^[14]. 这种效应被称为暗晕的聚集偏差: 早期形成的暗晕比晚期形成的暗晕成团性更强. 更进一步的研究发现星系的成团性也和暗晕的年龄相关^[15,16]. 这表明 HOD 模型中关于星系性质与大尺度结构无关, 而只和暗晕质量有关的假设并不如以前人们所认为的绝对正确.

随着计算机技术的发展, 现今数值模拟的精度不断提高. 通过高精度的数值模拟, 人们不仅可以追踪暗物质晕的成长历史, 还能够追踪位于暗物质晕势场中的子结构, 也就是子暗晕的成长历史^[17]. 子暗晕是和更大的暗晕发生并合之后变为卫星系统的引力束缚结构, 在并合过程发生之前子暗晕的前身暗晕中的星系也随着所在暗晕掉入更大的暗晕中, 并仍然位于子暗晕中. 相比较暗物质晕, 星系的性质和子暗晕应该联系更密切. 因此可以从动力学角度确定暗晕和子暗晕中星系的位置和速度, 而不是假设星系位置和速度的分布.

数值模拟中对子暗晕的认证和研究促进了星系 - 子暗晕关联模型研究的开始和发展, 将星系性质直接与子暗晕的性质联系起来. 这方面最早的工作包括文献^[18-21]. 其中, 文献^[18,20]利用子暗晕的质量分布函数得到给定暗物质晕中不同质量的子暗晕数目, 考虑子暗晕的质量丢失, 并将子暗晕和星系一一对应得到星系的光度. 文献^[19,21]首次将星系与数值模拟中直接得到的子暗晕联系起来. 前者

将星系光度与暗物质晕和子暗晕的最大环绕速度联系起来, 后者研究星系的恒星成分质量和光度与子暗晕质量的关系. 由于星系的位置和速度是从数值模拟的结果中非常精确地直接给出, 并没有如传统 HOD 模型一样依赖星系以及暗晕性质与年龄无关的假设, 这类模型在一定程度上包含了暗晕聚集偏差效应的影响.

然而在数值模拟中, 仅仅用暗晕和子暗晕来代表所能观测到的星系可能仍然并不足够. 在星系形成的标准模型中, 当星系并合进入一个较大的结构如星系团时, 星系周围的气体成分将被激波加热到很高的温度. 伴随这个过程的是恒星形成过程由于星系内部冷气体的消耗殆尽而快速终止. 因此, 在星系被更大结构吸积成卫星星系之后, 它们的恒星质量只有微小的改变. 与此同时, 这些星系的光度会由于所包含恒星成分的不断变老而不断减弱. 另一方面, 这些卫星星系所在的暗物质晕成为子结构后, 它们的外部遭受潮汐力的作用被逐渐剥离, 晕的质量不断减小^[22]. 在靠近暗物质晕中心的区域, 大部分的子结构都被完全破坏了, 并且无法在数值模拟中被辨识出来^[23]. 因此在 N 体数值模拟中, 如果只考察现存的暗晕和其中子结构的信息, 可能就会丢失那些位于被破坏了的子结构中的星系的信息. 更准确的方法是需要追踪位于被破坏的子暗晕中的星系并在模型中将这此星系考虑进去^[19,24].

限制星系 - 子暗晕关联模型的观测统计量主要来自大样本红移巡天数据, 包括表征星系数密度的星系光度函数和质量函数、表征星系成团性的两点相关函数等. 近年流行的丰度匹配模型是星系 - 子暗晕关联模型的一种代表和简化的模型, 只用星系数密度和子暗晕数密度相匹配, 将星系放到相应的子暗晕中. 由于这个方法简单易用, 被广泛使用^[25,26]. 但是这个方法基于数值模拟中能够认证出来的子暗晕, 并不能追踪上述已经被破坏的子暗晕中的星系, 因此对数值模拟精度要求较高, 并且需要在使用时注意与数值模拟精度相适用的质量范围.

下面首先简单讲述暗物质晕和子暗晕的性质, 随后总结并举例说明目前对星系和子暗晕的统计关系的研究工作, 并简单介绍简化的丰度匹配模型, 最后给出讨论和展望.

2 暗物质晕和子暗晕

Press 和 Schechter^[27] 通过假设高斯的密度场并对其在不同尺度进行平滑, 得到引力束缚的物体也就是暗物质晕的丰度 (PS 理论). 这个简单的计算和 N 体数值模拟^[28,29] 得到的结果令人惊讶地相一致. Sheth 等人^[30] 用椭圆塌缩模型代替了 PS 理论中的球塌缩模型, 给出对数值模拟更好的拟合. 文献[31–33] 用一系列 N 体数值模拟建立暗晕的质量函数, 并且给出了对数值模拟结果的拟合公式.

通过比较暗晕的质量函数和观测到的星系/星系团光度函数, 人们可以得到使两者相符合的质光比. 使理论和观测相符合的质光比对暗晕质量有强烈的依赖^[34,35]. 质光比在暗晕质量 $\simeq 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$ 处最小, 在较低和较高质量处增长都约为 6 倍. 要理解其对暗晕质量的依赖, 必须考虑星系形成中重子物质的物理过程.

暗晕的并合历史能够运用 Monte-Carlo 方法得到, 利用扩展的 PS 理论预言前身暗晕的质量分布^[36,37]. 随着数值模拟方法的发展, 更加精确的暗晕并合历史以 N 体数值模拟足够多的输出为基础得到. 暗晕的认证可以通过不同的算法实现, 如 Friends-Of-Friends (FOF) 方法^[38]. 为了研究暗晕的结构和密度轮廓, 人们可以在一个标准的 N 体模拟体积里研究较大质量的暗晕, 或者利用能提供更高精度的可调方案和再模拟来追踪选定的暗晕. Navarro, Frenk 和 White (NFW)^[39] 发现暗晕的密度轮廓遵循普适的形式.

直到 20 世纪 90 年代, 宇宙学 N 体数值模拟给出的结果都表明暗晕是平滑无结构的. 随后, 更高精度的数值模拟中每个典型暗晕能够包含多于 10^6 个粒子^[40–42]. 一旦暗晕进入另一个更大质量暗晕的维里半径内, 它成为大暗晕中的卫星暗晕或子暗晕. 现在的数值模拟已经可以追踪每个子暗晕的形成和演化历史^[17].

在更大的暗晕中运转时, 子暗晕的外部较弥散的部分由于潮汐力作用以及与其他子结构的相互作用而被剥离掉, 因此质量减小. 一个典型暗晕中只有约 10% 的总质量位于其中的子暗晕中, 与它掉进更大暗晕之前的本来质量相比, 子暗晕的质量有相当

大的减少. 子暗晕的环绕速度也受潮汐作用的影响, 但是没有其质量的改变大^[43–45], 子暗晕的中心核部分则由于密度很高能够存留下来.

3 星系和子暗晕的统计关系

由于星系被吸积进更大的结构成为卫星星系之后其质量改变很小, 星系的基本性质主要由它掉进更大结构之前的演化过程决定. 因此可以认为星系的性质和它被吸积前所在暗晕的关系能更本质地反映星系在暗晕中的形成和演化过程. 大多数星系 - 子暗晕关联模型在考虑星系和所在子暗晕之间的关系时, 考察的是子暗晕在星系仍然是暗晕中心天体时, 或者是子暗晕历史上质量/环绕速度最大时刻的性质, 而不像之前的 HOD 模型一样考查今天时刻星系所在的暗晕的质量.

早期的星系 - 子暗晕关联模型将星系性质与数值模拟中现存的子暗晕的性质联系起来^[18,20,21], 得益于当时世界上最大的宇宙学数值模拟 Millennium Simulation^[46], 文献[19] 首次考虑了所在的子暗晕质量已经降低到数值模拟精度之下而未被认证出来的星系, 并对中央星系和卫星星系与子暗晕的关系分别考虑. 后者在其他模型中也被考虑进去^[47,48].

星系 - 子暗晕关联统计模型的最初工作主要考虑红移 0 的观测作为限制, 并考察星系和子暗晕在红移 0 的关系. 随着大尺度星系红移巡天的发展, 人们不仅可以观测到本地宇宙的情况, 同时还能向更高红移处进行观测. 对于星系和所在暗晕的关联模型也向更高红移拓展. 文献[26,48,49] 对高红移的中心星系以及卫星星系与子暗晕关系进行了研究, 能够拟合包括星系的质量函数和相关函数在红移 1 左右的观测, 并以此为基础考察星系的质量随时间的演化, 以及不同增长方式对星系质量增加的贡献. 更高红移处, 星系的成团性观测数据误差较大, 难以对模型进行很好地限制. 文献[49–51] 则对卫星星系和子暗晕的关系做了更细致的模型, 更自洽地考虑卫星星系的质量和子暗晕质量在最后吸积时刻的关系以及演化.

以星系和子暗晕的统计关联模型为基础, 一些

工作进行了星系性质的相关研究, 例如, 文献 [52] 研究了最亮星系团星系的性质. 延续并扩展文献 [19] 的研究, 文献 [24] 模拟了星系的恒星形成历史, 成功拟合观测到的不同质量区间星系的颜色分布, 以及其中不同颜色子样本星系的相关函数.

3.1 星系的恒星成分质量与暗晕质量的关系

在星系和子暗晕的统计关系中, 被研究最多的是星系的恒星成分质量与子暗晕质量之间的关系. 文献 [53] 考察了星系的质量以及恒星速度弥散与星系所处暗晕的关系, 证实了星系的质量和暗晕质量的紧密关联. 这一关系通常用一个双幂律函数构建模型. 不同工作采取的具体函数形式存在差别, 下面以 Wang 等人 [19] 的工作为例, 简单概述建立星系质量 - 子暗晕质量关联模型的典型方法.

从 N 体数值模拟 Millennium Simulation [46] 结果出发, Wang 等人通过追踪子暗晕的轨道和并合历史来预测位于其中的星系的位置和速度. 应用双幂律函数参数化地描述星系的质量 M_{stars} 和其在暗物质晕在被吸积时刻的质量 M_{infall} 之间的关系, M_{infall} 是星系作为所在暗晕的中央主宰天体的最后时刻的暗晕质量. 对于中心星系, 这个质量就是它们今天所在暗物质晕的质量. 而对于卫星星系而言, 这个质量是当星系第一次被一个更大的结构吸积时星系所在暗晕的质量. 质量关系的中间值用双幂律函数描述

$$M_{\text{stars}} = \frac{2}{\left(\frac{M_{\text{infall}}}{M_0}\right)^{-\alpha} + \left(\frac{M_{\text{infall}}}{M_0}\right)^{-\beta}} \times k, \quad (1)$$

其中, M_0 是幂律发生改变的特征暗晕质量, α 和 β 是高质量暗晕和低质量暗晕处的幂律值, k 是归一化常数. 此外, 参数 σ 表征对于给定暗晕质量, 星系质量对上述公式给出的中间值的高斯弥散的大小.

模型的参数通过拟合 SDSS 的观测数据得到的质量函数和不同质量区间的两点相关函数进行限制. 所得到的最佳拟合模型能够同时恢复这些观测统计量, 如图 1 所示. 图 1 中, 红色虚线给出当中心星系和卫星星系采用统一模型参数描述时, 所得到的最佳拟合结果最佳拟合模型. 蓝色点线给出的是当中心星系和卫星星系采用独立的两组参数拟合时的最

佳结果. 这两种情况下的最佳拟合参数以及 χ^2 值在表 1 中列出. 对于中心星系和卫星星系采用独立的拟合参数比不同类型星系采用统一的拟合参数能够得到对观测更好的拟合. 对于给定的 M_{infall} , 卫星星系比中心星系光度低、质量小. 这个效应在低暗晕质量处更加显著. 通过比较由模型得到的星系恒星质量和暗晕质量的关系与从星系弱引力透镜得到的关系类似, 两个结果之间有着很好的一致性.

这个统计方法还考虑了“orphan”星系的贡献. 如引言中讨论, 这些星系由于潮汐力的作用失去了它们所在的暗晕, 因此在今天时刻并没有与之对应的暗晕/子暗晕结构, 也就在之前的方法中没有被包含进去. 文献 [19] 研究表明这些星系在小质量区间, 以及尺度小于 $\sim 1 h^{-1} \text{Mpc}$ 处对相关函数幅度的贡献十分显著, 因此是不能被忽略的. 然而, 必须注意到对数值模拟结果中的 orphan 星系的处理并不是绝对完美的. 作为卫星星系的一部分, 模型考虑了所有的“orphan”系统. 实际情况中, 这些星系中的一部分可能因为潮汐剥离作用被破坏或者质量显著减小. 观测上, 显著存在的星系间光亮物质的确说明了潮汐作用或者并合过程使卫星星系中的部分恒星脱离了束缚. 由于没有考虑潮汐作用对星系质量的剥离, 有可能高估了这类星系的数目.

星系 - 子暗晕质量关系小结: Behroozi 等人 [54,55] 对红移 0 到 4 的中央星系的恒星成分质量 - 暗晕质量关系做了全面分析, 综合并比较了不同的工作, 包括 HOD 模型、星系 - 子暗晕关联模型, 以及弱引力透镜等方法对这一关系的研究结果. 图 2 和 3 分别给出文献 [54] 提供的对目前星系质量和暗晕质量的关系在红移 0 和 1 左右的总结. 红移 0-1 的星系质量 - 暗晕/子暗晕质量关系能够被较好地限制, 不同工作给出的结果比较一致. 其中最大的不确定性来自于对恒星成分质量的测量 (不确定性为 0.25 等左右). 同时, 对星系质量 - 暗晕质量关系中弥散的考虑是必要的, 否则也会带来差不多大小的误差.

3.2 丰度匹配模型

限制星系 - 子暗晕统计关系最常用的观测量为星系的光度函数、质量函数, 以及星系的相关函数

图 1 (网络版彩图) 对 SDSS 的星系恒星成分质量函数和不同质量区间的投影相关函数的最佳拟合模型结果与观测结果的比较. 有误差棒的黑色线段给出 SDSS 观测的结果, 红色虚线和蓝色点线是模型拟合的最佳结果. 当中心星系和卫星星系采用统一的模型参数来描述时, 得到的最佳拟合结果由红色虚线给出, 蓝色点线是当中心星系和卫星星系采用独立的两组参数拟合时的最佳结果. 绿色点线和虚线分别表示蓝色点线所示模型中单独由卫星星系和中心星系分别贡献的部分. 本图引自文献 [19] 中的图 10

Figure 1 (Color online) Best-fitting models to the stellar mass function and the correlation functions evaluated in different stellar mass bins using data from the SDSS. Symbols with error bars are the SDSS results, and dashed color lines are from parametrized models. Dashed red lines are model results when central and satellite galaxies are modeled with the same set of parameters. Dotted blue lines show the results obtained when central and satellite galaxies are treated separately. Green dashed/dotted lines are results for central/satellite subsamples of the parametrized model when central and satellite galaxies are treated separately. This figure is reproduced from Figure 10 of ref. [19].

表 1 由 SDSS 观测数据限制得到的 M_{stars} 和 M_{infall} 关系的最佳拟合参数

Table 1 Best-fitting parameter values for the relation between M_{stars} and M_{infall} as derived from the SDSS data

Marked	$M_0(h^{-1}M_{\odot})$	α	β	$\log(k)$	σ	χ^2	$\chi^2(\Phi)/N_{\Phi}$
统一模型	3.15×10^{11}	0.118	2.87	10.26	0.326	16.96	2.487
中心星系	3.33×10^{11}	0.276	2.59	10.27	0.241	5.351	1.850
卫星星系	4.64×10^{11}	0.122	2.48	10.26	0.334	—	—

等. 近年来, 很多模型直接用光度函数或者质量函数与子暗晕的丰度相匹配, 将质量较大的星系放置在质量 (被吸积时刻的暗晕质量, 或者以最大环绕速度表征) 较大的子暗晕中, 而不考虑其他观测数据的限制. 这种方法在文献 [25] 中被命名为丰度匹配模型 (Abundance Matching). 因为其简单易用, 丰度匹配模型被广泛应用, 例如应用丰度匹配模型研究恒星成分质量的丢失 [56]. 更复杂的丰度匹配模型考虑了不同时期的星系和暗晕的匹配关系 [57].

Moster 等人 [26] 对星系质量 - 子暗晕质量在高红移和低红移的关系进行了研究, 并给出了丰度匹

配模型可行性的依据. 他们考察了模型的不同参数组合对红移 0 的观测拟合质量, 发现拟合相关函数得到的 χ^2 在最小值附近比拟合质量函数得到的 χ^2 在最小值处要宽很多 (图 4). 因此质量函数足够对模型做出很好的限制, 而两点相关函数对参数的变动不敏感. 以此为依据, 可以只用质量函数对星系的恒星成分质量与其所在的暗晕质量的关系模型进行限制.

然而, 需要注意的是, 文献 [26] 的结论是基于红移 0 时的观测得到的, 这一结论在高红移时并不一定正确. 文献 [49] 对于红移 0.8 处只拟合 VVDS 观测的

图 2 (网络版彩图) 不同工作给出的红移 0.1 左右的星系质量 - 暗晕/子暗晕质量关系, y 轴给出星系质量和所在暗晕质量的比值. 不同颜色的线段代表不同的工作. 除本文介绍的星系 - 子暗晕关联模型 (AM+CC) 以及丰度匹配模型 (AM) 之外, 还包括 HOD 模型的结果, 以及对暗晕质量进行直接探测的弱引力透镜 (WL)、卫星动力学 (SD)、强引力透镜 (SL) 等工作结果. 深灰色区域给出统计误差以及由样本不同导致的误差, 浅灰色区域包含系统误差. 本图引自文献 [54] 中图 11, 黑色实线和红色虚线是采用文献 [54] 模型的结果

Figure 2 (Color online) Comparison of different model results of galaxy stellar mass-halo/subhalo mass relation at $z = 0.1$. The y-axis is the ratio between galaxy stellar mass and its host halo/subhalo mass. Results shown include results from galaxy-subhalo connection models (AM+CC); abundance matching (AM); halo occupation distribution modeling (HOD); direct measurements from weak lensing (WL), satellite dynamics (SD), and strong lensing (SL) etc. Dark gray shading indicates statistical and sample variance errors; light gray shading includes systematic errors. This figure is reproduced from Figure 11 of ref. [54]. Black solid line and red dashed lines are the model results of ref. [54].

星系质量函数所得到的最佳拟合模型, 检查其所预言的相关函数. 结果, 星系的相关函数与观测相比整体偏高. 此外, 文献 [58] 也比较了 HOD 和丰度匹配模型对相关函数的预言, 发现丰度匹配模型对相关函数的恢复没有 HOD 模型好. 因此要得到一个可靠的模型结果, 尤其是在高红移处, 需要同时拟合星系的质量函数和相关函数.

文献 [59] 研究了丰度匹配模型对数值模拟精度的依赖. 通过对比 Millennium Simulation 和更高精度的 Millennium-II 数值模拟, 他们发现子暗晕所包含的暗物质粒子数目需要达到至少 1000 才能保证丰度匹配模型的正确. 因此在应用此方法时, 需要特别注意所选择的子暗晕的质量是否达到这一精度要求. 对

图 3 (网络版彩图) 与图 2 类似, 不同工作给出的红移 1 左右的星系质量 - 暗晕/子暗晕质量关系. 本图引自文献 [54] 中图 12

Figure 3 (Color online) Similar as Figure 2, but for comparison of different model results of galaxy stellar mass-halo/subhalo mass relation at $z = 1.0$. This figure is reproduced from Figure 12 of ref. [54].

图 4 Moster 等人给出的星系质量 - 子暗晕质量关联模型的不同参数组合对红移 0 的星系质量函数以及两点相关函数进行同时拟合的质量. 实线是对星系质量函数拟合得到的 χ^2 分布, 点线是对两点相关函数拟合得到的 χ^2 分布, 虚线是两者之和. 总的拟合质量主要由对质量函数的拟合决定. 本图引自文献 [26] 中图 3

Figure 4 Sketch of the probability distributions for a simultaneous fit of galaxy stellar mass-subhalo mass relation to both galaxy stellar mass function and correlation function, given by Moster et al. 2010. The solid line corresponds to χ^2 of fitting galaxy stellar mass function, and the dotted line to χ^2 of fitting correlation function. The dashed line is the sum of both. The total χ^2 follows χ^2 of fitting stellar mass function. This figure is reproduced from Figure 3 of ref. [26].

于质量较小的暗晕, 以及在模拟中因为精度原因失去跟踪的子暗晕, 需要通过追踪星系所在子暗晕中的粒子来确定星系的位置, 才能够给出对真实情况更好地模拟.

4 总结

本文总结了星系 - 子暗晕统计关联模型的研究历史和现状. 这个方法可以被认为是一种基于物理改进暗晕占据分布的模型, 因为此方法主要是通过统计的方法描述星系性质与所在暗晕性质的关系, 而不像半解析模型和流体动力学数值模拟一样对星系形成的具体物理过程, 如气体冷却、恒星形成、反馈等做出具体的假设或者计算. 但是与经典的 HOD 方法不同, 星系的位置和速度是通过追踪数值模拟中所有暗晕/子暗晕的轨迹和并合历史得到的. 这一点继承了基于数值模拟的半解析模型能够精确给出星系动力学信息的特点, 并且避开了暗晕聚集偏差效应对传统 HOD 方法中关于星系性质只和暗晕质量有关的假设的挑战.

星系 - 子暗晕统计关联模型, 尤其是简化的丰度匹配模型应用广泛. 然而, 丰度匹配模型成立的一个前提假设是只用星系的质量函数就可以很好地限制星系和暗晕的关系. 在这个假设之下, 星系的成团性并不能很好地被恢复, 尤其是在高红移. 此外, 对模型的建立和应用需要特别注意模型对数值模拟精度的依赖, 以及由此导致的对星系和暗晕质量可靠性的限制. 对于精度限制之下的暗晕, 需要考虑 “orphan” 星系, 至少是其中一部分的贡献.

除丰度匹配模型之外, 大部分星系 - 子暗晕关联模型通过同时拟合光度/质量和相关函数确定参数. 文献 [60, 61] 考察了卫星星系性质和子暗晕质量, 结合主暗晕质量的关系, 认为除了质量函数和相关函数之外, 还需要更多的观测来限制此关系, 包括弱引力透镜, 卫星动力学, 以及更精确的对相关函数的测量等. 未来对于星系统计性质更精确的观测能够帮助我们知道目前的模型是否足够有效, 以及是否需要在模型中加入更多的复杂性和依赖参数以更准确地确定星系和暗晕之间的关系.

参考文献

- 1 Hoyle F. Problems of Cosmical Aerodynamics. Dayton: Central Air Documents Office, 1949. 195–197
- 2 White S D M, Rees M J. Core condensation in heavy halos — A two-stage theory for galaxy formation and clustering. *Mont Not R Astron Soc*, 1978, 183: 341–358
- 3 Erickson L K, Gottesman S T, Jr Hunter J H. Mass distribution in spiral galaxies. *Nature*, 1987, 325: 779–782
- 4 Mandelbaum R, Tasitsiomi A, Seljak U, et al. Galaxy-galaxy lensing: Dissipationless simulations versus the halo model. *Mont Not R Astron Soc*, 2005, 362: 1451–1462
- 5 Mandelbaum R, Seljak U, Kauffmann G, et al. Galaxy halo masses and satellite fractions from galaxy-galaxy lensing in the Sloan digital sky survey: Stellar mass, luminosity, morphology and environment dependencies. *Mont Not R Astron Soc*, 2006, 368: 715–731
- 6 Katz N, Weinberg D H, Hernquist L. Cosmological simulations with treeSPH. *Astrophys J Suppl*, 1996, 105: 19–35
- 7 Vogelsberger M, Genel S, Springel V, et al. Introducing the illustris project: Simulating the coevolution of dark and visible matter in the universe. *Mont Not R Astron Soc*, 2014, 444: 1518–1547
- 8 Schaye J, Crain R A, Bower R G, et al. The EAGLE project: Simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *Mont Not R Astron Soc*, 2015, 446: 521–554
- 9 Kauffmann G, Colberg J M, Diaferio A, et al. Clustering of galaxies in a hierarchical universe — I. Methods and results at $z=0$. *Mont Not R Astron Soc*, 1999, 303: 188–206
- 10 Bower R G, Benson A J, Malbon R, et al. Breaking the hierarchy of galaxy formation. *Mont Not R Astron Soc*, 2006, 370: 645–655
- 11 De Lucia G, Blaizot J. The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies. *Mont Not R Astron Soc*, 2007, 375: 2–14
- 12 Jing Y P, Mo H J, Börner G. Spatial correlation function and pairwise velocity dispersion of galaxies: Cold dark matter models versus the Las campanas survey. *Astrophys J*, 1998, 494: 1–12
- 13 Berlind A A, Weinberg D H. The halo occupation distribution: Toward an empirical determination of the relation between galaxies and mass.

- Astrophys J, 2002, 575: 587–616
- 14 Gao L, Springel V, White S D M. The age dependence of halo clustering. *Mont Not R Astron Soc*, 2005, 363: L66–L70
- 15 Zhu G, Zheng Z, Lin W P, et al. The dependence of the occupation of galaxies on the halo formation time. *Astrophys J Lett*, 2006, 639: L5–L8
- 16 Tonnesen S, Cen R. Do not forget the forest for the trees: The stellar-mass halo-mass relation in different environments. *Astrophys J*, 2015, 812: 104
- 17 Springel V, White S D M, Tormen G, et al. Populating a cluster of galaxies — I. Results at $z=0$. *Mont Not R Astron Soc*, 2001, 328: 726–750
- 18 Vale A, Ostriker J P. Linking halo mass to galaxy luminosity. *Mont Not R Astron Soc*, 2004, 353: 189–200
- 19 Wang L, Li C, Kauffmann G, et al. Modelling galaxy clustering in a high-resolution simulation of structure formation. *Mont Not R Astron Soc*, 2006, 371: 537–547
- 20 Vale A, Ostriker J P. The non-parametric model for linking galaxy luminosity with halo/subhalo mass. *Mont Not R Astron Soc*, 2006, 371: 1173–1187
- 21 Conroy C, Wechsler R H, Kravtsov A V. Modeling luminosity-dependent galaxy clustering through cosmic time. *Astrophys J*, 2006, 647: 201–214
- 22 De Lucia G, Kauffmann G, Springel V, et al. Substructures in cold dark matter haloes. *Mont Not R Astron Soc*, 2004, 348: 333–344
- 23 Gao L, De Lucia G, White S D M, et al. Galaxies and subhaloes in Λ CDM galaxy clusters. *Mont Not R Astron Soc*, 2004, 352: L1–L5
- 24 Wang L, Li C, Kauffmann G, et al. Modelling and interpreting the dependence of clustering on the spectral energy distributions of galaxies. *Mont Not R Astron Soc*, 2007, 377: 1419–1430
- 25 Guo Q, White S, Li C, et al. How do galaxies populate dark matter haloes? *Mont Not R Astron Soc*, 2010, 404: 1111–1120
- 26 Moster B P, Somerville R S, Maubetsch C, et al. Constraints on the relationship between stellar mass and halo mass at low and high redshift. *Astrophys J*, 2010, 710: 903–923
- 27 Press W H, Schechter P. Formation of galaxies and clusters of galaxies by self-similar gravitational condensation. *Astrophys J*, 1974, 187: 425–438
- 28 Efstathiou G, Frenk C S, White S D M, et al. Gravitational clustering from scale-free initial conditions. *Mont Not R Astron Soc*, 1988, 235: 715–748
- 29 Somerville R S, Lemson G, Kolatt T S, et al. Evaluating approximations for halo merging histories. *Mont Not R Astron Soc*, 2000, 316: 479–490
- 30 Sheth R K, Mo H J, Tormen G. Ellipsoidal collapse and an improved model for the number and spatial distribution of dark matter haloes. *Mont Not R Astron Soc*, 2001, 323: 1–12
- 31 Jenkins A, Frenk C S, White S D M, et al. The mass function of dark matter haloes. *Mont Not R Astron Soc*, 2001, 321: 372–384
- 32 Warren M S, Abazajian K, Holz D E, et al. Precision determination of the mass function of dark matter halos. *Astrophys J*, 2006, 646: 881–885
- 33 Reed D S, Bower R, Frenk C S, et al. The halo mass function from the dark ages through the present day. *Mont Not R Astron Soc*, 2007, 374: 2–15
- 34 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C. Constraining galaxy formation and cosmology with the conditional luminosity function of galaxies. *Mont Not R Astron Soc*, 2003, 339: 1057–1080
- 35 Eke V R, Frenk C S, Baugh C M, et al. Galaxy groups in the two-degree field galaxy redshift survey: The luminous content of the groups. *Mont Not R Astron Soc*, 2004, 355: 769–784
- 36 Lacey C, Cole S. Merger rates in hierarchical models of galaxy formation — Part II. Comparison with N-body simulations. *Mont Not R Astron Soc*, 1994, 271: 676–692
- 37 Benson A J, Kamionkowski M, Hassani S H. Self-consistent theory of halo mergers. *Mont Not R Astron Soc*, 2005, 357: 847–858
- 38 Davis M, Efstathiou G, Frenk C S, et al. The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *Astrophys J*, 1985, 292: 371–394
- 39 Navarro J F, Frenk C S, White S D M. A universal density profile from hierarchical clustering. *Astrophys J*, 1997, 490: 493–508
- 40 Ghigna S, Moore B, Governato F, et al. Dark matter haloes within clusters. *Mont Not R Astron Soc*, 1998, 300: 146–162
- 41 Moore B, Governato F, Quinn T, et al. Resolving the structure of cold dark matter halos. *Astrophys J Lett*, 1998, 499: L5–L8
- 42 Colín P, Avila-Reese V, Valenzuela O. Substructure and halo density profiles in a warm dark matter cosmology. *Astrophys J*, 2000, 542: 622–630
- 43 Hayashi E, Navarro J F, Taylor J E, et al. The structural evolution of substructure. *Astrophys J*, 2003, 584: 541–558
- 44 Kazantzidis S, Mayer L, Mastropietro C, et al. Density profiles of cold dark matter substructure: Implications for the missing-satellites problem. *Astrophys J*, 2004, 608: 663–679

- 45 Kravtsov A V, Gnedin O Y, Klypin A A. The tumultuous lives of galactic dwarfs and the missing satellites problem. *Astrophys J*, 2004, 609: 482–497
- 46 Springel V, White S D M, Jenkins A, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 2005, 435: 629–636
- 47 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C. The subhalo-satellite connection and the fate of disrupted satellite galaxies. *Astrophys J*, 2009, 693: 830–838
- 48 Watson D F, Conroy C. The strikingly similar relation between satellite and central galaxies and their dark matter halos since $z = 2$. *Astrophys J*, 2013, 772: 139
- 49 Wang L, Jing Y P. Modelling galaxy stellar mass evolution from $z \sim 0.8$ to today. *Mont Not R Astron Soc*, 2010, 402: 1796–1806
- 50 Yang X, Mo H J, Van Den Bosch F C, et al. Evolution of the galaxy-dark matter connection and the assembly of galaxies in dark matter halos. *Astrophys J*, 2012, 752: 41
- 51 Moster B P, Naab T, White S D M. Galactic star formation and accretion histories from matching galaxies to dark matter haloes. *Mont Not R Astron Soc*, 2013, 428: 3121–3138
- 52 Vale A, Ostriker J P. A non-parametric model for linking galaxy luminosity with halo/subhalo mass: Are brightest cluster galaxies special? *Mont Not R Astron Soc*, 2008, 383: 355–368
- 53 Li C, Wang L, Jing Y P. Stellar mass versus stellar velocity dispersion: Which is better for linking galaxies to their dark matter halos? *Astrophys J Lett*, 2013, 762: L7
- 54 Behroozi P S, Conroy C, Wechsler R H. A comprehensive analysis of uncertainties affecting the stellar mass-halo mass relation for $0 < z < 4$. *Astrophys J*, 2010, 717: 379–403
- 55 Behroozi P S, Wechsler R H, Conroy C. The average star formation histories of galaxies in dark matter halos from $z = 0$ –8. *Astrophys J*, 2013, 770: 57–92
- 56 Watson D F, Berlind A A, Zentner A R. Constraining satellite galaxy stellar mass loss and predicting intrahalo light. I. Framework and results at low redshift. *Astrophys J*, 2012, 754: 90
- 57 Conroy C, Wechsler R H. Connecting galaxies, halos, and star formation rates across cosmic time. *Astrophys J*, 2009, 696: 620–635
- 58 Guo H, Zheng Z, Behroozi P S, et al. Modelling galaxy clustering: Halo occupation distribution versus subhalo matching. *Mont Not R Astron Soc*, 2016, 459: 3040–3058
- 59 Guo Q, White S. Numerical resolution limits on subhalo abundance matching. *Mont Not R Astron Soc*, 2014, 437: 3228–3235
- 60 Neistein E, Weinmann S M, Li C, et al. Linking haloes to galaxies: How many halo properties are needed? *Mont Not R Astron Soc*, 2011, 414: 1405–1417
- 61 Neistein E, Li C, Khochfar S, et al. A tale of two populations: The stellar mass of central and satellite galaxies. *Mont Not R Astron Soc*, 2011, 416: 1486–1499

Statistical relation between galaxy and subhalo

WANG Lan*

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

N-body simulations can now be carried out with resolution high enough to track the histories of individual substructures (subhaloes) within the surrounding dark matter haloes. Compared with dark matter haloes, subhaloes are thought to be connected more tightly with galaxies. With the tight connection, models are developed to study the relation between galaxy properties and subhalo properties in a statistical way. This methodology falls midway between the traditional halo occupation distribution (HOD) approach and the galaxy formation semi-analytic approach. The positions and velocities of galaxies within a halo are predicted by following the orbits and merging histories of the substructures in simulations. Rather than using star formation and feedback recipes to specify the physical properties of galaxies such as stellar mass, luminosity, color, etc., parameterized functions are adopted to relate these properties to the properties of their host subhaloes directly. In this review, we summarize the models of linking galaxies with subhaloes, and introduce their advantages. We also point out the limits of this methodology, which need to be treated with caution when using and applying it.

galaxy, dark matter, halo

PACS: 98.62.Ve, 95.35.+d, 98.62.Dm

doi: 10.1360/SSPMA2016-00350