

文章编号: 1000-8349(2010)03-268-11



暗物质晕次结构的演化研究进展

甘建铃^{1,2}, 常瑞香¹, 侯金良¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 星系宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 一般认为暗晕是通过等级成团方式形成的: 小质量暗晕先形成, 进而通过并合形成较大质量的暗晕。并合后的小质量暗晕形成所谓的次结构, 目前关于次结构的演化过程和分布特点尚无明确结论。介绍了利用数值模拟、半解析模型和观测来研究次结构分布和演化的进展, 并特别讨论了次结构的并合时标、质量函数和空间分布等特性。

关键词: 星系演化; 暗物质晕; 次结构; 数值模拟; 半解析模型

中图分类号: P156

文献标识码: A

1 引 言

在冷暗物质 (cold dark matter, CDM) 模型中, 暗物质由于引力不稳定性坍缩成位力化的结构, 形成所谓的暗物质晕 (dark matter halo)。暗晕一般是通过等级成团的方式形成, 即小质量暗晕先坍缩形成, 进而通过并合形成更大尺度的暗晕。并合后的小质量暗晕不会立即消失, 而形成暗晕的次结构 (dark matter halo substructure 或 subhalo)。目前尚不清楚的问题主要是次结构进入主晕 (host halo) 后如何演化。例如, 次结构的运动轨道演化, 质量演化, 并合时标和它们的最终命运, 即和主晕中心并合或被潮汐力瓦解等问题。而次结构的演化过程对重子的冷却^[1,27]、恒星形成演化与反馈^[75]、化学演化^[10]以及星系的形态^[1,63]都有重要的影响。因此有必要对星系次结构的演化进行深入细致的研究。

研究次结构演化最好的办法是对每个被吸积的次结构在动力学上进行全程跟踪模拟, 这可以通过 N 体数值模拟 (N -body simulation) 实现。 N 体数值模拟将主星系晕分解为数以百万甚至数以亿计的粒子单元, 并详细记录每个粒子在每个时刻的速度和位置, 然后在这些粒子分布较密集的地方分辨出次结构, 再测量次结构的速度、位置、质量、密度轮廓

收稿日期: 2010-03-01; **修回日期:** 2010-04-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (10833005); 创新群体项目 (10821302); 973 项目资助 (2007CB815402)

等^[23,68]。N 体数值模拟的优点在于它能详细跟踪每个粒子的演化, 无需引入过多假设。但是缺点在于数值模拟受分辨率的影响, 而高分辨率的数值模拟消耗太多计算时间, 实践上有一定难度。同时从数值模拟中分辨出次结构也面临方法上的一些不确定问题, 目前尚无系统研究。另一种办法是解析模型, 它考虑了影响次结构演化的一些主要物理过程, 如万有引力、动力学磨擦、潮汐质量剥离、潮汐加热等^[71,83,84], 这些过程都有比较好的模型来描述。同时结合暗晕的形成历史或并合树 (merger tree), 解析模型能预言给定形成历史的暗晕内次结构的分布, 包括空间分布和质量分布。

观测方面, 次结构表现为星系团中的一般星系或星系中的矮星系, 统称为伴星系。在银河系和本星系群 (local group) 中都存在伴星系, 如大麦哲伦云、小麦哲伦云 (LMC, SMC) 是银河系的次结构, 人马矮星系 (Sagittarius dwarf)、杜鹃矮星系 (Tucana dwarf) 是本星系群的次结构^[55], 等等。最近几年的 Sloan 巡天观测 (Sloan Digital Sky Survey, SDSS) 发现了更多较暗的伴星系。丰富的伴星系样本为数值模拟和半解析模型研究提供了有力的观测依据, 尽管理论预言的结果与观测仍有较大差异^[45,76], 如何解释观测到的伴星系的性质及它们的统计分布已经成为一个十分活跃的研究领域^[42,51]。

本文安排如下: 第 2 章、第 3 章、第 4 章分别介绍了次结构研究在数值模拟、半解析模型和观测方面的进展; 第 5 章比较分析了不同方法得到的关于次结构性质的结果; 第 6 章作了小结与展望。

2 数值模拟研究进展

暗晕次结构演化的数值模拟研究在过去 10 年取得了很大进展。早期的模拟^[34]受到分辨率的限制, 对潮汐瓦解估计过高, 产生“过度并合 (overmerging)”问题^[39,58], 即小质量暗晕进入主晕后由于数值上的效应很快就不可分辨, 而且在主晕中心存活的次结构也偏少。高精度数值模拟^[19,23,32,66], 特别是最近实现的两组即 ViaLactea^[20]和 Aquarius^[69], 能够分辨到更小质量、小尺度上的次结构。这两组模拟均研究了质量为 $10^{12} M_{\odot}$ 量级的暗晕的形成历史, 因此可以直接跟银河系的观测相比较。ViaLactea 的最小粒子质量是 $4\ 100 M_{\odot}$, 力的软化长度 (force softening length) 是 40 pc; Aquarius 可分辨最小粒子是 $1\ 712 M_{\odot}$, 软化长度为 20.5 pc。不同的模拟得到了一致的次结构质量分布和空间分布。其一是次结构质量函数 (subhalo mass function, SHMF), 它的分布可以用简单的幂律 (power law) 很好地描述, 使用主晕质量归一化后的 SHMF 具有普适形式, 只是其幅度对主晕的质量和形成时间有一定的依赖关系^[23,26,32,78]。其二是次结构的径向分布, 它比背景暗物质的分布平缓^[19,84], 并可以用 Einasto 轮廓来描述^[50,69]。

次结构的其他性质也有相关研究, 但不同模拟得到的结果有一些差异, 例如并合时标。并合时标定义为次结构在主晕中由于角动量丢失而陷入主晕中心所需要的时间, 一般也称为动力磨擦时标^[2](T_{df})。它决定了次结构的存活时长, 对星系的形成和演化是一个重要限制。Boylan-Kolchin 等人^[5](简称 BK08) 和 Jiang 等人^[30](简称 J08) 都对并合时标进行了相关模拟, 并给出了并合时标的拟合式。他们得到的并合时标对次结构的初始质量、能量和角动量的依赖关系略有不同。这可能有多方面的原因, 如 J08 在模拟中考虑了气体冷却和恒星形成,

而 BK08 只考虑了纯暗物质的动力学演化, 但有较高的分辨率。

数值模拟得到的这些物理关系, 即次结构质量函数、空间分布、并合时标等, 为半解析模型提供了重要约束。

3 半解析模型研究进展

从 Taylor 和 Babul 开始^[71], 用半解析模型研究次结构的演化在过去几年得到了很大的发展^[13,72-74,82-84]。模型一般以从并合树得到的暗晕吸积历史为初始条件, 然后追踪每个次结构在主晕中的演化历程, 包括动力学磨擦使次结构轨道衰减, 潮汐力剥离次结构质量, 潮汐力使次结构内部物质重新分布, 以及潮汐瓦解等。

暗晕形成的并合树可以从数值模拟^[67,77] 或从 EPS (Extended Press-Schechter) 理论^[4,64] 得到。基于 EPS 理论, 很多人详细研究了并合树产生的算法^[15-17,60]。Parkinson 等人^[62] 对 Cole 等人的模型作了进一步改进和校正, 并公开了源代码。次结构的密度轮廓 (NFW)^[6,8,9,59,61]、初始能量^[84] 和初始角动量^[30,37] 可以根据数值模拟测量的结果来确定。随后次结构的轨道和质量在与主晕的相互作用中演化, 它们在红移 $z = 0$ 时的质量和空间分布的统计结果可以和数值模拟或观测比较。van den Bosch 等人^[78] 发现 $z = 0$ 时存活的次结构多数是近期形成的, 或者说早期进入主星系晕的次结构多数被并合或瓦解。他们同时也发现, 次结构中的次结构 (subhalo of subhalo) 对次结构的分布整体贡献很小。

在次结构的演化中, 一般模型考虑其受如下几个力的作用: 主晕中心引力、动力学磨擦和潮汐力。动力学磨擦是由于次结构与主晕中的背景粒子相互作用引起的。其理论最早由 Chandrasekhar 提出^[11-13], Binney 和 Tremaine^[2] 对其进行详细描述, 并得到了广泛的应用。潮汐力是次结构中的物质受到各方向上的引力不对称性引起的。潮汐力产生两个结果, 一是剥离次结构外围的物质; 二是使次结构内的物质重新分布^[28,44], 即潮汐加热。数值模拟发现次结构的质量损失主要发生在近心点过程^[14,28,71]。Taylor 和 Babul 构造如下次结构的质量损失率^[71]:

$$\frac{dm}{dt} = -A \frac{m(> r_t)}{2\pi\omega^{-1}}, \quad (1)$$

其中, r_t 为次结构的潮汐半径^[38,79], ω 为次结构的瞬时轨道角速度, A 是由 Zentner 等人^[84] 和 Gan 等人^[21] 引进的用来描述质量剥离的速率, 它的值可以通过次结构的质量函数来限定^[21]。Hayashi 等人^[28] 根据数值模拟的结果拟合出一个潮汐加热的解析式。Kazantzidis 等人^[35] 认为 Hayashi 等人的模拟所采取的初始条件有问题, 他们构造的暗晕不满足动力学平衡, 因此可能导致高估次结构的质量损失和潮汐瓦解。目前关于潮汐加热还没有比较简明合理的描述。

4 暗晕次结构的观测进展

观测发现一般星系及星系团中都存在大量伴星系, 特别是在银河系中发现的伴星系数目在过去 10 年增加了 1 倍。在表 1 中, 我们列出了截止目前已发现的银河系伴星系的名称、银

心距离、日心距离和绝对星等等数据。10 年前, 人们已知的银河系伴星系仅有十几个^[55], 这些伴星系的光度都在 $10^5 L_{\odot}$ 以上, 一般被称为经典矮星系^[45,76](classical dwarfs)。基于大量的恒星测光分析, SDSS 发现了更多更暗的伴星系, 可以分辨低至仅有几百个恒星、 $1\ 000 L_{\odot}$ 的矮星系^[24]。这些新发现的伴星系也称为极暗矮星系^[42,51] (ultra-faint dwarfs), 它们使银河系的次结构样本更加完备。

表 1 已发现的银河系伴星系的名称、银心距离、日心距离和绝对星等^[18,46,52–57,76]

经典矮星系				极暗矮星系			
名称	银心距离 /kpc	日心距离 /kpc	绝对星等 /mag	名称	银心距离 /kpc	日心距离 /kpc	绝对星等 /mag
Carina	102.7	101	-9.4	Boötes I	57.6	60	-6.3
Draco	82.0	79	-9.4	Boötes II	47.6	43	-2.7
Fornax	140.1	138	-13.1	Canes Venatici I	219.8	224	-8.6
LMC	50.2	49	-18.5	Canes Venatici II	150.7	151	-4.9
Leo I	254.0	255	-11.9	Coma Berenices	45.2	44	-4.1
Leo II	207.7	233	-10.1	Hercules	134.2	138	-6.6
SMC	56.9	58	-17.1	Leo IV	160.6	158	-5.0
Sagittarius	16.0	24	-15.0	Leo T	417.0	417	-8.0
Sculptor	79.2	79	-9.8	Segue 1	28.0	23	-1.5
Sextans	89.2	86	-9.5	Ursa Major I	104.9	106	-5.5
Ursa Minor	68.1	66	-8.9	Ursa Major II	36.5	32	-4.2
				Willman 1	43.0	38	-2.7

5 暗晕次结构的性质

在暗晕的演化中, 次结构可能被潮汐力瓦解、受磨擦力作用与主晕中心并合, 也可能在今天 ($z = 0$) 仍然存活。研究次结构时常用的物理关系量有并合时标、质量函数、空间分布等。这三者从不同角度反映了潮汐力和磨擦力的作用强度。

5.1 并合时标

图 1 给出了 Jiang 等人^[30](简称 J08, 点线)、Boylan-Kolchin 等人^[5](简称 BK08, 虚线) 数值模拟的结果和 Taffoni 等人^[70](简称 T03, 点虚线) 半解析模型的结果, 图中的 ε 表示次结构的初始角动量为同能量的圆轨道所具有的角动量的 ε 倍, ε 也称为轨道圆度。J08、BK08 和 T03 的结果都显示了并合时标对次结构初始质量和角动量类似的依赖性, 即并合时标随初始质量的增加而缩短, 随初始角动量的增加而延长。这是因为质量大的次结构承受的磨擦力较大, 而具有较大角动量的次结构经过主晕中心高密度区域的机会少, 承受的磨擦力较小。

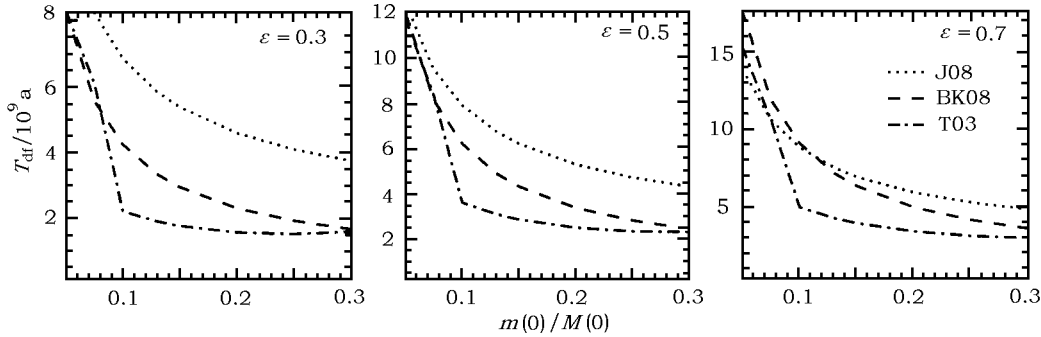


图 1 暗晕次结构的并合时标或动力学磨擦时标对次结构初始质量 (以主晕的初始质量为单位, 即用 $m(0)/M(0)$ 表示) 和角动量 (用 ε 来描述) 的依赖性

点线和虚线分别为 Jiang 等人^[30] 和 Boylan-Kolchin 等人^[5] 数值模拟的结果。点虚线为 Taffoni 等人^[70] 半解析模型的结果。

同时, J08、BK08 和 T03 的结果也存在一些差异。对中等质量 ($m(0)/M(0) \simeq 0.1 \sim 0.2$) 的次结构, J08 和 BK08 的数值模拟得到的时标都比较高, 这可能是因为 T03 的模型里对潮汐质量剥离估计不够。Gan 等人^[21] 发现次结构必须损失足够的质量 ($A = 3.5$), 模型预言的次结构质量函数才能和数值模拟的相符合 (第 5.2 节)。

J08 和 BK08 的结果在 ε 比较大时符合较好, 而在 ε 比较小时 J08 估计较高。这有可能是 J08 考虑了重子冷却过程。重子冷却使次结构变得更加致密^[1,27,80], 在经过主晕中心时次结构能够抵抗较强的潮汐力作用而不被瓦解, 因此次结构存活时间较长。在 BK08 的模拟里, 它们却有较高的分辨率, 在强潮汐力场里能够避免数值效应引起的潮汐瓦解和过度质量丢失, 因而次结构保存了较多的质量, 并合较快。

5.2 质量函数

次结构质量函数表示在不同质量范围内的次结构数目分布。在 CDM 模型中, 理论预言小质量暗晕比大质量的形成概率大^[4,64]。高精度 N 体模拟发现 SHMF 可以用一个简单的幂律来描述, 其指数在 -0.8 到 -1.0 之间, 同时也发现大质量暗晕里的次结构丰度较高^[19,23,25,26,66]。

在图 2 中, 我们给出了数值模拟 (SIM, 黑色线) 和 EPS 理论 (灰色线) 预言的 SHMF, 包括星系团大小 (Cluster, 点线) 和银河系大小的暗晕 (MW, 实线)。数值模拟的结果来自参考文献 [23,25] 等, 幂律的指数为 -0.9 。EPS 理论得到的 SHMF 表示的是并合树中次结构进入主晕时未经磨擦力和潮汐力作用的质量分布, 称为未演化的 SHMF。这个概念最早由 van den Bosch 等人^[78] 及 Giocoli 等人^[25] 提出。可以看出未演化的 SHMF 与主晕质量无关; 对于经过演化的 SHMF 即数值模拟的结果, 图中可见星系团的 SHMF 大约比银河系的高两倍。Giocoli 等人^[25] 提出两方面原因: 一方面, 大质量暗晕坍缩得晚, 其次结构进入主晕也较晚, 因此次结构经历的潮汐质量剥离和磨擦力作用时间较短, 最后存活的次结构质量较大, 数目也较多; 另一方面, 小质量暗晕的中心聚度比较高^[8], 在其内部形成的潮汐力场比较强, 对次结构剥离的质量也比较多。

图 3 中比较了 Gan 等人^[21] 半解析模型和数值模拟^[23,25] 预言的 SHMF。从中可以看出, SHMF 对质量剥离速率 A 有很强的依赖关系。van den Bosch 等人^[78] 发现次结构质量

函数主要是由晚期被吸积的次结构贡献, 因此较大的 A 导致较多的次结构质量被剥离, 得到较低的 SHMF。当 $A = 3.5$ 时, 模型与数值模拟的结果符合得比较好。这说明在暗晕次结构的演化中, 次结构受到了强烈的潮汐力作用, 丢失了相当多的质量。

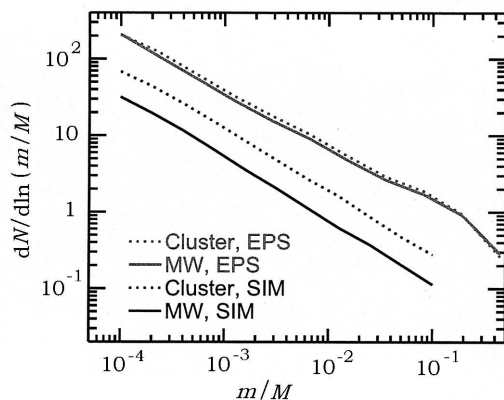


图 2 次结构质量函数 (SHMF)

灰色线表示 EPS 理论预言的即未演化的 SHMF; 黑色线表示数值模拟 (SIM) [23,25] 预言的即演化的 SHMF; 点线和实线分别为星系团大小 (Cluster) 和银河系大小 (MW) 的暗晕中的 SHMF。

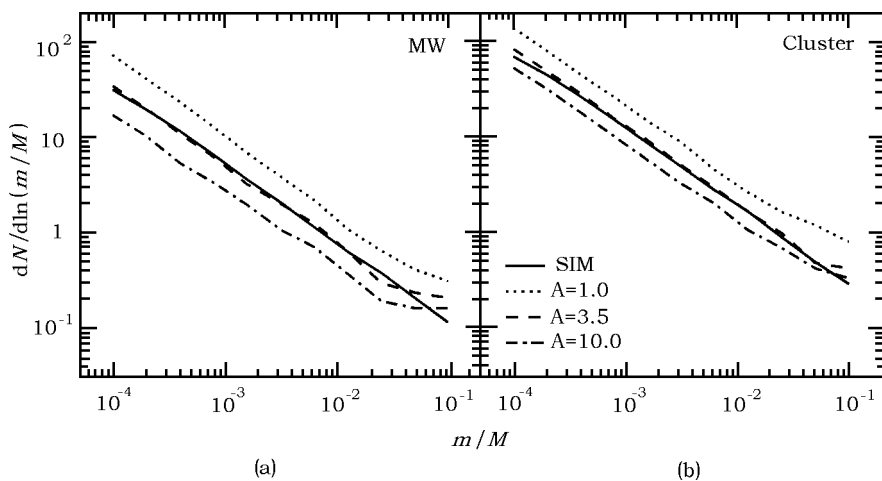


图 3 类似图 2, 比较了半解析模型和数值模拟的结果

(a) 给出银河系大小 (MW) 的暗晕里的次结构质量分布; (b) 给出星系团大小 (Cluster) 的暗晕里的次结构质量分布。实线是数值模拟的结果, 其他曲线为模型中使用不同质量损失率 A 预言的结果 [21]。

5.3 空间分布

图 4 给出了在银河系大小的暗晕里的次结构径向分布, 包括有数值模拟 [69] (实线) 和半解析模型 [21,84] (短虚线) 的结果。长虚线表示背景暗物质粒子的分布, 带方框实线表示银河系伴星系分布 [46,55-57]。另外点线表示的是 Gan 等人 [21] 在模型中假设所有的次结

构均不被潮汐力瓦解，它们的质量可以一直被剥离所得到的次结构空间分布。 N 体模拟发现次结构的分布比背景暗物质低^[22,23]。观测到的伴星系分布比次结构分布致密了许多，这个巨大差异对标准 CDM 理论是个挑战^[23,32,52]。即便是目前分辨率最高的模拟 (Via Lactea 和 Aquarius)，它们得到的次结构空间分布仍然比伴星系分布稀疏。在模型中使用 Zentner 等人^[84]的假设，即认为当次结构质量小于它们初始密度轮廓下半径 r_s^* 以内的质量时，次结构即被潮汐力瓦解，Gan 等人^[21]得到了和数值模拟相近的结果。如果假设次结构不被瓦解，Gan 等人^[21]发现可以在主晕中心区域找到更多的次结构，得到和观测相近的分布 (亦见文献 [81])。这说明在比较靠近主晕中心的地方数值模拟仍然缺乏足够的分辨率，“过度并合”问题仍然存在^[45,52]。当然，这个差异可能是因为观测样本还不够完备，伴星系的分布还不能否定现有的 CDM 模型^[45]。另外，Gao 等人^[23]和 Springel 等人^[69]的研究则认为次结构的分布与模拟精度无关。

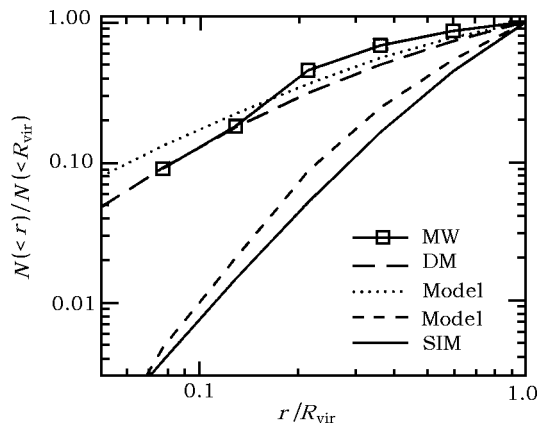


图 4 在银河系大小的暗晕里，次结构在位力半径范围内的径向累积分布

实线为 Springel 等人数值模拟的结果^[69]；短虚线为半解析模型预言的结果；长虚线为背景暗物质粒子的分布；带方框的实线为观测到的银河系伴星系的径向分布；点线为在模型中假设所有的次结构均不被潮汐瓦解，它们的质量可以一直被剥离所得到的次结构空间分布^[21]。

银河系伴星系的分布在观测上还有另一个特点，它们的分布并非各向同性，而是大多数伴星系分布在一个几乎与银盘垂直的平面上，构成一个伴星系盘^[46,56,57](disc of satellites)。Kang 等人^[33]及 Kroupa 等人^[46]发现这种次结构分布无法由标准 CDM 模型产生，他们认为这要么是观测样本还不完备，要么是银河系中的一个特例。最新观测发现，仙女座星系 (Andromeda, M31) 中的伴星系也存在类似分布^[56,57]。这种分布特点给理论工作者带来了更多疑惑和挑战。Libeskind 等人^[48,49]曾尝试解释这一问题，他们认为这可能是星系盘的存在或者三轴系统的主暗晕在动力学上的作用导致的。

5.4 遗失的伴星系问题

从图 2 和图 3 中均可看出，CDM 理论预言的银河系大小的暗晕里存活的次结构至少有数

* r_s 是 NFW 密度轮廓下的标半径。

百个, 而观测发现的银河系伴星系到目前为止仅有数十个 (见表 1)。同样的差异在仙女座星系及本星系群中也存在。这便是所谓的次结构问题 (substructure problem) 或遗失的伴星系问题 (missing satellites problem) [44,45]。这个问题最早由 Klypin 等人 [40] 提出, 并受到广泛研究 [7,44,65]。人们普遍认为, 早期再电离背景下的强紫外光子抑制了气体冷却和恒星形成, 因此相应的次结构里并没有形成可观测的矮星系 [42,45]。极暗矮星系的陆续发现意味着这些遗失的伴星系确实存在于银河系及本星系群中。

图 5 给出了截止目前已发现的银河系伴星系的日心距离和绝对星等的关系图。图中实线表明了目前 SDSS 的观测极限 [76], 更远更暗的区域里尚为空白。人们似乎仅在大约 30 ~ 50 kpc 的空间内得到比较完备的矮星系样本 [41,76]。考虑到观测的选择效应, Tollerud 等人 [76] 预言, 在银河系中 400 kpc 范围内应该至少有上百个伴星系, 这有赖于将来在更深更广天区里的探测。

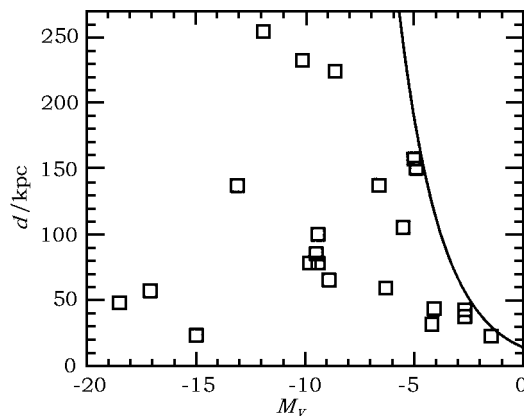


图 5 银河系伴星系的日心距离与绝对星等关系图

实线表示了由 Tollerud 等人 [76] 拟合的目前 SDSS 的观测极限。

6 结 语

星系暗物质晕次结构的演化研究有很大进展。高分辨率数值模拟在这方面获得了巨大成功, 它给出了一些很好的定标关系, 如星系并合时标、暗晕质量函数和空间分布等, 严格限制了星系的形成和演化。半解析模型解决了次结构演化的物理过程, 指明了数值模拟中应该考虑的物理机制。观测发现的大量伴星系样本为理论工作提供了重要参考。

次结构的演化研究仍然是一个热门课题。数值模拟在很小的质量和很小的尺度上仍然缺乏足够的分辨率, 或者说质量和力的分辨率仍然不足, 过度并合问题在很小范围内仍然存在。半解析模型无法考虑复杂的物理机制, 例如次结构内的恒星演化、化学演化及次结构间的相互作用等, 它需要根据数值模拟和观测的结果来作出合理的假设。观测发现的伴星系仍少于理论预言。人们期望在下一代巡天观测中发现更多的伴星系, 例如 LSST [29] (Large Synoptic Survey Telescope), Pan-STARRS [31] 和 SkyMapper [36] 等。

致 谢

该文的完成得到了紫金山天文台研究员康熙的悉心指导，在此表示衷心的感谢！

参考文献:

- [1] Abadi M G, Navarro J F, Fardal M, et al. MNRAS, 2010, 341: 847
- [2] Binney J, Tremaine S. Galactic dynamics Princeton: Princeton University Press, 1987: 747
- [3] Benson A J, Lacey C G, Baugh C M, et al. MNRAS, 2002, 333: 156
- [4] Bond J R, Cole S, Efstathiou G, et al. ApJ, 1991, 379: 440
- [5] Boylan-Kolchin M, Ma C-P, Quataert, E. MNRAS, 2008, 383: 93 (BK08)
- [6] Bryan G L, Norman M L. ApJ, 1998, 495: 80
- [7] Bullock J S, Kravtsov A V, Weinberg D H. ApJ, 2000, 539: 517
- [8] Bullock J S, Kolatt T S, Sigad Y, et al. MNRAS, 2001, 321: 559
- [9] Bullock J S, Johnston K V. ApJ, 2005, 635: 931
- [10] Calura F, Menci N. MNRAS, 2009, 400: 1347
- [11] Chandrasekhar S. ApJ, 1943, 97: 255
- [12] Chandrasekhar S. ApJ, 1943, 97: 263
- [13] Chandrasekhar S. ApJ, 1943, 98: 54
- [14] Choi J-H, Weinberg M D, Katz N. MNRAS, 2009, 400: 1247
- [15] Cole S, Aragon-Salamanca A, Frenk C S, et al. MNRAS, 1994, 271: 781
- [16] Cole S, Lacey C. MNRAS, 1996, 281: 716
- [17] Cole S, Lacey C G, Baugh C M, Frenk C S. MNRAS, 2000, 319: 168
- [18] de Jong J T A, Harris J, Coleman M G, et al. ApJ, 2008, 680: 1112
- [19] Diemand J, Moore B, Stadel J. MNRAS, 2004, 352: 535
- [20] Diemand J, Kuhlen M, Madau P. ApJ, 2007, 667: 859
- [21] Gan J L, et al. submitted to MNRAS, 2010
- [22] Gao L, De Lucia G, White S D M, et al. MNRAS, 2004, 352: L1
- [23] Gao L, White S D M, Jenkins A, et al. MNRAS, 2004, 355: 819
- [24] Geha M, Willman B, Simon J D, et al. ApJ, 2009, 692: 1464
- [25] Giocoli C, Tormen G, van den Bosch F C. MNRAS, 2008, 386: 2135
- [26] Giocoli C, Tormen G, Sheth R K, et al. MNRAS, 2010, 404: 502
- [27] Gnedin O Y, Kravtsov A V, Klypin A A, Nagai D. ApJ, 2004, 616: 16
- [28] Hayashi E, Navarro J F, Taylor J E, et al. ApJ, 2003, 584: 541
- [29] Ivezić Z, Tyson J A, Allsman R, et al. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008arXiv0805.2366I>, 2009
- [30] Jiang C Y, Jing Y P, Faltenbacher A, et al. ApJ, 2008, 675: 1095 (J08)
- [31] Kaiser N, et al. Proc. SPIE, 2002, 4836: 154
- [32] Kang X, Jing Y P, Mo H J, Börner G. ApJ, 2005, 631: 21
- [33] Kang X, Mao S, Gao L, Jing Y P. A&A, 2005, 437: 383
- [34] Katz N, White S D M. ApJ, 1993, 412: 455
- [35] Kazantzidis S, Magorrian J, Moore B. ApJ, 2004, 601: 37
- [36] Keller S C, et al. PASA, 2007, 24: 1
- [37] Khochfar S, Burkert A. A&A, 2006, 445: 403
- [38] King I. A.J, 1962, 67: 471
- [39] Klypin A, Gottlöber S, Kravtsov A V, et al. ApJ, 1999, 516: 530
- [40] Klypin A, Kravtsov A V, Valenzuela O, Prada F. ApJ, 1999, 522: 82

- [41] Kopusov S, et al. *ApJ*, 2008, 686: 279
- [42] Kopusov S E, Yoo J, Rix H-W, et al. *ApJ*, 2009, 696: 2179
- [43] Kravtsov A V, Berlind A A, Wechsler R H, et al. *ApJ*, 2004, 609: 35
- [44] Kravtsov A V, Gnedin O Y, Klypin A A. *ApJ*, 2004, 609: 482
- [45] Kravtsov A. *Advances in Astronomy*, 2010: 1
- [46] Kroupa P, Theis C, Boily C M. *A&A*, 2005, 431: 517
- [47] Lacey C, Cole S. *MNRAS*, 1993, 262: 627
- [48] Libeskind N I, Frenk C S, Cole S, et al. *MNRAS*, 2005, 363: 146
- [49] Libeskind N I, Frenk C S, Cole S, et al. *MNRAS*, 2009, 399: 550
- [50] Ludlow A D, Navarro J F, Springel V, et al. *ApJ*, 2009, 692: 931
- [51] Macciò A V, Kang X, Fontanot F, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 1995
- [52] Madau P, Diemand J, Kuhlen M. *ApJ*, 2008, 679: 1260
- [53] Martin N F, Ibata R A, Chapman S C, et al. *MNRAS*, 2007, 380: 281
- [54] Martin N F, de Jong J T A, Rix H-W. *ApJ*, 2008, 684: 1075
- [55] Mateo M L. *ARA&A*, 1998, 36: 435
- [56] Metz M, Kroupa P, Jerjen H. *MNRAS*, 2007, 374: 1125
- [57] Metz M, Kroupa P, Jerjen H. *MNRAS*, 2009, 394: 2223
- [58] Moore B, Ghigna S, Governato F, et al. *ApJ*, 1999, 524: L19
- [59] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. *ApJ*, 1997, 490: 493
- [60] Neistein E, Dekel A. *MNRAS*, 2008, 383: 615
- [61] Neto A F, Gao L, Bett P, et al. *MNRAS*, 2007, 381: 1450
- [62] Parkinson H, Cole S, Helly J. *MNRAS*, 2008, 383: 557
- [63] Pedrosa S, Tissera P B, Scannapieco C. *MNRAS*, 2009, 375: 1877
- [64] Press W H, Schechter P. *ApJ*, 1974, 187: 425
- [65] Somerville R S. *ApJ*, 2002, 572: L23
- [66] Springel V, White S D M, Tormen G, Kauffmann G. *MNRAS*, 2001, 328: 726
- [67] Springel V, et al. *Nature*, 2005, 435: 629
- [68] Springel V. *MNRAS*, 2005, 364: 1105
- [69] Springel V, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1685
- [70] Taffoni G, Mayer L, Colpi M, Governato F. *MNRAS*, 2003, 341: 434 (T03)
- [71] Taylor J E, Babul A. *ApJ*, 2001, 559: 716
- [72] Taylor J E, Babul A. *MNRAS*, 2004, 348: 811
- [73] Taylor J E, Babul A. *MNRAS*, 2005, 364: 515
- [74] Taylor J E, Babul A. *MNRAS*, 2005, 364: 535
- [75] Tissera P B, White S D M, Pedrosa S, et al. *MNRAS*, 2010, 380: 786
- [76] Tollerud E J, Bullock J S, Strigari L E, et al. *ApJ*, 2008, 688: 277
- [77] Tweed D, Devriendt J, Blaizot J, et al. *A&A*, 2009, 506: 647
- [78] van den Bosch F C, Tormen G, Giocoli C. *MNRAS*, 2005, 359: 1029
- [79] von Hoerner S. *ApJ*, 1957, 125: 451
- [80] Weinberg D H, Colombi S, Davé R, et al. *ApJ*, 2008, 678: 6
- [81] Wetzel A R, White M. *MNRAS*, 2010, 403: 1072
- [82] Yoo J, Miralda-Escudé J, Weinberg D H, et al. *ApJ*, 2007, 667: 813
- [83] Zentner A R, Bullock J S. *ApJ*, 2003, 598: 49
- [84] Zentner A R, Berlind A A, Bullock J S, et al. *ApJ*, 2005, 624: 505

Progress on the Evolution of the Dark Matter Halo Substructure

GAN Jian-Ling^{1,2}, CHANG Rui-Xiang¹, HOU Jin-Liang¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the cold dark matter (CDM) model, haloes form via hierarchical merger, i.e., small haloes form first and subsequently merge to form bigger ones. The smaller halo in a merger event becomes the subhalo (substructure) of the bigger one, which is called as the host halo. It's still unclear how the subhaloes evolve and distribute in the host halo. In this paper, we review the progress of the studies on the evolution of dark matter subhalo using simulation, semi-analytical model (SAM) and observations.

The best way to study the subhalo evolution is N -body simulation, which focus on the fully dynamical tracing of the subhalo trajectory and mass profile. It has been shown that there are several good scaling relations to describe the subhalo properties, such as the mass function, merging time scale and spatial distribution. It's important to understand the origin of these relations.

In the past decade, semi-analytical models (SAMs) have been developed to study the evolution of subhalo. The SAMs consider a few important physical processes like tidal stripping, dynamical friction and tidal heating, and combines these mechanism with the merger trees, which describe the accretion history of dark matter haloes. The SAMs can reproduce the same subhalo properties as that obtained by simulation, and perform efficiently in computation. In fact, simulation results provide strong constraints to the parameters in the SAM, while the SAM interprets the physical mechanism of the subhalo evolution.

Observationally, the number of satellites found in the Milky-Way (MW) has been doubled in the past decade. By assuming the relics of merging haloes can be regarded as dwarf galaxies in the normal galaxies or galaxies in the clusters and the subhalo can be treated as the satellite, we can directly compare model predictions with observations. There are discrepancies between observation and theoretical predictions. The probable reason may come from the resolution effect in the simulation or the selection effect in the observation. Further progress on the study of subhalo evolution is greatly expected to be made in the future.

Key words: galaxy evolution; dark matter halo; substructure; simulation; semi-analytical model