

文章编号: 1000-8349(2011)01-0001-18

银河系卫星星系研究进展

康 熙

(中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008)

摘要: 对银河系内卫星星系进行全面的“人口普查”具有重要的意义。目前已经发现了二十几个卫星星系, 其光度范围分布很广, 最暗的矮星系比球状星体还暗。叙述了卫星星系的光度分布、空间分布和动力学性质。总结了观测和理论研究进展, 并讨论了星流和伽玛射线在研究银河系结构和暗物质性质方面的贡献。表明了卫星星系的统计分布能用来很好地限制冷暗物质理论和星系形成的相关物理过程, 同时指出当前研究的局限性和可能的发展方向。

关 键 词: 银河系; 卫星星系; 数值模拟; 星系形成; 冷暗物质

中图分类号: P156

文献标识码: A

1 引 言

自从人类开始关注头顶上的天体, 银河系就是天文研究的重点。这不仅仅是因为人们对人类自己所在的家园感兴趣, 还因为银河系内的天体离我们近, 可以进行高精度的观测。现代研究发现银河系虽然只是宇宙中千万个星系中普通一员, 但详细研究银河系内的物质分布, 不仅能告诉人们银河系的形成历史, 而且还能用来检验星系形成模型、宇宙学模型和暗物质性质。

银河系内天体的研究涉及天文学的各个领域。与星系相关的传统研究内容为: (1) 恒星在星系盘, 核球内的位置、速度、金属丰度分布; (2) 恒星的初始质量函数; (3) 气体的恒星形成率、旋转曲线。随着冷暗物质 (CDM) 理论^[1, 2]成为标准的宇宙结构形成模型, 银河系的研究扩展到: (1) 银河系暗晕的几何结构 (椭率); (2) 第一代、二代恒星在暗晕内的分布; (3) 银河系内卫星星系的计数、空间分布、恒星形成历史、金属丰度分布等。对银河系内卫星星系的全面普查, 将有力地限制星系形成模型、暗物质质量和 CDM 理论。

银河系卫星星系 (文中有时也用暗星系, 极暗星系代替) 指的是在银河系内的一些自束缚星系。到目前为止已经探测到二十几个。一些经典的卫星星系, 如大麦哲伦星云 (Large Magellanic Cloud), 小麦哲伦星云 (Small Magellanic Cloud) 很早就有历史记载。在 2004

收稿日期: 2010-10-19; 修回日期: 2010-12-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目 (11073055); 中科院优秀博士学位论文获得者科研专项资助; 中科院百人计划

年前探测到的卫星星系有 10 余个, 最近几年来又发现了 10 多个。其中绝大部分由斯隆数字巡天 (Sloan Digital Sky Survey, 简称 SDSS) 发现^[3-8]。观测表明, 这些暗星系的光度为 $10^3 \sim 10^{10} L_{\odot}$, 光度半径约为 100 pc 到几 kpc。卫星星系与球状星团的明显区别是它们的光度半径远远大于同光度的球状星团 (其半径 < 10 pc)。同时, 这些暗星系的金属丰度非常低^[9], 恒星形成历史复杂。通过对 SDSS 探测的完备性分析^[10, 11], 人们预测在银河系内的极暗矮星系应该有上百个。由于目前观测的体积和面亮度不够, 下一代的巡天观测, 如 Skymapper^[12], 暗能量巡天^[13] (Dark Energy Survey), Pan-STARRS^[14], 大口径综合巡天望远镜^[15] (Large Synoptic Survey Telescope, 简称 LSST), 有望对银河系进行更全面的“人口普查”。这些巡天无疑将极大推动银河系相关问题的研究。

卫星星系的统计性质可以用来检验星系形成模型和 CDM 理论。在过去的几十年内, CDM 理论经历了快速发展, 到今天它已经成为标准的宇宙结构形成模型, 能够解释宇宙在不同尺度上的结构形成特征^[16]。在这种理论下, 宇宙中的结构来源于宇宙早期的量子扰动, 其扰动幅度被暗物质的引力逐渐放大。由于暗物质是“冷”的, 因此小尺度的暗晕先形成, 并逐渐并合形成较大质量的暗晕。利用数值模拟, 人们能够详细地研究结构形成过程。研究发现, 这些早期被并合的暗晕在大质量暗晕内还以子结构等形式存在^[17, 18]。

数值模拟的名声很大程度上来源于它对银河系形成的研究。早期的研究^[19, 20]发现 CDM 预言的暗晕子结构比观测到的卫星星系多了约 10 倍。这一度成为著名的“失踪的卫星星系”问题 (missing satellite problem)。近年来, 随着观测资料的丰富和数值模拟精度的提高, 对银河系卫星星系的研究在更广、更细致的层面展开。大量研究逐渐表明: 卫星星系的性质总体上与 CDM 理论预言相一致, 尽管在细节上还有一些问题, 但很难从根本上否定 CDM。

本文将讨论与银河系结构, 特别是卫星星系分布、恒星流、伽玛射线等相关的研究。并讨论怎样利用这些观测来限制 CDM 模型和星系形成过程。

2 研究进展

本章主要给出卫星星系统计性质的研究: 计数、空间分布等。2.1 节给出观测到的光度函数和理论研究进展; 2.2 节讨论卫星星系的动力学性质; 2.3 节讨论其空间分布。关于光度函数这部分内容, 建议读者阅读最近的相关回顾性文章^[21, 22]。

2.1 光度函数

探测卫星星系并不容易, 每发现一个都是一件值得兴奋的事。在 SDSS 被大规模用于银河系内研究以前, 大部分卫星星系都是通过对照相底片进行肉眼扫描发现的。Sextans 是对底片自动扫描发现的, Sagittarius 是在测量银河系核球速度弥散时发现的。这些方法依赖于底片的表面亮度, 其观测极限一般为 $25.5 \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ 。受限于表面亮度的同时, 这些方法饱受诟病的另一个原因是很难分析它们的选择效应。SDSS 大大改善了这种状况, 由于它能探测到更低的面亮度和其产生的海量数据, 传统的方法不再适用。不少工作都是利用 SDSS 的恒星分布, 从其中测量比背景密度高的区域, 通过分析候选者在颜色-星等空间的分布来确

定卫星星系的。表 1 列出到目前为止发现的大部分卫星星系。(数据来源: 大部分数据可参考文献^[23], 其他参考 Gan 博士论文^[24])。这里给出卫星星系的银心距离、光度直径和绝对星等。

表 1 到目前为止发现的银河系卫星星系

经典卫星星系				暗卫星星系			
名称	银心距 /kpc	直径 /kpc	绝对星等 /mag	名称	银心距 /kpc	直径 /kpc	绝对星等 /mag
Carina	102.7	0.5	-9.4	Boötes I	57.6	0.3	-6.3
Draco	82.0	0.7	-9.4	Boötes II	47.6	0.1	-2.7
Fornax	140.1	0.6	-13.1	Canes Venatici I	219.8	2	-8.6
LMC	50.2	4	-18.5	Canes Venatici II	45.2	0.3	-4.9
Leo I	254	0.5	-11.9	Coma Berenices	45.2	0.14	-4.1
Leo II	207.7	0.7	-10.1	Hercules	134.2	0.7	-6.6
SMC	56.9	2	-17.1	Leo IV	160.6	0.3	-5.0
Sagittarius	16.0	2	-15.0	Segue 1	28	0.03	-1.5
Sculptor	79.2	0.8	-9.8	Ursa Major I	104.9	—	-5.5
Sextans	89.2	0.5	-9.5	Ursa Major II	36.5	0.2	-4.2
Ursa Minor	68.1	0.4	-8.9	Willman 1	43	—	-2.7

观测到的这些卫星星系实际上包括了选择效应: 一些距离远的, 表面亮度低的卫星星系并没有被探测到。目前一致的看法是较亮 ($M_V \leq -9$ mag) 的卫星星系在约 300 kpc 内基本上是完备的; 较暗的卫星星系在 50 kpc 内是完备的。Tollerud 等人^[11]详细分析了这些选择效应和完备性。他们指出, 考虑到 SDSS 的天区覆盖范围和光度的完备性, 对于 $M_V \simeq -4$ mag 的暗星系, 其在银河系内的数目大约为已观测到的 4 倍。他们预测在银河系内应该有约 500 个更暗的星系。图 1 给出了不同巡天能达到的完备性半径随暗星系亮度的分布。可以看到, LSST 将大大提升我们的观测能力, 在 200 kpc 内将会探测到约 $100L_\odot$ (相当于疏散星团) 亮度的卫星星系。

要与理论模型进行比较, 必须构建一个在某个体积内完备的样本。Koposov 等人^[10]2008 年系统地考虑了 SDSS 的观测极限和选择效应, 给出了银河系内 (280 kpc) 卫星星系的光度函数。他们发现, 卫星星系的光度函数可以用一个单一的幂律分布来描述为 $dN/dM_V = 10 \times 10^{0.1(M_V+5)}$, 这里 M_V 是 V 波段的绝对星等。他们同时指出, 在低亮度端的幂律值依赖于假设的卫星星系空间分布形式。

卫星星系的光度函数可以用来限制星系形成模型和 CDM 理论。上世纪末, 人们利用较高分辨率的数值模拟, 研究质量为 $10^{12}M_\odot$ 的暗晕形成过程。Moore 等人^[20]于 1999 年发现, 在红移为 0 的暗晕内存在大量的暗物质子结构, 如图 2 所示。他们发现, 在给定的旋转速度处, CDM 理论预言的子结构数量比观测到的卫星星系数量高很多: 旋转速度比 Fornax 大的卫星星系只观测到 4 个, 而理论预言应该有约 80 个, 远远超出了观测到的数量。这个后来被广泛引用的结果显示在图 3 中。后来的更高分辨率的数值模拟^[17, 18, 26]都证实了 Moore 等人的结果, 发现子结构的质量函数是一个幂律分布, 其数目随着质量的减少而增加。同时, 如

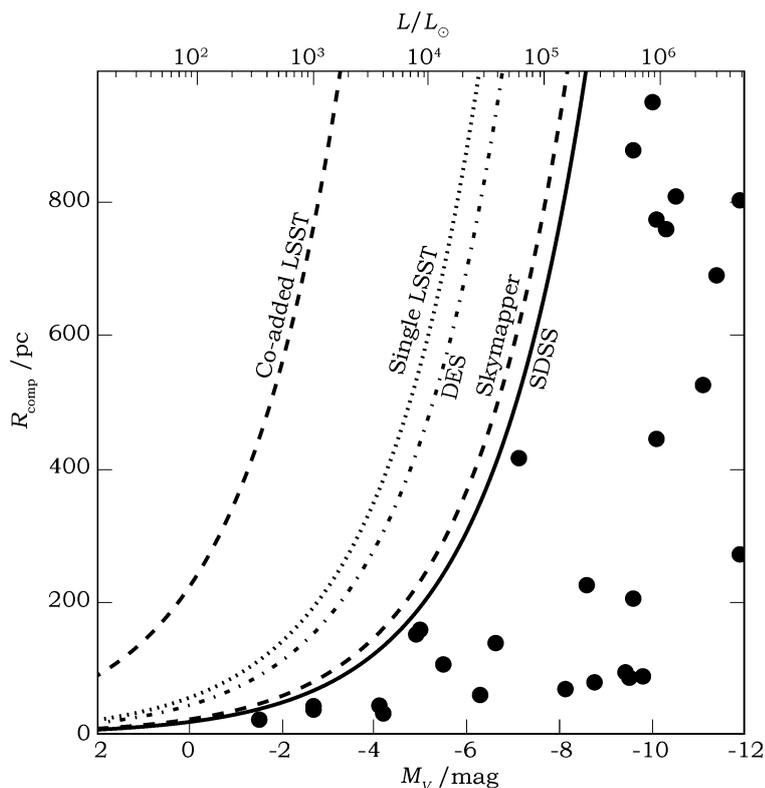


图 1 观测到的最大半径对光度的依赖关系

图中点是已经观测到的卫星星系，不同的线给出不同巡天在不同视星等极限下能观测到的最远距离。

果子结构的质量用寄主暗晕的质量归一化后，不同质量主暗晕内子结构的质量函数有一致的形式，只是幅度与主暗晕的质量有一定的依赖^[25-27]。

在 Moore 等人得到“失踪的卫星星系”的结论时，他们利用了观测到的卫星星系内恒星的速度弥散，并将其转化为其所在子结构的最大旋转速度。他们假设最大旋转速度与恒星速度弥散的关系为 $V_{\max} = \sqrt{3}\sigma_r$ 。这一关系有很大的不确定性，正如其他人^[28, 29]指出的那样，这个转换关系依赖于暗物质在子结构内部的密度分布。如果暗物质的密度分布在内部比较平，则这个关系应该为： $V_{\max} = (2 \sim 4)\sigma_r$ 。这样，卫星星系失踪问题则没那么严重。实际上，利用更高精度数值模拟的研究发现^[30]卫星星系内部的暗物质密度很陡，银河系卫星星系问题还是存在。

另外一些工作则考虑改变 CDM 模型，来减少子结构的数目。Zentner 等人^[31]通过改变 CDM 原初扰动谱在小尺度上的幅度，其他人^[32-34]则引进“温暗物质”模型，即假设暗物质的温度较高，速度弥散大。这导致高红移形成的暗晕数目减少，从而减少了被银河系吸积的子结构数量。同时，“温暗物质”模型下暗晕内部密度稍低，使得子结构更容易被潮汐力撕碎，从而也有助于减少子结构的数量。然而，“温暗物质”模型在大尺度上有很严重的问题^[35-37]，这个解决方案有不少争议。



图 2 银河系内暗物质的投影分布

该图来自 Diemand 等人^[17]的“Via Lactea”模拟: 银河系大小的暗晕内包括 2.34 亿个粒子, 每个粒子的质量为 $2.1 \times 10^4 M_{\odot}$ 。这是目前世界上最高精度的模拟之一。

更多的作者极力维护 CDM 理论, 他们认为是星系形成相关的物理过程导致只有部分暗晕子结构内能形成恒星。目前普遍认同的一个观点是: 宇宙再电离后, 强的紫外背景光子加热了宇宙中的气体, 导致其不能塌缩到小质量暗晕内^[38, 39]。只有那些在宇宙电离以前质量足够大的暗晕内才能形成恒星。最近几十年内, 星系形成的半解析模型已经发展成为研究与星系相关物理过程的强有力工具^[27, 40-43], 这些模型能很好地再现星系的光度函数及其演化、两点相关函数、光度—金属丰度关系等。因此, 半解析模型也很自然地用来研究单个星系的形成。不过在研究低亮度星系时, 必须考虑宇宙再电离的影响, 因为再电离主要对小质量的暗晕有较大影响。Gnedin^[44]发现, 宇宙的再电离将减少暗晕内的气体含量, 可以表示为:

$$f_b(z, M_{\text{vir}}) = \frac{f_b}{1 + 0.26 M_F(z) / M_{\text{vir}}}, \quad (1)$$

这里 f_b 是宇宙中重子的平均比例。 $M_F(z)$ 是特征暗晕的质量, 其对宇宙红移有很强的演化。对于质量小于 $M_F(z)$ 的暗晕, 其气体含量将大大降低, 导致产生的恒星也减少。研究

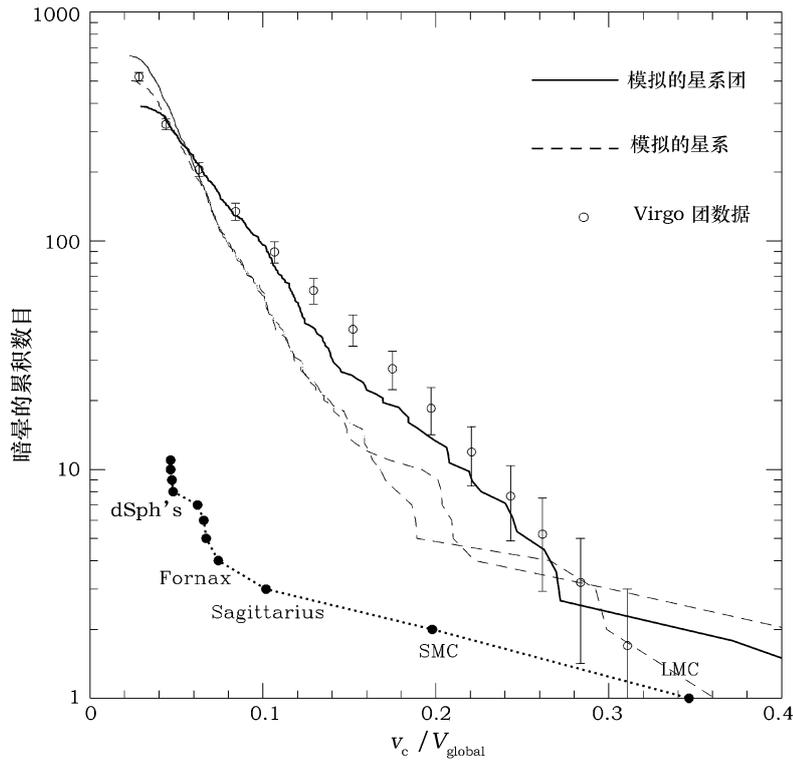


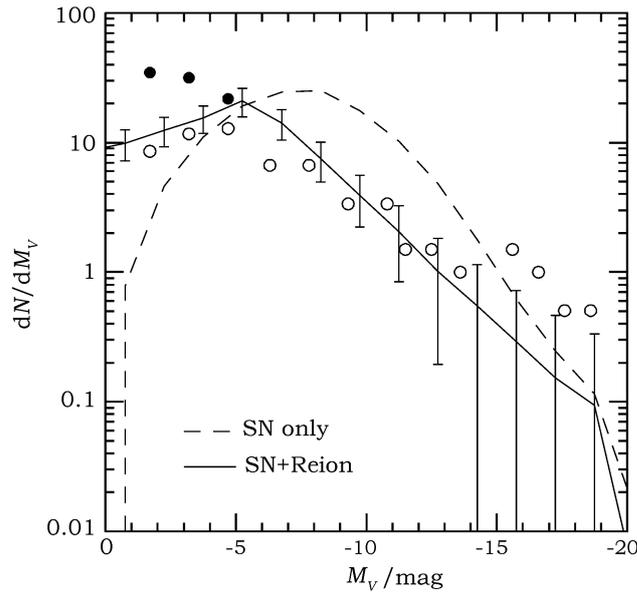
图 3 卫星星系子结构的累积数目随旋转速度的分布

点线为银河系大小的暗晕内子结构的最大旋转速度分布函数，黑色实心圆点为观测到的银河系内卫星星系分布，该图来自 Moore^[20]。

发现^[38, 45-49]，如果只考虑超新星爆发的能量反馈，半解析模型给出的光度函数在中等亮度 ($M_V = -10$ mag) 处卫星星系数目太高。只有同时考虑到超新星能量反馈和宇宙电离的影响时，模型才能给出与观测较接近的分布。图 4 给出了 Kang 的模型结果^[49]。他们还指出，以前模型^[45, 46]预言的光度函数斜率太陡，主要是模型中关于星系并合的时标估计太短，导致较亮的卫星星系与中央星系并合太快。数值模拟^[50, 51]给出的并合时标较解析模型预言的要长约 1 倍，能较好地描述大质量卫星星系的并合率。尽管半解析模型预言的光度函数跟观测符合得较好，但其预言的卫星星系中心表面亮度太高，这可能跟模型假设的盘星系形成模型有关^[10, 42]。

2.2 卫星星系的动力学性质

对卫星星系候选者的进一步认证需要知道其动力学性质。通过测量其中气体或恒星的动力学性质，我们可以回答卫星星系候选者的本质问题：它们是一个自束缚的结构，或仅仅是一个投影效应？如果是一个自束缚结构，它们是暗晕塌缩形成的，还是其他卫星星系被潮汐力打散的结构？这些问题可以通过观测卫星星系的动力学性质来回答。同时，结合动力学和化学成分分析，还可以得到卫星星系内不同起源的恒星和气体的分布特征。

图 4 银河系内卫星星系的光度函数^[49]

数据点为观测数据^[10], 线为理论模型预言, 虚线: 只考虑超新星的能量反馈, 实线: 同时考虑超新星反馈和宇宙电离的影响。

对于距离较近的卫星星系, 可以通过分析其旋转速度得到动力学质量。较早的测量 LMC 动力学结构是用中性氢的 21 cm 辐射, Rohlfs 等人^[52]利用 HI 的旋转曲线, 发现 LMC 大致呈盘状分布。van der Marel 等人^[53]利用 1041 个 Carbon star 得到了 LMC 在 9 kpc 处的旋转速度为 (64.8 ± 15.9) km/s, 由此得到 LMC 的动力学质量为 $(8.7 \pm 4.3) \times 10^9 M_{\odot}$ 。LMC 中的恒星和气体总质量约 $3 \times 10^9 M_{\odot}$, 这表明 LMC 是暗物质占主导的。

对于较暗的卫星星系, 由于其气体含量很低, 一般是通过测量其恒星的速度弥散来估计动力学质量。先测量较亮的红巨星的光谱, 再利用多普勒红移得到视线方向的速度。早期的观测主要集中在那些传统的卫星星系, 如 Carina^[54, 55]、Draco^[56, 57]、Fornax^[58, 59]、Leo I^[60, 61]、Leo II^[62, 63]、Sculptor^[64]、Sextans^[65, 66]。Walker 等人^[67]利用 Magellan 6.5m 望远镜对这些经典的卫星星系进行了更多观测, 并结合前人的数据, 重新计算了这些卫星星系的速度弥散。他们发现这些暗星系在其观测光度半径内的速度弥散约 10 km/s, 且随半径无明显变化。这些暗星系的动力学质量可以从金斯方程估计出, 其位力质量在 $10^8 M_{\odot}$ 到 $10^9 M_{\odot}$ 之间, 且在 600 pc 内这些暗星系的质量差别不大, 在 $(2 \sim 7) \times 10^7 M_{\odot}$ 。这表明这些卫星星系都是暗物质主导的。Strigari 等人^[68]测量了 18 个更暗星系内的恒星速度弥散, 他们发现在 300 pc 内, 这些暗星系的质量也接近一个常数, 为 $10^7 M_{\odot}$ 。这就是最近比较热门的 $M_{300} - L$ 关系, 如图 5 所示。这个与暗星系光度无关的质量引起了大家的极大兴趣, 即为什么 M_{300} 是一个常数, 它是否反映了星系形成的一个特征质量尺度? 或者这是否意味着暗物质成团的最小尺度?

利用 10 m 凯克望远镜的深度成图多目标光谱仪, Simon 和 Geha^[69]进一步测量了一些更

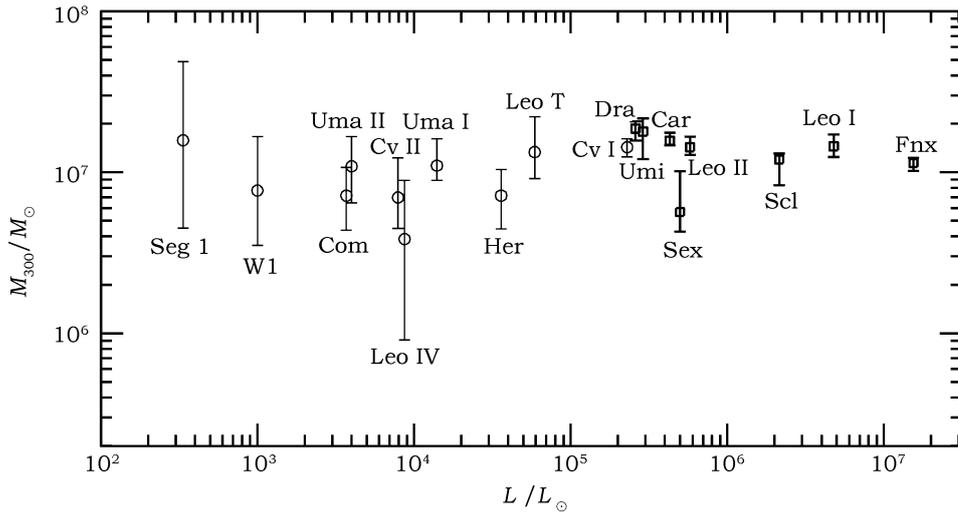


图 5 $M_{300} - L$ 关系

M_{300} 是暗星系在 300 pc 内的总质量, L 为其总光度。 M_{300} 一般是通过模拟恒星的速度弥散来得到的, 数据来自 Strigari^[68]。可以看到质量对光度的依赖性很小。

暗的卫星星系 ($M_V = -3.8 \sim -7.9$ mag) 中约 500 个恒星的光谱, 得到了这些暗星系的速度弥散。他们发现暗星系的速度弥散分布在 3.3 km/s 到 7.6 km/s 之间, 且与光度有很好的相关性, 即越亮的星系其速度弥散也越大。这些暗星系的质光比分布在 200 ~ 1000, 且与光度有很强的反相关, 这证实了以前的结果^[54]。他们还发现, 从数值模拟中无论是选择目前质量大的子结构还是在进入银河系前质量较大的暗晕, 其旋转速度分布和观测都不一致: 数值模拟在 10 ~ 30 km/s 处预言了 2 ~ 3 倍多的卫星星系。

Maccio 等人^[70]首次从理论上分析了 $M_{300} - L$ 关系。他们利用数值模拟和半解析模型研究了这些暗星系的形成, 发现模型大致能重现 $M_{300} - L$ 关系。首先对于小质量暗晕 ($T < 10000$ K), 其气体的冷却率很低 (包括中性氢冷却), 因此这些暗晕中恒星很难形成。只有那些质量较大的暗晕 ($\geq 1 \times 10^8 M_\odot$, 具体值依赖于暗晕形成红移) 内气体的冷却才比较明显。在观测到的光度范围内, 这些暗星系所在的暗晕在进入银河系以前具有的质量分布范围较窄, 在 $3 \times 10^8 M_\odot$ 到 $3 \times 10^9 M_\odot$ 之间。尽管由于潮汐力的影响, 暗晕外部的物质被逐渐剥离, 但内部密度轮廓 (< 300 pc) 内基本保持不变。由于这些暗晕进入银河系的红移不同, 宇宙再电离对其气体含量的影响也不一样, 导致其形成的恒星质量分布在一个较广的范围内。这解释了为什么这些暗星系光度分布范围很广, 而 300 pc 内暗物质含量相似的观测事实。Kang^[49]也得到了同样的结论, 他们还发现模型预言的卫星星系质光比跟观测也很接近。稍后的研究^[71, 72]相继得到了与观测一致的 $M_{300} - L$ 关系。然而 Bullock 等人^[73]认为这个关系可能只是表面亮度的一个选择效应。他们发现这些观测量之间有简单的经验关系, $M_{300}^2 \simeq \sigma^4 \mu / L$ 。对于给定的光度 L , 表面亮度 (μ) 的探测极限意味着其质量 M_{300} 有一个下限值, 所以观测到的 M_{300} 与 L 之间无明显的相关。

从暗星系的速度弥散和半径, 还可以得到暗物质在相空间的密度 ($Q = \rho/\sigma^3$)。Simon 和 Geha^[69] 发现这些暗星系给出的 Q 比 Ly α 观测给出的值高, 达到 $10^{-3} M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$ 。暗物质在相空间的密度可以用来限制“温暗物质”的粒子质量^[157]。然而目前的观测只能给出相空间的下限, 要想精确地测到相空间密度, 需要观测暗星系内的密度轮廓。目前很难实现这个目标, 因为需要打破径向速度和速度各向异性的简并, 除非能测量恒星的切向速度。这样的观测有望在 Thirty Meter Telescope (TMT) 和 Gian Magellan Telescope (GMT) 上实现。

2.3 空间分布

卫星星系在中央星系周围的分布对 CDM 模型也有很强的限制。Holmberg^[74] 很早就发现: 对漩涡星系来说, 其卫星星系倾向于分布在漩涡星系的短轴方向。这就是所谓的 Holmberg 效应。后来的研究也发现了这一现象^[75-78]。利用英澳 2° 视场星系红移巡天 (2dFGRS) 的大样本数据, 研究者^[79] 也有类似发现。然而, 利用 SDSS 大样本的研究^[80-82] 发现了完全相反的分布: 对蓝色的漩涡星系, 卫星星系的分布基本上是各向同性的; 对于椭圆星系或红色的漩涡星系, 卫星星系倾向于分布在其主轴附近。Yang 等人^[82] 认为以前的结果可能是样本数目太少的原因, 而 2dFGRS 的结果与 SDSS 的结果其实是一致的, 只是被 Sales 和 Lambas 错误地解释为倾向于短轴。

银河系卫星星系有跟 Holmberg 效应类似的分布^[83-85], 即大部分较亮的卫星星系分布在一个盘状结构上, 该盘与银河系的盘面基本垂直。利用卫星星系的自行数据, 一些研究^[86-88] 发现这些卫星星系的角动量也与其分布盘的方向一致。Metz 等人^[89] 调查了最近发现的一些更暗的卫星星系, 发现它们也分布在那些较亮卫星星系定义的盘面上, 进一步巩固了卫星星系呈盘状分布的结论。同时, 对于仙女星系, 一些研究^[89, 90] 发现其卫星星系也有类似的分布。

卫星星系的盘状分布引起了理论学家的极大兴趣。Kroupa 等人^[85] 认为该分布对 CDM 理论形成了挑战。他们认为数值模拟给出的子结构在主暗晕内是各向同性分布的, 从中得到盘状分布的几率很小。这些卫星星系更有可能是在星系并合过程中被潮汐力拉扯出来而形成的。Kang 等人^[91] 发现, 卫星星系的分布与暗晕子结构的分布不一样, 更倾向于向中心集中。如果样本数目较少, 其分布很自然就是盘状分布。Zentner 等人^[92] 发现暗晕子结构并不是各向同性分布的, 从子结构中得到盘分布的几率很小, 除非选择那些被吸积之前质量较大的子结构。后来的工作^[93] 也发现银河系的卫星星系来源于那些被吸积之前质量较大的暗晕, 而这些暗晕基本上都是沿着银河系暗晕的主轴平面被吸积进来的, 很自然地导致观测到的卫星星系分布在一个薄的平面上。

另外一些工作^[94, 95] 认为银河系内的卫星星系可能不是单个进入银河系的, 而是在进入之前分布在 1 个或几个大的星系群里面。D'onghia 和 Lake^[95] 指出这些暗星系与 LMC 来源于同一个群。这些说法的依据是观测发现^[96, 97] 银河系附近的 ($< 8 \text{ Mpc}$) 内的一些暗星系实际上分布在一些尺度较小且束缚的群里面。如果银河系内的卫星星系来源于几个类似这样的群, 就能形成在一个较薄的平面上。Metz 等人^[98] 对这种观点提出质疑, 他们发现银河系附近观测到的束缚结构不可能是银河系卫星星系的来源, 因为它们的空间聚集度太小, 因而形成不了观测到的径向分布。相反, 他们认为银河系的暗星系可能来源于一个纤维状的结构, 潮

汐力的剥离形成了这些暗星系。

目前这些理论工作的主要缺陷在于他们利用的是只包括暗物质的数值模拟,而关于恒星形成等过程是“手动”加入到模型中,因此,这些工作不能模拟银河系盘的形成。很难解释卫星星系分布的另一个问题:为什么卫星星系分布的盘倾向于与银河系恒星盘垂直?要回答这个问题,需要利用包括气体冷却、恒星形成、超新星能量反馈的数值模拟来同时模拟银河系卫星星系和银河系盘的形成。Libeskind 等人^[93]利用平滑粒子的流体模拟 (Smoothed Particle Hydrodynamics),发现在 10 个类似银河系的暗晕中,只有 3 个暗晕内的卫星星系数目与银河系的相当。令人惊讶的是这些卫星星系也分布在一个薄的平面上,且其中有 2 个暗晕与观测一致:其恒星盘与卫星星系分布平面垂直。与银河系类似的分布要求恒星盘与暗晕的短轴垂直,这看上去很难理解。首先在暗晕内部角动量与短轴方向有较好的一致^[99],虽然随着半径增加一致性有所降低^[100]。同时气体的角动量与暗晕的角动量方向基本一致。由于卫星星系倾向于分布在暗晕的主轴平面,因此银河系内卫星星系的分布意味着恒星盘的方向在主轴平面内,即其角动量的方向与暗晕主轴一致,而不是与短轴一致。尽管看上去很难得到这样的分布,但是由于这几者之间的方向并不是完全一致的,而是平均都有几十度的偏差,因此并非不能形成这样的分布。问题的关键是银河系内卫星星系这样的分布是否具有普适性,这需要利用近邻星系的大样本观测来验证。

上面着重讨论了卫星星系在三维空间内的二维分布,这里简单讨论卫星星系的一维径向数密度分布。研究发现无论是在银河系还是星系团中,子结构的分布在中心较平,而暗物质和卫星星系在暗晕中心区域的数密度较高^[91, 101, 102]。这种差别有两个可能的原因。子结构进入暗晕后遭受到很强的潮汐力,在暗晕中心子结构的质量损失很大。如果用子结构的当前质量来选样本,则选出的样本容易选择那些刚刚被主暗晕吸积的子结构,其中大部分分布在暗晕外部^[21]。另一个可能性就是在不含气体和恒星的数值模拟中,暗晕中心的子结构很容易被主暗晕的潮汐力撕碎,导致其在中心数密度较低。含有气体和恒星形成的模拟发现^[103-107]:重子物质的塌缩(气体冷却、恒星形成)过程使得子结构中心的暗物质密度增加,从而能抵抗潮汐力的作用而存活下来。数值模拟研究^[72, 93, 108]还发现,如果暗星系形成于在宇宙电离前质量最大的十几个暗晕,则这些暗晕今天在银河系内的分布跟观测较一致。Gan 等人^[109]也指出,早期吸积的暗晕整体向中心聚集,主要是早期主暗晕的位力半径(也是被吸积暗晕的初始轨道)较小造成的。

3 其他研究

3.1 恒星流

卫星星系和银河系间的相互作用会产生气体流或恒星流。银河系中最显著的就是麦哲伦流^[110],它横跨天空 100 多度,连接着大小麦哲伦云;其主要由高速中性气体云和少量恒星组成。研究^[111]发现它的形成与银河系有很紧密的关系,其主要形成机制可能是冲击压力剥离^[112-115]或者潮汐剥离^[116-118]。利用麦哲伦流中恒星的自行数据^[119],Besla^[120]认为以上两

种说法面临挑战,因为他们发现大小麦哲伦云可能是刚刚进入银河系的。最近 Nidever 等人^[121]利用 Green Bank Telescope 发现麦哲伦流的测量结果比以前更长,年龄也更老。他们提出了其形成的第三种理论:大小麦哲伦云过去曾经很接近,其相互作用产生了麦哲伦流。这意味着只有利用更灵敏的观测和自行数据,才能对麦哲伦流的形成历史有更深入的了解,并进一步限制银河系的形成历史。

银河系中最壮观的恒星流就是人马座星流 (Sagittarius Stream^[122]),其在全天成一个 360° 的大圆分布。研究^[123-126]发现星流中的恒星具有相似的速度,其空间分布与人马座矮星系的运动轨道在同一平面上;同时星流中的恒星具有与人马座矮星系中一样的恒星成分。这表明该星流是矮星系进入银河系后被潮汐力剥离出来的痕迹。星流中恒星的位置和速度分布还可以用来限制银河系暗晕的形状。如早期研究^[125, 127]发现银河系暗晕应该是球对称的; Helmi^[128]则认为其应该是扁长分布的; Fellhauer 等人^[129]认为其是扁平状分布; Law 等人^[130]认为银河系暗晕具有数值模拟预言^[131]的三轴分布。对 Sagittarius Stream 的细致分析^[132]发现,如果人马座暗星系在被银河系吸积之前是一个盘星系,则能很好地解释其星流的分叉结构。

斯隆巡天还发现了不少其他星流,其空间尺度从几度到上百度不等。利用星流中恒星的速度和化学组成等信息可进一步鉴别产生该星流的天体。如研究^[133, 134]发现 Monoceros 星流可能来源于 Canis Major 矮星系。来自于球状星团 Palomar 5 的星流^[135],球状星团 NGC5466 的星流^[126, 136]。也有不明来源的星流,如孤儿星流^[126, 137]。鉴别星流及其寄主天体的来源依赖于恒星速度和光谱,因此对大量恒星速度的高精度测量将推动这方面研究,如 GAIA^[138]。

人们关心银河系星流还有一个重要原因就是它也许能解释星系演化观测中的一个重要现象:大质量星系在最近的 60 ~ 70 亿年内基本上没有演化^[139]。而 CDM 理论预言这些星系应该有很强的演化^[140],除非卫星星系在被中央星系吞并之前损失了相当大部分的恒星和气体^[141, 142]并形成了可被观测到的星流。因此可以通过观测银河系内卫星星系和其星流之间的关系,限制卫星星系中恒星被潮汐力剥离的效率及其对卫星星系性质等的依赖关系,从而解决大质量星系的形成问题。

3.2 暗物质湮灭信号

最近几年探测暗物质湮灭 (annihilation) 时产生的伽玛射线非常热门。自从冷暗物质被“发现”以来,人们一直在探索其本质是什么。标准粒子模型的超对称扩展理论预言暗物质的候选者可能是一种质量几乎为零的超对称粒子,即要么是引力微子,要么是最轻的中微子。尽管引力微子很有可能是暗物质的最佳候选者,但是它们之间的极低相互作用使得它们很难被探测到;而中微子之间较强的相互作用使得研究者能在地球上探测到它。由于探测条件的限制,目前只有少数的几个实验去直接探测其和普通物质的作用^[143-147]。非直接探测暗物质粒子一般是探测其湮灭信号,即正电子,中微子或伽玛射线。最近一些工作^[148, 149]分别在宇宙射线的高能部分探测到额外的正电子流量,这鼓舞了人们去探测暗物质的其他信号,如伽玛射线等。

对银河系来说,暗物质湮灭的伽玛射线信号在银心的高密区应该很强,一些理论工作对此给出了计算^[150, 151]。然而由于点源的污染,很难辨别哪些是来自暗物质湮灭的贡献。探测

银河系的平滑背景辐射则可以得到主要来自暗物质湮灭的信号^[152, 153]。银河系的子结构对伽玛射线探测更有利, 因为子结构内部的暗物质密度也很高, 且其气体和恒星形成率很低, 因此来自超新星等点源的污染应该比较小^[154-156]。Strigari 等人^[157]利用恒星速度弥散的数据, 发现几个卫星星系 (Ursa Major II, Willman 1, Coma Berenices) 应该具有较强的伽玛射线流量。一方面因为这几个卫星星系都是暗物质主导 (在 100 pc 内 $\geq 10^6 M_\odot$); 另一方面是这些卫星星系距离地球较近。借助于 Fermi, GLAST 或下一代的 IACT, 估计能探测到更多的卫星星系的伽玛射线流量。由于伽玛射线流量依赖于暗物质的性质 (质量和密度), 因此对子结构中暗物质湮灭的信号探测能限制其内部结构和暗物质的本质。

4 总结与展望

本文概括了银河系内卫星星系的观测和理论研究进展。目前已探测到几十个卫星星系, 其光度分布范围从 $10^3 L_\odot$ 到 $10^{10} L_\odot$, 半径分布从约 100 pc 到几个 kpc。利用其动力学性质, 研究发现绝大部分卫星星系都是暗物质主导的, 且在中心区域暗物质含量接近一个常数。建立在 CDM 理论上星系形成模型 (主要物理过程包括宇宙电离、气体冷却、超新星能量反馈等) 能给出与观测一致的卫星星系光度函数和空间分布。目前关于卫星星系的研究方兴未艾, 有不少问题需要解决。

对银河系内卫星星系的探测受限于几个方面。一是表面亮度, 即 $\mu < 30 \text{ mag}\cdot\text{arcsec}^{-2}$ 。这意味着一个有 $1000 L_\odot$ 亮度的卫星星系, 如果其半光度半径大于 100 pc, 则不能被目前的观测所发现。因此, 要观测这些可能产生于宇宙电离后的极暗星系, 需要利用下一代的巡天项目, 如 LSST。据估计^[73] LSST 大概能探测到几百个这样的极暗星系。观测本领更强大的望远镜, 如 TMT 有望能全面地搜寻出更多的极暗星系。另外, 目前的巡天面积不够大, SDSS 也只覆盖了全天的 1/5; 而 LSST 将扩大到全天的 1/2, 有望对卫星星系做全面的“人口普查”。

卫星星系研究还有一个问题是中心密度是否发散。CDM 理论预言暗晕或子结构中心的密度是发散的, 即半径趋向零时密度无穷大^[158]。对低表面亮度星系的观测表明其中心区域是密度为有限常数的核^[159]。对卫星星系估计其中心密度更难。在利用金斯方程估计中心密度时, 由于压力支撑系统中存在密度和轨道各向异性的简并, 所以关于中心的密度轮廓存在争论^[160-162]。利用多分量分布函数模型, 一些研究认为矮星系中心区域也是一个密度为常数的核^[160, 163]。这些结果跟 CDM 的预言相矛盾, 有人^[164]提出了暗物质应该是“温热的”; 也有认为是恒星形成的过程, 如超新星反馈, 导致星系中心密度变平^[165]; 还有认为是子结构与中心暗晕的角动量交换导致暗晕中心密度降低^[166]。由于矮星系在中心区域是暗物质占绝对主导的, 这些过程对其密度轮廓的影响可能较小。

在用 CDM 理论讨论银河系内卫星星系的数密度和空间分布等问题时, 不可避免的问题就是我们只观测了一个银河系, 很难从数值模拟准确地选出“银河系”来跟观测比较。因此在与银河系的观测比较时必须考虑系统偏差。利用高精度、大样本的数值模拟^[167]发现, 如果

银河系质量为 $10^{12} M_{\odot}$, 那么它拥有像大小麦哲伦云这样的卫星星系的概率少于 10%。因此我们必须从统计上研究像银河系这样大小、形状内的暗晕内, 其卫星星系数目的分布概率。这必须跟 M31 或其他近邻星系的观测结合起来。

同时, 在用理论模型解释卫星星系分布的另一个挑战是, 必须利用包括恒星形成的数值模拟, 而不是像目前大多数模拟那样只是包括了暗物质及其子结构的形成。只有全面地考虑了气体冷却、宇宙背景辐射、恒星形成反馈等物理过程, 才能给出恒星在子结构内的分布、视向速度等, 从而可与观测进行更直接、更细致的比较。这对目前的模拟有很大的挑战: 目前我们并不清楚影响恒星形成的主要物理过程, 同时高精度、大样本的流体模拟对计算机能力也是很大的挑战。

参考文献:

- [1] Blumenthal G R, Faber S M, Primack J R, et al. *Nature*, 1984, 311: 517
- [2] Davis M, Efstathiou G, Frenk C S, et al. *ApJ*, 1985, 292: 371
- [3] Willman B, Dalcanton J J, Martinez-Delgado D, et al. *ApJ*, 2005, 626: 85
- [4] Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. *ApJ*, 2006, 643L: 103
- [5] Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. *ApJ*, 2006, 650L: 41
- [6] Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. *ApJ*, 2007, 654: 897
- [7] Belokurov V, Walker M G, Evans N W, et al. *ApJ*, 2008, 686L: 83
- [8] Walsh S M, Jerjen H, Willman B. *ApJ*, 2007, 662: 83
- [9] Kirby E, Simon J, Geha M, et al. *ApJ*, 2008, 685: 43
- [10] Kopesov S, Belokurov V, Evans N W, et al. *ApJ*, 2008, 686: 279
- [11] Tollerud E, Bullock J, Strigari L, et al. *ApJ*, 2008, 688: 277
- [12] Keller S C, Schmidt B P, Bessell M S, et al. *Publication of the Astronomical Society of Australia*, 2007, 24: 1
- [13] The Dark Energy Survey Collaboration, arXiv:0510346, 2005
- [14] Kaiser N, Aussel H, Boesgaard H, et al. *Proc.SPIE*, 2002, 4836: 154
- [15] Ivezić Z, Tyson J A, Allsman R, et al. arXiv:0805.2366, 2008
- [16] Springel V, Frenk C S, White D M. *Nature*, 2005, 440: 1137
- [17] Diemand J, Kuhlen M, Madau P. *ApJ*, 2007, 657: 262
- [18] Springel V, Wang J, Vogelsberger M, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1685
- [19] Kauffmann G, White S D M, Guiderdoni B. *MNRAS*, 1993, 264: 201
- [20] Moore B, Ghigna S, Governata F, et al. *ApJ*, 1999, 524: L19
- [21] Kravtsov A. 2010, *Advance in Astronomy*, 2010E,8 (arXiv:0906.3295)
- [22] Bullock J S. arXiv:1009.4505, 2010
- [23] Mateo M. *ARA&A*, 1998, 36: 435
- [24] 甘建玲. 博士论文, 上海: 中国科学院上海天文台, 2010
- [25] Kravtsov A, Berlind A, Wechsler R, et al. *ApJ*, 2004, 609: 35
- [26] Gao L, White S D M, Jenkins A, et al. *MNRAS*, 2004, 355: 819
- [27] Kang X, Jing Y P, Mo H J, et al. *ApJ*, 2005, 631: 21
- [28] Stoehr F, White S D M, Tormen G, et al. *MNRAS*, 2002, 335: 84
- [29] Hayashi E, Navarro J, Taylor J, et al. *ApJ*, 2003, 584: 54
- [30] Kazantzidis S, Mayer L, Mastropietro C, et al. *ApJ*, 2004, 608: 663
- [31] Zentner A, Bullock J. *ApJ*, 2003, 598: 49

-
- [32] Kamionkowski M, Liddle A. *Phys.Rev.Letter*, 2000, 84: 4525
- [33] Colin P, Avia-Reese V, Valenzuela O. *ApJ*, 2000, 542: 622
- [34] Maccio A, Fontanot F. *MNRAS*, 2010, 404: 16
- [35] Kochanek C, White M. *ApJ*, 2000, 543: 514
- [36] Yoshida N, Springel V, White S D M, et al. *ApJ*, 2000, 544: 87
- [37] Gnedin O Y, Ostriker J P. *ApJ*, 2001, 561: 61
- [38] Bullock J, Kravtsov A, Weinberg D. *ApJ*, 2000, 539: 517
- [39] Kravtsov A, Gnedin O Y, Klypin A. *ApJ*, 2004, 609: 482
- [40] White S D M, Rees M. *MNRAS*, 1978, 183: 341
- [41] White S D M, Frenk C S. *ApJ*, 1991, 379: 52
- [42] Cole S, Lacey C, Baugh C, et al. *MNRAS*, 2000, 319: 168
- [43] Somerville R, Primack J. *MNRAS*, 1999, 310: 1087
- [44] Gnedin N. *ApJ*, 2000, 542: 535
- [45] Benson A, Lacey C, Baugh C, et al. *MNRAS*, 2002, 333: 156
- [46] Somerville R. *ApJ*, 2002, 572: 23
- [47] Moore B, Diemand J, Madau P, et al. *MNRAS*, 2006, 368: 563
- [48] Maccio A, Kang X, Fontanot F, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 1995
- [49] Kang X. *IAUS*, 2009, 254: 32
- [50] Jiang C, Jing Y P, Faltenbacher A, et al. *ApJ*, 2008, 675: 1095
- [51] Boylan-Kolchin M, Ma C, Quataert E. *MNRAS*, 2008, 383: 93
- [52] Rohlfs K, Kreitschmann J, Feitzinger J, et al. *A&A*, 1984, 137: 343
- [53] van der Marel R P, Alves D, Hardy E, et al. *AJ*, 2002, 124: 2639
- [54] Mateo M, Olszewski E W, Pryor C, et al. *AJ*, 1993, 105: 510
- [55] Muñoz R R, Frinchaboy P M, Majewski, S R, et al. *ApJ*, 2005, 631: L137
- [56] Armandroff T E, Olszewski E W, Pryor C. *AJ*, 1995, 110: 2131
- [57] Kleyna J T, Wilkinson M I, Evans N W, et al. *MNRAS*, 2002, 330: 792
- [58] Mateo M, Olszewski E W, Welch D L, et al. *AJ*, 1991, 102: 914
- [59] Walker M G, Mateo M, Olszewski E W, et al. *AJ*, 2006, 131: 2114
- [60] Mateo M, Olszewski E W, Vogt S S, et al. *AJ*, 1998, 116: 2315
- [61] Koch A, Wilkinson M I, Kleyna J T, et al. *ApJ*, 2007a, 657: 241
- [62] Vogt S S, Mateo M, Olszewski E W, et al. *AJ*, 1995, 109: 151
- [63] Koch A, Kleyna J T, Wilkinson M I, et al. *AJ*, 2007b, 134: 566
- [64] Westfall K B, Majewski S R, Ostheimer J C, et al. *AJ*, 2006, 131: 375
- [65] Hargreaves J C, Gilmore G, Irwin M J, et al. *MNRAS*, 1994, 269: 957
- [66] Kleyna, J T, Wilkinson M I, Evans N W, et al. *MNRAS*, 2004, 354: L66
- [67] Walker M G, Mateo M, Olszewski E W, et al. *ApJ*, 2007, 667: 53
- [68] Strigari L, Bullock J, Kaplinghat M, et al. *Nature*, 2008, 454: 1096
- [69] Simon J D, Geha M. *ApJ*, 2007, 670: 313
- [70] Maccio A V, Kang X, Moore B. *ApJ*, 2009, 692: L109
- [71] Li Y-S, Helmi A, De Lucia G, et al. *MNRAS*, 2009, 397: 87
- [72] Koposov S, Yoo J, Rix H W, et al. *ApJ*, 2009, 696: 2179
- [73] Bullock J S, Stewart K R, Kaplinghat M, et al. *ApJ*, 2010, 717: 1043
- [74] Holmberg E. *ArA*, 1969, 5: 305
- [75] Hawley D L, Peebles P J E. *AJ*, 1975, 80: 477
- [76] Sharp N A, Lin D N C, White S D M. *MNRAS*, 1979, 187: 287
- [77] MacGillivray H T, Dodd R J, McNally B V, et al. *MNRAS*, 1982, 198: 605
- [78] Zaritsky D, Smith R, Frenk C S, et al. *ApJ*, 1997, 478: 53
- [79] Sales L, Lambas D G. *MNRAS*, 2004, 348: 1236
- [80] Brainerd T G. *ApJL*, 1005, 628: 101

-
- [81] Agustsson I, Brainerd T G. *ApJ*, 2006, 644L: 25
- [82] Yang X H, van den Bosch F C, Mo H J, et al. *MNRAS*, 2006, 369: 1293
- [83] Lynden-Bell D. *Obs*, 1982, 102: 7L
- [84] Majewski S R, Munn J A, Hawley S L. *ApJ*, 1994, 427L: 37
- [85] Kroupa P, Theis C, Boily C M. *A&A*, 2005, 431: 517
- [86] Libeskind N, Frenk C S, Cole S, et al. *MNRAS*, 2009, 399: 550
- [87] Piatek S, Pryor C, Bristow P, et al. *AJ*, 2006, 131: 1445
- [88] Metz M, Kroupa P, Jerjen H. *MNRAS*, 2007, 374: 1125
- [89] Metz M, Kroupa P, Jerjen H. *MNRAS*, 2009, 394: 2223
- [90] Koch A, Grebel E K. *AJ*, 2006, 131: 1405
- [91] Kang X, Mao S, Gao L, et al. *A&A*, 2005, 437: 383
- [92] Zentner A R, Kravtsov A V, Gnedin O Y, et al. *ApJ*, 2005, 629: 219
- [93] Libeskind N, Cole S, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2007, 374: 16
- [94] Li Y-S, Helmi A. *MNRAS*, 2008, 385: 1365
- [95] D'onghia E, Lake G. *ApJ*, 2008, 686: L61
- [96] Tully R B, Somerville R, Trentham N, et al. *ApJ*, 2002, 569: 573
- [97] Tully R B, Rizzi L, Dolphin A E, et al. *AJ*, 2006, 132: 729
- [98] Metz M, Kroupa P, Theis C, et al. *ApJ*, 2009, 697: 269
- [99] Warren M S, Quinn P J, Salmon J, et al. *ApJ*, 1992, 399: 405
- [100] Bailin J, Steinmetz M. *ApJ*, 2005, 627: 647
- [101] Gao L, De Lucia G, White S D M, et al. *MNRAS*, 2004, 352: 1
- [102] Taylor J, Babul A. *MNRAS*, 2005, 364: 535
- [103] Gnedin O Y, Kravtsov A V, Klypin A A, et al. *ApJ*, 2004, 616: 16
- [104] Nagai D, Kravtsov A V. *ApJ*, 2005, 618: 557
- [105] Maccio A V, Moore B, Stadel J, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1529
- [106] Weinberg D H, Colombi S, Dave R, et al. *ApJ*, 2008, 678: 6
- [107] Dolag K, Borgani S, Murante G, et al. *MNRAS*, 2009, 399: 497
- [108] Madau P, Diemand J, Kuhlen M. *ApJ*, 2008, 679: 1260
- [109] Gan J, Kang X, van den Bosch F, et al. *MNRAS*, 2010, 408: 2201
- [110] Wannier P, Wirxon G T. *ApJ*, 1972, 173L: 119
- [111] Mathewson D S, Cleary M N, Murray J D. *ApJ*, 1974, 190: 291
- [112] Meurer G R, Bicknell G V, Gingold R A. *PASAJ*, 1985, 6: 195
- [113] Sofue Y. *ApJ*, 1994, 423: 207
- [114] Moore B, Davis M. *MNRAS*, 1994, 270: 209
- [115] Mastropietro C, Moore B, Mayer L, et al. *MNRAS*, 2005, 363: 509
- [116] Murai T, Fujimoto M. *PASJ*, 1980, 32: 581
- [117] Gardiner L T, Noguchi M. *MNRAS*, 1996, 278: 191
- [118] Connors T, Kawata D, Gibson B K. *MNRAS*, 2006, 371: 108
- [119] Kallivayalil N, van der Marel R P, Alcock C, et al. *ApJ*, 2006, 638: 772
- [120] Besla G, Kallivayalil N, Hernquist L, et al. *ApJ*, 2007, 668: 949
- [121] Nidever D, Majewski S, Butler B, et al. *ApJ*, 2010, 723: 1618
- [122] Ibata R A, Gilmore G, Irwin M J. *Nature*, 1994, 370: 194
- [123] Ibata R A, Wyse R, Gilmore G, et al. *AJ*, 1997, 113: 634
- [124] Yanny B, Newberg H J, Kent S, et al. *ApJ*, 2000, 540: 825
- [125] Majewski S R, Skrutskie M F, Weinberg M D, et al. *ApJ*, 2003, 599: 1082
- [126] Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. *ApJ*, 2006, 642: 137
- [127] Ibata R, Lewis G, Irwin M, et al. *ApJ*, 2001, 551: 294
- [128] Helmi A. *ApJ*, 2004, 610L: 97
- [129] Fellhauer M, Belokurov V, Evans N W, et al. *ApJ*, 2006, 651: 167

- [130] Law D, Majewski S. *ApJ*, 2010, 714: 229
- [131] Jing Y P, Suto Y. *ApJ*, 2002, 574: 538
- [132] Penarrubia J, Belokurov V, Evans N W, et al. *MNRAS*, 2010, 408L: 26
- [133] Martinez-Delgado D, Butler D, Rix H-W, et al. *ApJ*, 2005, 633: 205
- [134] Conn B C, Lane R R, Lewis G F, et al. *MNRAS*, 2007, 376: 939
- [135] Odenkirchen M, Grebel E K, Rockosi C M, et al. *ApJ*, 2001, 548L: 165
- [136] Grillmair C, Johnson R. *ApJ*, 2006, 639L: 17
- [137] Grillmair C. *ApJ*, 2006, 645L: 37
- [138] Helmi A, Zhao H, de Zeeuw T. *ASPC*, 1999, 165: 125
- [139] Pozzetti L, Cimatti A, Zamorani G, et al. *A&A*, 2003, 402: 837
- [140] Kitzbichler M, White S D M. *MNRAS*, 2007, 376: 2
- [141] Monaco P, Murante G, Borgani S, et al. *ApJ*, 2006, 625: L89
- [142] Kang X, Lin W P, Ramin S, Chen D N. *ApJ*, 2010, 713: 1301
- [143] Akerib D S, Alvaro-Dean J, Armel-Funkhouser M, et al. *Phys.Rev.Letter*, 2004, 93: 213301
- [144] Angle J, Aprile E, Arenodo F. *Phys.Rev.Letter*, 2008, 100: 021303
- [145] Alner G J, Araujo H, Arnison G J, et al. *Astropart. Physics*, 2005, 23: 444
- [146] Bernabei R, Belli P, Cerulli R, et al. *Phys.Letter. B*, 2000, 480: 23
- [147] Bernabei R, Belli P, Cappella F, et al. *European Phys.J.C*, 2008, tmp: 167
- [148] Adriani O, Barbarino G C, Bazilevskaya G A, et al. *Nature*, 2009, 458: 607
- [149] Chang J, Adams J H, Ahn H S, et al. *Nature*, 2008, 456: 362
- [150] Bertone G, Merritt D. *PhRvD*, 2005, 72: j3502B
- [151] Ivezic Z, Tyson J A, Allsman R, et al. *AAS*, 2009, 41: 366
- [152] Stoehr F, White S D M, Springel V, et al. *MNRAS*, 2003, 345: 1313
- [153] Springel V, White S D M, Frenk C S, et al. *Nature*, 2008, 456: 73
- [154] Siegal-Gaskins J M. *J.Cosmol.Astropart.Phys*, 2008, 10: 40
- [155] Ando S. *Phys.Rev.D*, 2009, 80: 023520
- [156] Berezhinsky V, Dokuchaev V, Eroshenko Y. *Phys.Rev.D*, 2003, 68: 103003
- [157] Strigari L, Koushiappas S, Bullock J, et al. *ApJ*, 2008, 678: 614
- [158] Navarro J, Frenk C S, White S D M. *ApJ*, 1997, 490: 493
- [159] Oh S.-H, de Blok W, Walter F, et al. *AJ*, 2008, 136: 2761
- [160] Gilmore G, Wilkinson M, Wyse R, et al. *ApJ*, 2007, 663: 948
- [161] Evans N, An J, Walker M. *MNRAS*, 2009, 393: 50
- [162] Walker M G, Mateo M, Olszewski E, et al. *ApJ*, 2009, 704: 1274
- [163] Wilkonson M, Kleyna J, Evans N, et al. *MNRAS*, 2002, 330: 778
- [164] Kaplinghat M. *Phys.Rev.D*, 2005, 72: 063510
- [165] Governato F, Brook C, Mayer L, et al. *Nature*, 2010, 463: 203
- [166] Goerdt T, Moore B, Read J, et al. *ApJ* in press, arXiv:0806.1951
- [167] Boylan-Kolchin M, Springel V, White S D M, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 896

Progress on the study of the Milky Way satellite galaxies

KANG Xi

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

Abstract: In recent years, great progress has been achieved on studies of the satellite galaxies in the Milky Way (MW). With the help of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), more than dozen faint satellites have been discovered, doubling the known satellites to more than twenty. The luminosity of these satellites ranges from $10^3 L_{\odot}$ to $10^{10} L_{\odot}$, and the faintest dwarf has stellar mass close to the globular cluster, but with much more extend spatial distribution. Using the enriched data of stellar spectra, more accurate information about the satellite galaxies (luminosity, chemical abundance, kinematics) can be obtained and it allows for comprehensive comparison between model predictions and observations. In this paper, we review those studies which can put strong constraints on the CDM scenario and galaxy formation physics.

The notorious puzzle about the MW is the “Missing Satellite Problem” explicitly shown by Moore et al. (1999) that the number of substructures in N -body simulation surpasses the observed satellites by a factor of ten. This problem has triggered modifications of the CDM model, either by suppressing the perturbation amplitude on small scales or using the warm dark matter instead. However, most work tries to rescue the standard CDM scheme by invoking astrophysics processes to solve this discrepancy. In this aspect, the luminosity function of satellite is especially useful as it allows for a direct comparison between model predictions and the data.

By quantifying the detectability and completeness of the SDSS, the luminosity function of MW satellites can be well described by a power law down to magnitude $M_V = -2$. It is found that the MW should contains more than hundreds of faint dwarf satellites. Combining the formation history of the MW from high-resolution simulation with those astrophysics process, such as gas cooling, star formation, feedback and cosmic re-ionization, it is shown that galaxy formation model can reproduce the luminosity function of satellites. The UV background has the effect to suppress gas cooling in small haloes after re-ionization. Thus only a biased population of substructures in N -body simulation can form stars.

The distribution of satellites around the Milky Way is also weird that most of them are distributed in a flattened plane, which is almost perpendicular to the MW stellar disk. Such a spatial configuration is though to challenge the CDM theory as the distribution of substructures is isotropic. Using simulation with star formation included, it is found that

most satellites reside in dark matter haloes which are massive before accreted by host halo, and they are predominately accreted along the major axes of the host haloes. Thus the satellites tend to distribute in a flattened disk. It is also suggested that flattened structure are formed because most satellites are in a group before accretion. However, It is still puzzle why the flattened disk is perpendicular to the MW disk.

It is found that most satellites are dark matter dominated inside the luminous radii. Surprisingly, it is found that the total mass inside 300 pc is almost a constant of $10^7 M_{\odot}$ independent of luminosity. Theoretical work finds that as there is a low mass limit below which gas cooling is very inefficient, and the halo of satellites spans a narrow range of mass before accretion. As the satellites are accreted into the MW at different redshift, the effect of cosmic re-ionization differs significantly, thus producing a wide range of luminosity. Some argue that this flat relation is only a selection effect from surface brightness limit of the SDSS.

We also briefly review other related issues including stellar stream from satellites, and gamma ray from dark matter annihilation. More and more stellar streams are discovered by the SDSS, and using the kinematics and chemical information of stars in the streams, the progenitors of these stream can be identified, and most are related to known dwarf satellites and globular clusters. Satellite galaxies are the best place for gamma ray from dark matter annihilation due to their proximity and lower contamination from point sources.

We finally note that current survey of satellites still suffers detection limit (surface brightness). More faint satellites are expected to be found by the next generation of facilities, such as LSST, GAIA and TMT. For theoretical modeling of the MW, we need to be aware of the cosmic variance as we have observed only one galaxy. High-resolution simulation with star formation is needed to simultaneously model the formation of the MW itself and its satellites. It is definitely a challenge to our understanding of astrophysics and computational power.

Key words: the Milky Way galaxy; satellite; simulation; star formation; Cold dark matter