

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.01.06

本星系群动力学质量之估测

赵君亮^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 上海师范大学, 上海 200233)

摘要: 本星系群的动力学质量 M_{LG} 可以通过多种途径来进行估测, 如计时质量法、零速度面法、位力质量法等, 对之做了简要的说明, 并且介绍了河外星系自行测定在相关研究中的重要性及其现状。对现有测定值进行了分析和讨论, 结果表明, 目前所知本星系群之动力学质量的合理估值可取为 $M_{LG} = (2.73 \pm 0.44) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。

关键词: 本星系群; 银河系; 仙女星系; 径向速度; 横向速度; 动力学质量

中图分类号: P156 **文献标识码:** A

1 引 言

在宇宙空间中, 星系往往成团分布, 聚集成大小不一、形状各异的星系团, 其中质量较小、成员星系个数较少的又可称为星系群, 不过“团”和“群”的划分并无统一、明确的定量判据。星系团按其形态可分为规则星系团(球状星系团)和不规则星系团(疏散星系团)两大类, 前者典型的如后发星系团, 后者的代表性天体当推室女星系团。

银河系与附近几十个质量不等的星系构成一个尺度相对较小的不规则星系团, 称为本星系群(LG)^[1,2], LG 中质量最大的两个主要成员是银河系与仙女星系(M31), 彼此相距约 700 kpc^[3]。其他成员星系或可分为两类: (1) 上述两个巨星系的伴星系, 如麦哲伦云之于银河系, 和三角星系(M33)之于仙女星系; (2) 呈离散分布的十来个独处的星系, 它们的银心距最远可达约 1.5 Mpc。LG 的边界并不十分清晰, 不过可以用明确参与宇宙膨胀的那些星系来予以界定, 而实际上 LG 可定义为与哈勃流相脱离的一个自束缚星系群体^[4]; 当然, 其中应有银河系。

2012 年, McConnachie^[5]编纂了一份 LG 及其邻域内相当完整的矮星系表, 列出了 100 余个星系的位置、结构和动力学参数。图 1 和图 2 是 Diaz 等人^[4]在此基础上所绘制的 LG 星

收稿日期: 2016-01-28; 修回日期: 2016-11-18

资助项目: 国家自然科学基金(11373054); 中国科学院战略性先导专项 B 类(XDB09010100)

通讯作者: 赵君亮, jlzhao@shao.ac.cn

系之位置分布，不过仅限于到银河系和 M31 的距离均小于 1.5 Mpc 的星系 ($D_{MW} < 1.5 \text{ Mpc}$ 和 $D_{M31} < 1.5 \text{ Mpc}$)，计 74 个。由图 1 可见，至少有 15 个矮星系不属于银河系或 M31 的伴星系。

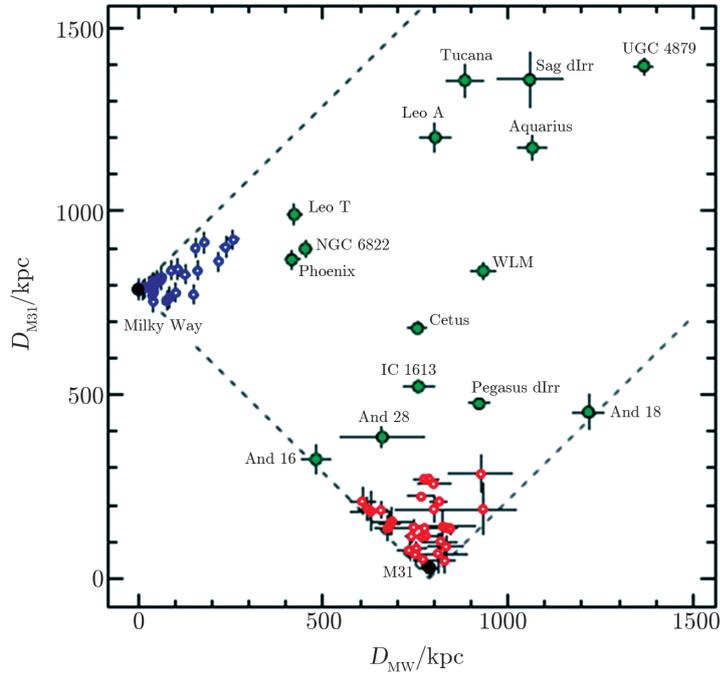


图 1 LG 星系相对银河系和 M31 的位置分布^[4]

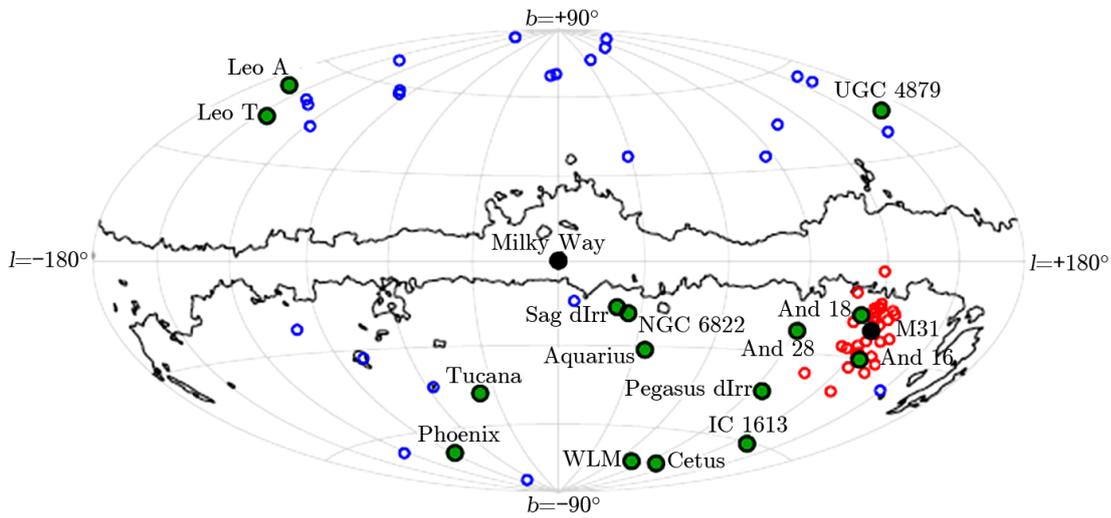


图 2 LG 星系在银道坐标系 (l, b) 中的球面位置分布^[4]

LG 为研究团星系的运动学状态、形成和动力学演化，以及验证宇宙学理论等重要问题，提供了一个最近的、观测资料最为丰富的唯一星系团样本^[3,6,7]，与之相关的一项重要基础性工作是如何合理确定(估测) LG 的动力学质量 M_{LG} 。

有关 M_{LG} 的测定已有半个多世纪的历史。最早至少可追溯到 1959 年 Kahn 和 Woltjer^[8] 的工作，当时他们采用的是计时推理法 (timing argument)，所得到的质量称为计时质量或 TA 质量^[9]。之后，多种方法被用以估算 M_{LG} 。除计时推理法^[2,5,10-14] 外，还有位力质量法^[4,15]、零速度面法^[1,16-19]、TME 质量法^[20] 等。显然，人们希望通过不同的途径，力求对 M_{LG} 做出尽可能合理、客观的估算。就目前来看，不同方法所得出的 M_{LG} 估值尚有 2 倍左右的差异(详见下文)。

本文拟对用于估测 M_{LG} 的若干主要方法以简要的介绍，其中包括河外星系自行测定对相关研究的重要性和现状，给出迄今所取得的、关于 M_{LG} 的代表性实测结果，并对之作比较式的讨论。另外，由光度和质光比所推得的天体光度质量则不在本文考虑之列。

2 主要实测方法简介

LG 内成员星系的运动学状态必受制于 LG 的引力场，而 LG 引力场则取决于 LG 所含物质的质量大小及其分布。据此，利用反映成员星系运动学状态的实测资料就可用以推算 LG 的动力学质量 M_{LG} 及其分布，而这便是计算 M_{LG} 的各类方法之物理基础。在诸多方法中，早期运用最为广泛的是计时推理法，近期用得比较多的除位力质量法外还有零速度面法。本节主要介绍计时推理法和零速度面法的基本思想，其他方法参见文献 [21]，这里不再赘述。

2.1 计时推理法

计时推理法原本用于推算双重星系(即星系对)的总质量。如果用在银河系-M31 这一系统上，那么因为这两个巨星系的质量远大于 LG 中其他成员星系的质量，它们的质量之和约等于 LG 的质量 M_{LG} ，即如设 $M_{tot} = M_{MW} + M_{M31}$ ，这里 M_{MW} 和 M_{M31} 分别为银河系和 M31 的质量，则可以认为 $M_{LG} \approx M_{tot}$ 。

假设 M31 相对银河系做开普勒运动，即服从二体问题的运动方程^[22]：

$$\begin{cases} R = a(1 - e \cos \chi) \\ t = (a^3/GM_{tot})^{1/2}(\chi - e \sin \chi) \end{cases}, \quad (1)$$

G 为引力常数。显然，银河系-M31 系统的相对运动的轨道可由 4 个参数确定：(1) 两个星系的总质量 M_{tot} ，也就是 M_{LG} ；(2) 轨道半长轴 a ，或轨道运动周期 T ；(3) 轨道偏心率 e ；(4) M31 目前在轨道上所处的位置，由偏近点角 χ 表征。

另一方面，有 4 个可观测量可用于确定轨道：(1) M31 目前的银心距 R ；(2) 在银心静止参考架中 M31 的径向速度 V_R ；(3) 横向速度 V_T ；(4) 从 M31 上一次过近心点(即宇宙大爆炸之初)至今所经历的时间 t ，如设定 M31 尚未二次过近心点，那么 t 也就是宇宙的年龄(如可取 $t = (13.75 \pm 0.11) \text{ Ga}^{[14,23]}$)。

显然, 观测量的个数与未知量个数相等, 故而可以唯一确定轨道参数和系统总质量, 由此得出的质量称为计时质量。鉴于河外星系自行的测定颇为不易 (参见下文), 通常的做法是设定运动轨道为纯径向轨道, 即认可 $e = 1$ 和 $V_T = 0$, 这时观测量和未知量均减少为 3 个。不过, 一旦可以测定 V_T 值, 那么就没有必要认定 M31 相对银河系的运动取纯径向轨道 ($e = 1$), 因为任何横向速度的存在都会使计时质量有所增大^[14]。

上述推理中引入了若干近似, 如:

(1) 银河系-M31 双重星系视作为一个孤立系统, 不考虑本星系群内其他成员星系对它们的引力影响;

(2) 这两个星系形成于 $t_0 = 0$ (大爆炸) 时刻, 即 t 取宇宙年龄, 形成后星系按质点运动规律运动;

(3) 目前 M31 处于首次朝银河系趋近过程之中, 尚未到达过近银心点;

(4) M31 的运动轨道取为纯径向轨道 ($e = 1$), 略去可能存在的横向运动。

可以证明, 由此推算出的计时质量乃是实际质量之下限, 而上述近似无疑会影响到计时质量的估算精度^[22]。N 体模拟工作表明, 鉴于推算计时质量的一个基本假设是两个星系目前处于首次相互接近的阶段, 因而当两个星系之间距过大或者过小时, 计时推理法是不适用的: 一旦间距 $R < 200$ kpc, 星系的运动轨道是不确定的; 当 $R > 1$ Mpc 时, 双重星系在演化早期有可能受到其他星系的影响。因此, 对于孤立双重星系而言, 在 $200 \text{ kpc} \leq R \leq 1 \text{ Mpc}$ 范围内, 利用计时推理法有望取得较为可靠的质量估算结果^[22]。

2.2 零速度面法

哈勃定律 ($V = H_0 R$) 给出宇宙大尺度上星系退行速度 V 与其距离 R 间的一种简单线性关系。不过, 在星系团 (比如 LG) 的邻域内, 由于团物质所施加的引力减速作用, 使星系的运动速度与距离呈现为某种非线性关系。把 LG 成员星系的运动学状态与宇宙总体膨胀分割开来的面称为零速度面, 而该球面到星系团质心的距离称为零速度面半径 (或质心距), 即径向速度为零处 LG 成员星系到 LG 质心的距离, 常记为 R_0 , 它与 LG 总质量的关系为^[1,18]:

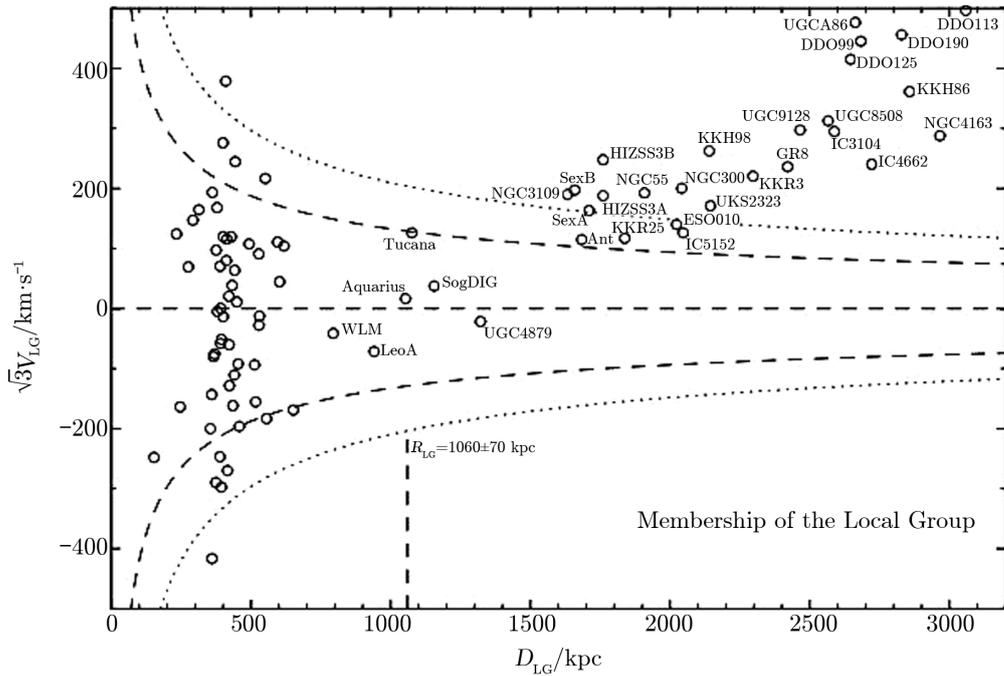
$$M_{\text{LG}} = (\pi^2/8G) \cdot H_0^2 \cdot R_0^3 \quad . \quad (2)$$

Karachentsev 等人^[19]还给出了以下更严格的关系式:

$$M_{\text{LG}} = (\pi^2/8G) \cdot H_0^2 \cdot R_0^3 f^2(\Omega_m) \quad . \quad (3)$$

式中 H_0 为本地哈勃常数, G 为万有引力常数, Ω_m 为物质的平均密度, 而 $f(\Omega_m)$ 是 Ω_m 的函数^[19]。

零速度面法最早于 20 世纪 80 年代由 Lynden-Bell^[16] 和 Sandage^[24] 提出。该方法的应用需满足以下 3 个条件 (或者说假设): (1) 星系群的引力场分布呈球对称形式; (2) 成员星系相对规则哈勃流有少量的随机运动; (3) 目标星系场有足够高的密度, 它们在 LG 参考架中的质心径向速度 V 和距离 R 是能够测出的, 且有足够高的精度^[18]。具体做法是: 根据样本星系的 (V, R) 数值, 通过非线性回归取得 $V - R$ 关系, 进而便可得到与 $V = 0$ 相应的质心距 R_0 , 其中还包括了最佳本地哈勃常数^[5,17,19] (见图 3)。



注: $\sqrt{3}$ 是视向速度换算为空间速度的统计改正因子, 详细说明可参见文献 [5] 中图 5 的注释。

图 3 LG 邻域内星系的速度-距离关系^[5]

进入 21 世纪后, 人们陆续发表了由零速度面法推算 M_{LG} 的多项结果。如 2001 年 Karachentsev 和 Makarov^[17] 利用 LG 邻域内 20 个星系之高精度距离测定值, 得出 $R_0 = (0.96 \pm 0.05)$ Mpc; 他们取本地哈勃常数为 $H_0 = 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 则由关系式 (2) 可得出 $M_{LG} = (1.2 \pm 0.2) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。2002 年, Karachentsev 等人^[1] 由 LG 邻域内 38 个最近星系的高精度距离和速度测定值, 得到 $R_0 = (0.94 \pm 0.10)$ Mpc, 以及 $M_{LG} = (1.3 \pm 0.3) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。到 2009 年, Karachentsev 等人^[19] 利用 LG 邻域内 30 个近邻星系的最新观测资料, 并取本地哈勃常数为 $H_0 = (78 \pm 2) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 得出 $M_{LG} = (1.88 \pm 0.18) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。

就物理学本质上说, 为了估测 M_{LG} , 计时质量法所依据的是单一银河系-M31 系统之(相对)轨道运动状态, 而位力质量法和零速度面法则用到了众多目标星系的运动特征。另一方面, 位力定律是根据 LG 成员星系的内部运动状态来推算星系群的质量, 而零速度面法则是依据 LG 周围星系的外部哈勃速度场来估测星系群的质量。可见, 这 3 种方法所得出的 M_{LG} 值应该是彼此独立的。

3 仙女星系自行的测定

对于各类天体系统, 小到行星系统、星团和星协, 大至星系或星系团, 为探究它们的运

动力学状态、稳定性以及动力学演化, 必须取得目标天体的三维(空间)运动学资料, 其中的视向速度(一维)可由天体光谱线的多普勒位移来确定, 且已达到相当高的精度。然而, 为推算横向速度(亦称切向速度, 二维)需知道天体的距离和自行, 对于远距天体来说, 即使能推算出其距离, 自行测定却颇为不易, 或者精度甚差, 这种情况对河外天体尤为严重。另一方面, 如果仅有一维速度资料可用, 那么相关工作往往需要引入一些假设, 而这就很可能影响到结论的客观性^[26]。因此, 长期以来天文学家一直关注于如何测得河外星系的自行, 首选目标自然是 LG 的成员, 特别是仙女星系 M31。

测出 M31 的自行数据具有重要意义, van der Marel 和 Guhathakurta^[12]曾指出, 只有测出 M31 的自行, 才能对若干基本问题给出较为清晰的回答。如银河系-M31 是否确实构成了一个束缚系统? 由计时推理法测得的 M_{LG} 值究竟是多少? 银河系-M31 这一双重星系未来将如何演化? 与 M31 之间可能存在的相互作用如何影响到 M31 伴星系 M33 的结构等。

早在 1917 年, Barnard^[25]就已开始关注能否测出仙女星系的自行。他注意到当时通过光谱观测已得知 M31 有相当大的视向速度, 据此他推测, 只要时间基线足够长, 就应该能测出 M31 的自行。Barnard 选用 M31 星系核附近 3 颗 12~14 mag 的暗星作为比较星, 在 1898、1909 和 1916 这三年内测量了 M31 核与这 3 颗比较星相对位置的变化, 并进而利用他人在 1836 年对 M31 核和其中一颗比较星的位置测定值, 使时间基线拓展至 80 年, 然而他始终没有探测到 M31 的自行。近 100 年来, 上述情况长期未有实质性的改变。原因在于 M31 的距离太过遥远, 如设其横向速度高达 $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 那么相应的年自行仅约为 $26 \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, 经典技术的观测精度无法达到这么小的值。

水脉泽的射电观测为测定河外星系自行提供了一条可能的途径。脉泽发射是一种窄线辐射, 发射频率位于射电波段, 可利用 VLBI 技术以很高的精度测定脉泽源在天球上角位置, 精度可达约 $10 \mu\text{as}$, 目前其他波段的地面观测尚不可能做到, 而即使有这样高的定位精度, 要取得足够精确的自行, 仍需进行 1 年以上的观测。理论上说, 这条途径可望测得约 1 Mpc 远处脉泽源母星系的距离。

2005 年, Brunthaler 等人^[27]利用 M33 两侧 2 个水脉泽源的 VLBA 观测, 通过同一目标运动角速度和线速度间的比较, 测定了该星系的运动学距离为 $(730 \pm 168) \text{ kpc}$ (与造父变星的测距结果相一致), 而它相对银河系的总运动速度为 $(190 \pm 59) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ (所用观测资料的历元差超过 1000 d)。2007 年, Brunthaler 等人^[28]由 M31 伴星系 IC 10 中一个水脉泽源的观测资料(历元差 4.3 a), 测得其自行为 $(-39 \pm 9, 31 \pm 8) \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, 相应的空间运动速度为 $(215 \pm 42) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

鉴于长期以来在 M31 中并没有搜索到水脉泽源, 2008 年 van der Marel 和 Guhathakurta^[12]提出, 可以用几种不同的统计方法来估计 M31 的横向速度矢。这项工作引入两个基本假设: (1) M31 伴星系的平均运动遵循 M31 的空间运动方式; (2) 位于 LG 外围的星系之平均运动遵循 LG 质心的运动方式。他们用到了 17 个伴星系的视向速度, 两个伴星系 (M33 和 IC10) 的自行, 以及 M31 转向半径 (turnaround radius) 附近 5 个伴星系的视向速度。据此得到 M31 的 4 个彼此独立、相互一致的日心横向速度值, 它们在 W (西) 和 N (北) 方向上的分量之加权平均值分别为 $\bar{v}_W = (-78 \pm 41) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $\bar{v}_N = (-38 \pm 34) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中的不确定

性约相当于自行精度 $10 \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, 而自行测定值的相对误差已大于 50%。不过作者当时认为, 即使再过 10 年, 要想从观测上来证实这一点还是会有难度。

2011 年, Darling^[29] 在 M31 中首次发现了 5 个水脉泽源, 并预期在接下来的 2~3 a 内, 利用现有观测设备有望测得 M31 的几何距离和整体自行, 但迄今尚未见到有相关结果发表, 也许还得待以时日。

最近, 天文学家利用 HST 观测资料, 在 M31 自行测定难题上已经取得了突破性进展。鉴于 HST 与地基天文观测设备相比有着诸多的优越性, 如高空间分辨率、低天光背景和超稳定性, 加之观测资料的时间跨度已长达 24 年 (其中优质资料亦已累积了 12 年), 对各类天体的高精度自行测定非常有利。事实上, 利用 HST 观测资料, 近期已经测得了银河系许多矮伴星系的自行, 且有不错的测定精度^[30-34]。

2012 年, Sohn 等人^[35] 首次发表了 M31 的自行测定结果, 发现目标星场有 3 个: M31 短轴附近的椭球子系星场, 沿长轴的外盘星场, 以及位于 M31 巨南星流上的星场, 时间基线为 5~7 a。这 3 个星场的自行观测值 (μ_W, μ_N) 分别为: $(-45.8, -37.6) \pm (16.5, 15.4) \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, $(-53.3, -10.4) \pm (24.6, 24.4) \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, $(-17.9, -35.7) \pm (27.8, 27.2) \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

Sohn 等人^[35] 估计, M31 绝对自行的最终测定精度约为 $\pm 12 \mu\text{as}\cdot\text{a}^{-1}$, 与脉泽源射电干涉技术所得的其他 LG 星系的自行测定精度相当。

在上述实测工作的基础上, van der Marel 等人^[14,36] 做了一些后续性讨论。他们推算出 M31 相对银河系的径向速度为 $V_R = (-109.3 \pm 4.4) \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$, 而横向速度仅为 $V_T = 17.0 \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ (在 1σ 置信区间内有 $V_T \leq 34.3 \text{km}\cdot\text{s}^{-1}$), 并得出 LG 的计时质量为 $M_{\text{LG}} = (4.27 \pm 0.53) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。

4 结果与讨论

表 1 给出了自 1959 年起所获得的关于 M_{LG} 的一些主要测定结果, 使用的方法, 以及相关的参考文献。计有 20 个 M_{LG} 测定值, 其中半数 (10 个) 系计时质量法取得, 6 个由零速度面法取得, 3 个为位力质量, 另有其他方法确定的 M_{LG} 值 1 个。近期的一些工作对确定 M_{LG} 的方法做了改进和细化, 如有的采用了基于最大似然原理的巴叶斯方法, 以同时确定包括 M_{LG} 和本地哈勃常数 H_0 在内的 6 个自由参数^[38]; 有的则考虑了大麦云对 M_{LG} 估值的影响^[39]。从时间上看, 大部分结果 (13 个) 发表于 21 世纪。另外, 2014 年 González 等人^[40] 给出的 $M_{\text{LG}} = 4.2_{-2.0}^{+3.4} \times 10^{12} M_{\odot}$ 因其内部精度太差而未收入表 1。

以 $10^{12} M_{\odot}$ 为单位, 由表所列数值可以看出:

(1) M_{LG} 不同测定值的大致范围为 $1.2 < M_{\text{LG}} < 5.6$ 。

(2) 由表 1 所列数值不难看出, 造成 M_{LG} 不同测定值之间有近 5 倍差异的, 实际上仅限于计时质量。如果进一步就计时质量、位力质量和零速度面质量分别考察 M_{LG} 测定值之间的差异, 可以得知不同作者所得出的位力质量之数值范围为 $2.5 < M_{\text{LG}} < 3.17$ (最大差异不到 1.3 倍), 以及不同零速度面质量值的数值范围为 $1.2 < M_{\text{LG}} < 3.6$, 而后者如果只考虑 21 世

表 1 M_{LG} 代表性测定结果一览

序号	发表年份	M_{LG}	方法	文献编号	备注
1	1959	≥ 1.8	计时质量	[8]	用了开普勒第三定律
2	1974	≈ 2.2	计时质量	[37]	取 $t_0 = 1.3 \times 10^{10}$ a
3	1977	> 1.3	计时质量	[2]	
4	1978	≈ 3.2	计时质量	[10]	
5	1981	3.6	零速度面法	[16]	取 $t_0 = 1.6 \times 10^{10}$ a
6	1982	3 ~ 6	计时质量	[6]	
7	1985	3.1 ± 0.4	计时质量	[11]	
8	2001	1.2 ± 0.2	零速度面法	[17]	
9	2002	2.6	位力质量	[15]	
10	2002	1.3 ± 0.3	零速度面法	[1]	
11	2006	1.29 ± 0.14	零速度面法	[18]	
12	2008	$5.58^{+0.85}_{-0.72}$	计时质量	[12]	
13	2008	5.27	计时质量	[13]	
14	2009	1.88 ± 0.18	零速度面法	[19]	
15	2010	2.8 ± 0.5	TME 质量	[21,20]	
16	2012	3.17 ± 0.57	位力质量	[14]	综合结果
17	2012	4.27 ± 0.53	计时质量	[14]	
18	2014	2.3 ± 0.7	零速度面法	[38]	
19	2014	2.5 ± 0.4	位力质量	[4]	
20	2016	$2.64^{+0.42}_{-0.38}$	计时质量	[39]	

纪的测定结果, 则更是收窄为 $1.2 < M_{LG} < 2.3$, 最大差异不到 2 倍。尽管借助计时质量法、位力质量法和零速度面法, 可以对 LG 给出 3 种相互独立的动力学质量估计, 但这 3 种方法又各有自身的不足之处。计时质量法引入了多个先验性假设, 如不考虑 LG 内其他星系对银河系-M31 双重系统的引力作用等, 这无疑会影响到计时质量测定值的可靠性^[12,22]。对此, 2009 年 Karachentsev 等人^[19]曾指出, 如考虑 M31 最大伴星系 M33 和银河系最大伴星系大麦云 (LMC) 对各自主星系的影响, 则计时质量将会从约 $5 \times 10^{12} M_{\odot}$ 减小为约 $3.9 \times 10^{12} M_{\odot}$ 。对于位力质量, 当其用作星系质量的统计估计量时, 它并不满足无偏性、有效性和一致性这 3 项基本要求, 且成员星系还有可能发生误判^[6,41]。至于零速度面法, 目前的工作能否充分满足 2.2 节中提及的 3 个前提条件^[16,24], 仍需要通过取得更大的星系样本来予以认证。

(3) 为进一步探讨目前所得 M_{LG} 测定值之可信程度如何, 由表 1 所列数据就上述 3 类不同方法给出的 M_{LG} 值分别取简单平均, 可以有: $M_{LG1} = 3.4 \times 10^{12} M_{\odot}$ (计时推理法), $M_{LG2} = 1.9 \times 10^{12} M_{\odot}$ (零速度面质量), 以及 $M_{LG3} = 2.8 \times 10^{12} M_{\odot}$ (位力质量), 可见彼此间的最大差异已不到 2 倍。如对上述 3 个测定值取总平均, 则有 $M_{LG} = (2.73 \pm 0.44) \times 10^{12} M_{\odot}$, 这一数值或可取作为目前所知 LG 之动力学质量的最合理估值, 它与最近 3 年内由上述三种方法所确定的 M_{LG} 值符合得相当好 (见表 1), 而 Karachentsev 等人^[19]在 2009 年的一项工作中曾认为, 由这 3 种方法推算出的 M_{LG} 之合理估值可取为 $M_{LG} = (1.7 \sim 2.1) \times 10^{12} M_{\odot}$ 。

作为比较,不妨观察一下银河系质量和 M31 质量的测定结果。

银河系的动力学质量 M_{MW} 可通过多种途径来加以推算,如利用外晕天体的运动学资料、伴星系(或者球状星团)的潮汐半径、逃逸速度,以及计时推理法等^[42]。尽管数十年来人们发表了众多的结果,但在各个银河系参数中, M_{MW} 的测定精度当属最低之列。具体表现如:(1)多数测定结果都有较大的统计不确定性,典型的如 $M_{\text{MW}} = 1.2^{+1.8}_{-0.5} \times 10^{12} M_{\odot}$ ^[43] 和 $M_{\text{MW}} = 1.9^{+3.6}_{-1.7} \times 10^{12} M_{\odot}$ ^[44] 等,不确定性甚至大于 M_{MW} 数值本身,且这一状况与 M_{MW} 的测定方法基本无关。(2)不同 M_{MW} 测定值的差异很大,最小 $0.2 \times 10^{12} M_{\odot}$ ^[45],最大 $3.15 \times 10^{12} M_{\odot}$ ^[46],两者竟相差逾 15 倍;即使用的是同一种方法,不同作者所得出的 M_{MW} 值之最大差异仍可达 2~8 倍^[47-50]。

河外星系的动力学质量可以由其伴天体(伴星系、球状星团、晕族天体等)的运动学观测资料,通过多种途径来加以估测,如自转质量、位力质量、轨道质量、投影质量、TMS 质量和星流法质量等^[21]。在诸多已测得动力学质量的河外星系中,以 M31 的相关工作做得最多。与银河系的情况相类似, M_{M31} 测定值的可信程度也不甚理想,具体表现如:(1)一些测定结果有相当大的统计不确定性,少数 M_{M31} 值的不确定性接近甚至大于测定值^[51,52]。(2)不同作者所得 M_{M31} 测定值的差异很大,最小 $0.9 \times 10^{11} M_{\odot}$,最大 $21.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ ^[53,54],两者相差逾 20 倍;不过,如限于最近 10 年内所发表的结果,不同 M_{M31} 测定值的差异则减小为不到 4 倍^[55,56]。

综合以上讨论可以看出,本星系群 LG 之动力学质量 M_{LG} 测定值的相对精度,略好于 M_{MW} 和 M_{M31} 测定值的相对精度。

5 结束语

就目前来看,本星系群 LG 之动力学质量 M_{LG} ,主要通过 3 种相互独立的途径(计时质量、位力质量和零速度面质量)来加以估测,而不同作者采用不同方法和不同观测资料(目标星系的视向速度、距离以及还可能有自行)所得 M_{LG} 测定值之间的差异已不到 2 倍,其平均值的相对精度约为 16%。对于 LG 这样一个边界并不严格确定的庞大星系集团,此类精度可谓相当不错,甚至已好于单个星系(如银河系和 M31)动力学质量的估测精度。

另一方面,相对而言人们对 LG 内部质量分布的认识却非常有限。例如,2014 年 Diaz 等人^[4]指出,通常设定 $M_{\text{LG}} \approx M_{\text{MW}} + M_{\text{M31}}$,这意味着 LG 的质量几乎全部位于它的 2 个最大成员——银河系和 M31 之内,而不是在更大尺度上作弥散状分布,或者以某种背景介质的形式出现,而 LG 的外圈则近乎空无一物。然而,这一假设与 Λ CDM 模拟的结果完全不相符,后者认为吸积之遗留物会在 LG 内生成某种大质量的背景介质^[57,58]。尽管有关 LG 成员星系的观测资料颇为丰富,但并未找到存在这种背景介质的必要观测约束。可见,对于 LG 的动力学研究,除了进一步提高测定精度外,探究 LG 内部的物质分布细节乃是一个无法回避的重要课题。

参考文献:

- [1] Karachentsev I D, Sharina M E, Makarov D I, et al. *A&A*, 2002, 389: 812
- [2] Lynden-Bell D, Lin D N C. *MNRAS*, 1977, 181: 37
- [3] Loeb A, Reid M J, Brunthaler A, et al. *ApJ*, 2005, 633: 894
- [4] Diaz J D, Kuposov S E, Irwin M, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 1688
- [5] McConnachie A W. *AJ*, 2012, 144: 4
- [6] Einasto J, Lynden-Bell D. *MNRAS*, 1982, 199: 67
- [7] van der Marel R P. *IAUS*, 2014, 311: 1
- [8] Kahn F D, Waltjer L. *ApJ*, 1959, 130: 705
- [9] Li Y S, White S D M. *MNRAS*, 2008, 384: 1459
- [10] Gott III J R, Thuan T X. *ApJ*, 1978, 223: 426
- [11] Mishra R. *MNRAS*, 1985, 212: 163
- [12] van der Marel R P, Guhathakurta P. *ApJ*, 2008, 678: 187
- [13] Li Y S, White S D M. *MNRAS*, 2008, 384: 1459
- [14] van der Marel R P, Fardal M, Besla G, et al. *ApJ*, 2012, 753: 8
- [15] Klypin A, Zhao H S, Somerville R S. *ApJ*, 2002, 573: 597
- [16] Lynden-Bell D. *Obs*, 1981, 101: 111
- [17] Karachentsev I D, Makarov D I. *Astrophysics*, 2001, 44: 1
- [18] Karachentsev I D, Kashibadze O G. *Astrophysics*, 2006, 49: 3
- [19] Karachentsev I D, Kashibadze O G, Makarov D I, et al. *MNRAS*, 2009, 393: 1265
- [20] Watkins L L, Evans N W, An J H. *MNRAS*, 2010, 406: 264
- [21] 赵君亮. *天文学进展*, 2015, 33: 420
- [22] Kroecker T L, Carlberg R G. *ApJ*, 1991, 376: 1
- [23] Jarosik N, Bennett C L, Dunkley J, et al. *ApJS*, 2011, 192: 1
- [24] Sadage A. *ApJ*, 1986, 307: 1
- [25] Barnard E E. *AJ*, 1917, 30: 175
- [26] van der Marel R P. *IAUS*, 2015, 311: 1
- [27] Brunthaler A, Reid M J, Falcke H, et al. *Science*, 2005, 307: 1440
- [28] Brunthaler A, Reid M J, Falcke H, et al. *A&A*, 2007, 462: 101
- [29] Darling J. *ApJL*, 2011, 732: L2
- [30] Piatek S, Pryor C, Olszewski E W, et al. *AJ*, 2003, 126: 2346
- [31] Piatek S, Pryor C, Bristow P, et al. *AJ*, 2005, 130: 95
- [32] Piatek S, Pryor C, Bristow P, et al. *AJ*, 2006, 131: 1445
- [33] Piatek S, Pryor C, Bristow P, et al. *AJ*, 2007, 133: 818
- [34] Lepine S, Koch A, Rich R M et al. *ApJ*, 2011, 741: 100
- [35] Sohn S T, Anderson J, van der Marel R P. *ApJ*, 2012, 753: 7
- [36] van der Marel R P, Besla G, Cox T J, et al. *ApJ*, 2012, 753: 9
- [37] Gunn J E. *CoASP*, 1974, 6: 7
- [38] Peñarrubia J, Ma Y Z, Walker M G, et al. *MNRAS*, 2014, 443: 2204
- [39] Peñarrubia J, Gómez F A, Besla G, et al. *MNRAS*, 2016, 456: L54
- [40] González R E, Kravtsov A V, Gnedin N Y. *ApJ*, 2014, 793: 91
- [41] Bahcall J N, Tremaine S. *ApJ*, 1981, 244: 805
- [42] 赵君亮. *天文学进展*, 2015, 33: 175
- [43] Bettaglia G, Helmi A, Morrison H et al. *MNRAS*, 2005, 364: 433
- [44] Wilkinson M I, Evans N W. *MNRAS*, 1999, 310: 645
- [45] Burbidge G R. *ApJL*, 1975, 196: L7
- [46] Sohn S T, Besla G, van der Marel R P, et al. *ApJ*, 2013, 768: 139
- [47] Ostriker J P, Peebles P J E. *ApJ*, 1973, 186: 467

- [48] Miyamoto M, Satoh C, Ohashi M. *A&A*, 1980, 90: 215
- [49] Frenk C S, White S D M. *MNRAS*, 1980, 193: 295
- [50] Olszewski E W, Peterson R C, Aaronson M. *ApJL*, 1986, 302: L450
- [51] Evans N W, Wilkinson M I. *ASPC*, 2000, 239: 299
- [52] Tollerud E J, Beaton R L, Geha M C, et al. *ApJ*, 2012, 752: 45
- [53] van den Burgh S. *PASP*, 1981, 93: 428
- [54] Côté P, Mateo M, Sargent W L W, et al. *ApJ*, 2000, 537: L91
- [55] Lee M G, Hwang H S, Kim S C, et al. *ApJ*, 2008, 674: 886
- [56] Fardal M A, Weinberg M D, Babul A, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 2779
- [57] Cox T J, Leob A. *MNRAS*, 2008, 386: 461
- [58] Gonzalez R E, Kravtsov A V, Gnedin N Y. *ApJ*, 2013, 770: 96

Estimates of the Dynamical Mass of the Local Group of Galaxies

ZHAO Jun-liang^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Normal University, Shanghai 200233, China)

Abstract: The Milky Way (MW) is a member of a small group of galaxies called as the Local Group (LG). The LG is dominated by its two largest members, the MW and the Andromeda galaxy (M31). The other members can be separated into one of two categories: dwarf satellites accompanying the MW or M31, and the dozen or so independent galaxies sprinkled in space up to ~ 1.5 Mpc away. This group presents a unique example where sufficient data are available to derive its mass and dynamics, which has been the topic of many previous studies.

Since 1959 the dynamical mass of the LG has been estimated in different ways, among which three independent methods have been most frequently used: the timing argument, the zero velocity surface and the virial theorem. The timing argument is to use the relative motion of MW and M31 to estimate the total mass of the LG. The methods of zero velocity surface and virial theorem use kinematic data of all satellite galaxies to estimate the LG mass. Furthermore, in the zero velocity surface method the mass of the LG is determined from the external Hubble velocity field surrounding the group, and the virial mass is derived from the internal motions of member galaxies of the LG.

In order to estimate the dynamical mass of the LG by using the timing argument, one must know the three dimensional kinematical data of M31 with respect to the MW. While the light-of-sight velocity of M31 is well known from Doppler measurements, determining its proper motions has been elusive for some half century or longer, because M31 is very far

away from us. Recently, the first proper motion measurements were obtained with the HST equipments and have been used to derive the mass of the LG.

The major results for the mass of the LG, M_{LG} , obtained from different approaches since 1959, are collected in Table 1 and briefly discussed. It can be seen from the table that the range of M_{LG} is $1.2 < M_{\text{LG}} < 5.6$, discrepancies being quite big. However, the range of M_{LG} published in the recent years (2009—2014) has been obviously narrowed to $1.88 < M_{\text{LG}} < 4.27$, from which an optimum estimator $M_{\text{LG}} = (2.73 \pm 0.44) \times 10^{12} M_{\odot}$ can be found.

Key words: Local Group; Milky Way Galaxy; Andromeda galaxy (M31); radial velocity; transverse velocity; dynamical mass