

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.04.02

# 河外星系动力学质量的多途径测定

赵君亮<sup>1,2</sup>

(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:** 利用伴天体 (含伴星系、球状星团、晕族天体等) 的运动学观测资料, 可通过多种方法估测主星系的质量 (动力学质量), 如自转质量、位力质量、轨道质量、投影质量、示踪质量以及星流法质量等。在诸多已测得动力学质量的河外星系中, 以仙女星系 (M31) 的相关工作为最多, 对此做了简要的介绍和讨论。

**关键词:** 河外星系; 动力学质量; 伴天体; 视向速度; 暗晕; 仙女星系

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

河外星系质量的测定, 是星系天文学的一项重要基础性工作, 与星系内的物质分布、星系的运动学状态和动力学演化等研究领域紧密相关。鉴于由非重子暗物质构成的大质量暗晕得以确认<sup>[1]</sup>, 人们对星系质量的认知发生了质的变化——包括暗物质晕在内的星系的总质量应远大于星系的光度质量 (由光度和质光比推算出的星系质量之估计值), 而暗晕的范围则可包容距目标星系最远的球状星团, 甚至延伸到它们的近邻矮伴星系。因此, 星系质量的测定, 对于探讨星系中的暗物质、暗物质分布以及星系间的相互作用等课题有着重要意义。

继 1922 年 Kapteyn<sup>[2]</sup> 综合利用恒星计数结果以及恒星的三维运动学资料, 首次给出银河系质量的估值为  $M_{MW} = (0.6 \sim 1.0) \times 10^{11} M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  为太阳质量) 之后, 下一个为天文界所关注、并试图通过运动学资料来确定其总质量——动力学质量 (亦可称运动学质量) 的河外星系当推仙女星系 (M31)。早在 20 世纪的 30—50 年代间, 天文学家已多次利用自转曲线来估算 M31 的质量  $M_A$ <sup>[3-6]</sup>, 1960 年 Brandt<sup>[7]</sup> 对此做了综述性讨论, 并给出  $M_A = (3.5 \sim 4.0) \times 10^{11} M_{\odot}$ 。嗣后, 直至最近, 随着运动学观测资料的不断累积, 包括自转质量在内的多种方法被广泛用于估测 M31 的质量, 取得了为数众多的  $M_A$  值测定结果<sup>[8-32]</sup>。

收稿日期: 2015-01-05; 修回日期: 2015-04-28

资助项目: 国家自然科学基金 (11373054), 中国科学院战略性先导科技专项 (XDB09010100)

通讯作者: 赵君亮, jlzha@shao.ac.cn

除 M31 这个最近的巨旋涡星系外, 人们也通过不同途径和不同的观测资料, 测定了若干不同类型河外星系 (大多为本星系群成员中的盘状星系) 的运动学质量, 如 M87<sup>[33-36]</sup>、NGC5084<sup>[37,38]</sup>、NGC1961<sup>[39,40]</sup>、NGC3992<sup>[41-43]</sup>、NGC5128<sup>[44,45]</sup>、M81<sup>[46]</sup>、M101<sup>[11]</sup> 以及 3C273<sup>[11]</sup> 等。不过, 总体上看这方面的工作做得并不多, 究其原因应该与取得足够多的有用观测资料之难度有关——随着目标星系距离的增大, 取得足够精度的运动学资料会变得越来越困难。

同样是因为距离远的关系, 确定河外星系质量所需的示踪天体, 应该比用于确定银河系质量的示踪天体有更高的光度。除自转质量外, 对于前者迄今应用最为广泛的示踪天体仅限于目标星系周围的矮伴星系<sup>[11,15-18,27,28,30,32]</sup> 和外晕球状星团<sup>[9,12,14,18,19,25,30,32]</sup>, 少数工作也用到了行星状星云<sup>[15,18]</sup>; 而用于确定银河系质量的示踪天体还可以有水平支场星<sup>[47,48]</sup>、天琴 RR 型变星<sup>[49-51]</sup>、红巨星<sup>[48-50]</sup> 等其他类别的晕族天体。

就目前所能取得的观测资料 (主要是目标天体的视向速度和距离) 而言, 河外星系的质量可以通过不同的途径来加以测定。除上述自转质量外, 还有位力质量、轨道质量、投影质量、示踪质量, 以及利用目标星系周边的星流次结构和计时推理法 (timing argument) 等来推算星系的质量。下面将会看到, 即使是相关工作做得最多、最为细致的近距离大星系 M31, 其质量  $M_A$  的不同测定值迄今仍有相当大的差异, 因而常被称为估值 (estimator)。可见, 为提高星系质量估值的可靠性, 通过相对独立的多种方法来确定同一目标星系的质量无疑是很有必要的。

本文拟对用于确定星系质量的一些主要实测方法进行简要的介绍。在已测得动力学质量的诸多河外星系中, 着重讨论仙女星系 M31 质量的测定结果, 并在此基础上简单展望星系质量测定工作的未来发展趋势。

## 2 主要方法综述

从历史上看, 最早用于河外星系质量估测的途径当推自转质量<sup>[3-6]</sup>。1974 年, Hartwick 和 Sargent<sup>[9]</sup> 测定了 M31 的位力质量。1981 年, Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 引入了投影质量的概念。21 世纪初, 相继提出了轨道质量<sup>[15]</sup>、示踪质量<sup>[19]</sup>、星流法质量<sup>[20]</sup> 以及计时质量<sup>[24]</sup> 等多种确定星系质量的方法。下文将择要予以简要介绍。

### 2.1 自转质量

所谓自转质量 (rotation mass) 是指由自转曲线推算出的星系质量, 可以借助开普勒模型加以估算, 故又称开普勒质量。

1974 年 Einasto 等人<sup>[52]</sup> 指出, 一个球对称星系的质量可由下式估算:

$$M_{\text{rot}}(R) = RV_c(R)^2/G, \quad (1)$$

这里  $R$  为自转曲线平坦部分最远端的中心距,  $M_{\text{rot}}(R)$  是  $R$  范围内星系的自转质量,  $V_c(R)$  是中心距  $R$  处天体绕星系中心的转动速度,  $G$  为引力常数。式 (1) 如用于非球对称系统, 可

引起  $M_{\text{rot}}(R)$  有 10% 的误差<sup>[52]</sup>，这时自转质量往往估计过高，1975 年 Burbidge<sup>[53]</sup> 的工作说明了这一点，他把式 (1) 修订为：

$$M_{\text{rot}}(R) = kRV_c^2/G \quad , \quad (2)$$

$k$  为一个接近 1 的常数，表征质量分布的扁平程度，当星系质量呈球对称分布时有最大值  $k = 1$ <sup>[54]</sup>。

以 M31 为例，鉴于受观测资料所限，自转质量所涉及的星系半径 (中心距) 最大仅约为 35 kpc<sup>[10,22,26]</sup>，远小于其他方法适用的中心距范围，而自转质量通常小于包括暗晕在内的星系的总质量。

## 2.2 位力质量

考虑一个星系周围的试验粒子 (如球状星团等) 系统，若把该星系看作为点质量，并设试验粒子为球对称分布，则星系的位力质量 (virial mass) 为<sup>[9]</sup>：

$$M_{\text{VT}} = \frac{3\sigma^2}{G\langle 1/r \rangle} \quad , \quad (3)$$

式中  $r$  是粒子到星系中心的三维距离， $\sigma$  为样本粒子的观测速度弥散度。

1981 年，Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 给出的另一种形式位力质量计算公式是

$$M_{\text{VT}} = \frac{3\pi\langle v_r^2 \rangle}{2G\langle 1/R \rangle} \quad , \quad (4)$$

式中  $v_r$  为观测视向速度，而  $R$  是试验粒子到星系的投影距离。如设  $v$  为三维空间速度，则有  $\langle v^2 \rangle = 3\langle v_r^2 \rangle$ ，而  $\langle 1/r \rangle = (2/\pi)\langle 1/R \rangle$ 。

Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 曾较为详细地讨论了用  $M_{\text{VT}}$  估计星系总质量  $M$  时所存在的问题： $M_{\text{VT}}$  作为  $M$  的统计估计量，并不满足统计学上的无偏性、有效性和一致性这 3 项基本要求。Carignan 等人<sup>[37]</sup> 则认为，当粒子数  $N$  为有限值时， $M_{\text{VT}}$  并不必然等于总质量  $M$ ；而当粒子数  $N \rightarrow \infty$  时， $M_{\text{VT}}$  也不收敛于  $M$ 。近期，An 和 Evans<sup>[55]</sup> 从理论上对位力质量计算公式做了修正，但尚未见之实用。

## 2.3 投影质量和示踪质量

为规避位力质量的上述缺陷，Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 认为可以引入如下投影质量 (projected mass)，有人亦称之为 PME 质量 (projected mass estimator)<sup>[24]</sup>：

$$M_{\text{P}} = v_r^2 R/G \quad , \quad (5)$$

式中  $v_r$  为观测视向速度， $R$  为试验粒子与星系之间的投影距离， $M_{\text{P}}$  与星系总质量  $M$  具有同样的量纲，两者仅相差一个合适的、因投影效应引起的乘因子。他们通过动力学方法导出  $M_{\text{P}}$  的期望值为：

$$\langle M_{\text{P}} \rangle = \frac{\pi M}{32} (3 - 2\langle e^2 \rangle) \quad , \quad (6)$$

这里  $e$  为试验粒子的轨道偏心率。对于纯圆轨道有  $\langle e^2 \rangle = 0$ <sup>[56]</sup>, 对纯径向轨道有  $\langle e^2 \rangle = 1$ <sup>[57]</sup>, 而对于各向同性轨道有  $\langle e^2 \rangle = 1/2$ <sup>[11]</sup>。据此, Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 给出投影质量的实用计算公式是:

$$M_{\text{Proj}} = \frac{C_P}{GN} \sum_{i=1}^N v_{\text{los}i}^2 R_i, \quad (7)$$

式中  $v_{\text{los}i}$  为第  $i$  示踪天体 (相对系统平均速度) 之视向速度,  $R_i$  是该天体与目标星系间的投影距离<sup>[19]</sup>。对应各向同性速度分布和径向轨道这两种情况, 投影参数分别取  $C_{P1} = 16/\pi$  和  $C_{P2} = 32/\pi$ ,  $N$  是试验粒子的个数。他们还认为, 对于任何形式的轨道偏心率分布, 可一概采用  $C_P = 24/\pi$  作为推算星系投影质量的合理估值。

投影质量的概念被后人广为应用并加以改进<sup>[12-14,19,25,27,30,32,59]</sup>, 除 M31 外, 还用于其他一些河外星系<sup>[11,37,40,41,60]</sup>。顺便指出, 上述投影质量的基本思路亦可用于估算双重星系的总质量<sup>[38,43,58]</sup>。

1985 年, Heisler 等人<sup>[59]</sup> 把投影质量的适用对象, 从绕点质量作轨道运动的试验粒子拓展到星系群, 这时式 (7) 的形式仍保持不变, 而投影参数分别取  $C_{P1} = 32/\pi$  和  $C_{P2} = 64/\pi$ <sup>[19,59]</sup>。实际上, 投影参数  $C_P$  不仅取决于示踪天体的径向分布和整个系统的各向异性程度, 而且与系统的引力势相关。据此, 2003 年 Evans 等人<sup>[19]</sup> 在合理设定势一密度对的前提下, 进一步细化了参数  $C_P$  表达形式, 并在此基础上引入了示踪质量, 亦即 TME 质量 (Tracer Mass Estimator), 而这一概念随即为近期的一些工作用来估测 M31 的质量<sup>[25,27,30,32]</sup>。

## 2.4 轨道质量

所谓轨道质量 (orbital mass), 是指通过对伴天体运动学状态的分析所推算出的星系质量<sup>[38,43]</sup>。例如, Côté 等人<sup>[16]</sup> 给出 3 种情况下星系轨道质量  $M_{\text{or}}$  的计算公式:

(1) 设伴天体轨道为各向同性速度分布, 有  $M_{\text{or}} = 3v_1^2 r/G$ , 这里  $r$  是伴天体到目标星系的距离,  $v_1 = v_A \cos \Omega_A$  是  $v_A$  在目标星系—太阳方向上的分量, 而  $v_A$  是在目标星系位置上所观测到的伴天体的视向速度, 可由日心径向速度  $v_r$  和投影角  $\Omega_A$  来算得<sup>[16]</sup>。

(2) 伴天体运动轨道为纯径向轨道时有  $M_{\text{or}} = 2v_A^2 r^3/G(r^2 - R^2)$ , 式中  $R$  是伴天体到目标星系的投影距离。

(3) 伴天体运动轨道为极向圆轨道时则有  $M_{\text{or}} = v_A^2 r^3/GR^2$ 。

以上 3 种情况都设定把目标星系看作为点质量, 这对于  $r$  较大的远距离伴天体颇为合理, 不过对位于星系晕最内区的伴天体 ( $r$  很小) 则是无效的。

总的来看, 利用轨道质量来估测星系总质量方面的工作做得并不多。

## 2.5 星流法

旋涡星系暗物质晕的总体特征 (如质量、形状、范围等) 为理解暗物质粒子的性质以及研究星系的演化和形态提供了至关重要的线索<sup>[61]</sup>。一些星系的暗晕或部分暗晕是在星系并合过程中形成的, 星流则是这一过程的可观测到的残余结构。作为一类示踪天体, 它反映了其母天体的运动轨迹, 可用以探索星系晕的形成, 以及认识母星系暗晕之质量及其大尺度分

布<sup>[20]</sup>。随着观测资料数量的累积和精度的提高,使星流用于估计母星系质量成为可能。根据最大似然原理,这一过程大体上可分为以下三步<sup>[31]</sup>:

(1) 选取合适的引力势模型(即质量模型),如开普勒势、对数势、NFW 势等。不过, Iбата等人<sup>[20]</sup>在 2004 年的一项工作中指出,最终导出的星系质量值对所采用的质量模型并不十分敏感。

(2) 组成相空间中的似然函数,其一般形式为  $L(D/M)$ , 这里  $D$  为星流的观测参数,如中心位置、距离、密度、速度等,而  $M$  为相应的模型参数。当然,更常用的做法是取函数  $L$  的对数形式  $L(D/M) = \ln(L)$ 。似然函数中的各项均以  $\chi^2$  的形式出现,有  $L_i \propto \exp[-\sum_i (D_i - M_i)^2 / (2\sigma_i^2)]$ , 而  $L$  的常用形式是  $L = -\chi^2/2$ , 其中  $\chi^2 = \sum_i (D_i - M_i)^2 / \sigma_i^2$ , 下标  $i$  对应星流中的第  $i$  个观测点(恒星)。

(3) 最后,按条件  $L = \max$  确定模型参数的最大似然估计值,其包括了母星系的质量。

鉴于观测资料所限,目前这条途径仅见之于 M31,而尽管 M31 的星流次结构颇为复杂,但作为示踪天体以确定其质量的也只是它的南巨星流 GSS<sup>[62-64]</sup>。

### 3 仙女星系 M31 的质量

M31 可算是动力学质量测定工作做得最多、且所采用方法也最多的河外星系,迄今至少已有约 75 年的历史。

#### 3.1 概况

M31 是最近的大质量旋涡星系,日心距仅约为 780 kpc<sup>[65]</sup>,现代观测设备有能力把其中的星团或较密集星场分解成单颗恒星。M31 周围有超过 500 个球状星团<sup>[25,66]</sup>,数十个伴星系<sup>[27]</sup>,以及多个晕族行星状星云<sup>[15,18,67]</sup>。另外, M31 所占的天区范围相当大,作为一个典型的旋涡星系,它的晕结构之整体大尺度图像要比银河系清晰得多<sup>[32]</sup>。以上情况对于测定星系的动力学质量十分有利。

为估测 M31 的质量,人们用到了多种示踪天体,如伴星系<sup>[15-18,38,57]</sup>、球状星团<sup>[9,12-15,18,60]</sup>、行星状星云<sup>[15,18,67]</sup>以及星流<sup>[20,21,31,61,68]</sup>等,并采用了多种方法,如自转质量<sup>[7,8,10,22]</sup>、位力质量<sup>[9,26,28]</sup>、投影质量<sup>[12-14,25]</sup>、示踪质量<sup>[19,25,27,30,32]</sup>、轨道质量<sup>[15-18]</sup>以及星流法<sup>[20,21,23,31]</sup>等。

#### 3.2 结果与讨论

表 1 列出了自 1960 年以来所得到的一些代表性  $M_A$  测定值,共涉及 22 篇文献、27 个测定结果,其中自转质量 4 个(约占 15%),位力质量 2 个(约占 7%),轨道质量 5 个(约占 19%),投影质量 7 个(约占 26%),示踪质量 5 个(约占 19%),星流法质量 4 个(约占 15%)。

由表 1 的列数值可以看出:

(1)  $M_A$  的一些测定结果有相当大的统计不确定性,典型的如文献 [15]、[18] (序号 9) 给出的轨道质量  $M_A = 12.3_{-6}^{+18}$ , 以及文献 [28] (序号 19) 给出的位力质量  $M_A = 12_{-7}^{+9}$ , 前者的不确定性甚至大于测定值。

(2) 不同  $M_A$  测定值的差异很大,最小  $0.9 \times 10^{11} M_\odot$ , 最大  $21.5 \times 10^{11} M_\odot$ , 两者相差逾

表 1 仙女星系 M31 质量测定值一览表

序号	方法	最大中心距 /kpc	质量 / $10^{11}M_{\odot}$	示踪天体	备注	文献号
1	自转质量		3.5~4.0	H I 谱线等	综合结果	[7]
2	自转质量	24	1.85±0.1	H II 区		[8]
3	位力质量	17	3.4±1.4	GC	中心距最大的星团样本	[9]
4	自转质量	30.5	2.5	H I 谱线		[10]
5	投影质量	100	10 (2~3)	伴星系	括号内数字为误差因子	[11]
6	投影质量	6.5	0.9±0.2	43 个 GC	取 $C_p = 24/\pi$	[12]
		21.5	2.4±1.2	6 个 GC		
7	投影质量	16	3.2	81 个 GC		[13]
		26	12			
8	投影质量等	30	≈ 5 ~ 8	176 个 GC		[14]
9	轨道质量	≈ 90	12.3 $^{+1.8}_{-0.6}$	伴星系、GC、PN		[15,18]
10	轨道质量	>100	7.9±0.5	伴星系	各向同性轨道	[16]
			21.5±3.8		纯径向轨道	
			3.7±0.4		极向圆轨道	
11	轨道质量	≈ 90	≈ 7 ~ 10	伴星系		[17]
12	示踪质量	≥ 100	≈ 12	GC、伴星系		[19]
13	星流法	125	7.5 $^{+2.5}_{-1.3}$	南巨星流		[20]
14	星流法	145	6.5±1.6	南巨星流		[21]
15	自转质量	≈ 35	3.4	H I 谱线		[22]
16	星流法	125	7.4±1.2	南巨星流		[23]
17	投影质量	≈ 55	19.2 $^{+1.4}_{-1.3}$	504 个 GC		[25]
	示踪质量	100	5.5 $^{+0.4}_{-0.3}$			
18	示踪质量	300	14±4	23 个伴星系	各向同性轨道	[27]
19	位力质量	139	12 $^{+9}_{-7}$	15 个伴星系		[28]
20	示踪质量	200	12~15	50 个 GC		[30]
21	星流法	200	19.5 $^{+5.6}_{-4.0}$	南巨星流	位力质量	[31]
22	示踪质量	200	(12~16)±2	78 个 GC		[32]

注: GC——球状星团, PN——行星状星云。

20 倍。不过,在最近 10 年内这一差异已减小到 3.8 倍左右,这显然与观测精度的提高、样本容量增大、方法改进以及示踪天体最大中心距 ( $R_{\max}$ ) 趋于接近等因素有关。

(3) 从逻辑上说  $M_A$  测定值的大小与  $R_{\max}$  应该表现为统计正相关,实测结果大体上符合这一规律。

(4) 考虑到上述  $R_{\max}$  这一因素,同一种方法所得出的  $M_A$  测定值之差异不算太大,有关结果列于表 2,表中  $M_{\min}$  和  $M_{\max}$  分别是同类测定方法中  $M_A$  测定结果的极小值和极大值。唯一例外是文献 [16] 给出的结果,不过这只是起因于对示踪天体轨道运动特征的设定有所不同。表中最后一行“综合结果”取自同一列中的最小  $M_{\min}$  或最大  $M_{\max}$  及其相应的中心距。



表 2 不同方法所得  $M_A$  测定值的范围

方法	$M_{\min}$ / $10^{11}M_{\odot}$	中心距 /kpc	文献编号	$M_{\max}$ / $10^{11}M_{\odot}$	中心距 /kpc	文献编号
自转质量	1.85	24	[8]	3.5~4.0		[7]
轨道质量	3.7	>100	[16]	21.5	>100	[16]
投影质量	0.9	6.5	[12]	19.2	$\approx 55$	[25]
示踪质量	5.5	100	[25]	14	300	[27]
星流法质量	6.5	145	[21]	19.5	200	[31]
综合结果	0.9	6.5	[12]	21.5	>100	[16]

(5) 最近 10 年中所测得、且明确给出  $R_{\max} \geq 100$  kpc 的  $M_A$  值共计有 8 个, 以  $10^{11}M_{\odot}$  为单位的具体数值分别为 7.5、6.5、7.4、5.5 (前 5 年) 和 14.4、13.5、19.5、14 (后 5 年), 可见  $M_A$  值渐而增大的趋势颇为明显。如取最近 10 年的平均值, 有  $M_{A10} = 11 \times 10^{11}M_{\odot}$ ; 如取最近 5 年的平均值, 则有  $M_{A5} = 15 \times 10^{11}M_{\odot}$ 。综上所述, 也许可以取  $M_A = (11 \sim 15) \times 10^{11}M_{\odot}$  作为仙女星系动力学质量目前之最可能估值。

(6) 最后, 从方法的应用时段上看, 20 世纪内主要用的是自转质量<sup>[7,8,10]</sup>、投影质量<sup>[11,14]</sup>和轨道质量<sup>[15-18]</sup>, 其中自转质量因  $R_{\max} \leq 35$  kpc, 对暗晕质量的确定并无多大贡献。到 21 世纪, 测定  $M_A$  的主流途径转为示踪质量<sup>[19,25,27,30,32]</sup>和星流法<sup>[20,21,23,31]</sup>, 也有人用到位力质量<sup>[26,28]</sup>和计时质量<sup>[24,29]</sup>。

### 3.3 银河系和仙女星系的关系

本星系群中两个最大的星系, 即仙女星系 M31 和银河系, 哪个质量更大? 这是一个迄今尚未完全明确的问题。

长期以来, 直至 20 世纪末, 大多数人主张 M31 是本星系群中质量最大的成员<sup>[69-72]</sup>, 当时的理由是 M31 的自转曲线渐近值比银河系高出 10%<sup>[73]</sup>, 前者球状星团的个数要比后者多一倍以上<sup>[74]</sup>, M31 星系盘的标长比银河系来得大<sup>[75]</sup>, 它的 B 波段正向绝对星等 ( $-21.1 \pm 0.4$  mag) 亮于银河系之相应值 ( $-20.5 \pm 0.5$  mag)<sup>[70]</sup>。然而, 期间也存在与之相反的意见, 如 Walterbos 和 Schwing<sup>[76]</sup>认为银河系的红外光度要比 M31 高得多, Hodge<sup>[70]</sup>则指出银河系中气态氢的质量比 M31 来得多。

2000 年, Evans 和 Wilkinson<sup>[15]</sup>指出, 根据他们的估测结果, M31 的总质量 ( $M_A = 12.3_{-6}^{+18} \times 10^{11} M_{\odot}$ ) 很可能小于银河系的质量 ( $M_{MW} = 19_{-17}^{+36} \times 10^{11} M_{\odot}$ )<sup>[77]</sup>, 并认为这一结果令人感到惊讶。不过, 如果注意到这两个质量值的不确定性明显大于质量值本身 (特别是  $M_{MW}$ ), 把上述论点作为结论乃是颇为勉强的。

进入 21 世纪后, 关于  $M_A$  和  $M_{MW}$  以哪个为大的不同观点依然存在。一些工作认为应该有  $M_A < M_{MW}$ <sup>[17,38]</sup>, 如 2010 年 Watkins 等人<sup>[57]</sup>明确给出在  $R_{\max} \leq 300$  kpc 范围内,  $M_A = (15 \pm 4) \times 10^{11} M_{\odot}$ , 而  $M_{MW} = (27 \pm 5) \times 10^{11} M_{\odot}$ ; 另一些研究则表明  $M_A > M_{MW}$ , 即  $M_A/M_{MW} > 1$ <sup>[78,79]</sup>。近期, Giovannini 和 Baiesi<sup>[80]</sup>通过对这两个星系间潮汐相互作用的分析, 甚至得出  $M_A/M_{MW} = 2 \sim 3$ , 并据此认为 M31 暗晕的范围和质量很可能

比银河系来得大。

总之, 考虑到  $M_A$  和  $M_{MW}$  测定结果都有较大的不确定性, 本星系群中究竟谁是“老大”, 今日恐怕还不能给出明确的结论性意见。

## 4 若干其他河外星系的的质量测定概况

与 M31 相比, 其他河外星系动力学质量的测定工作做得就少多了, 下面仅给出不同类型星系的一些代表性结果, 包括超巨椭圆星系 M87、透镜星系 NGC5084、特殊星系 NGC1961、棒旋星系 NGC3992, 以及类星体 3C273 等。

### (1) M87 (NGC4486)

这是位于室女星系团内的一个超巨椭圆星系, 距离约为 16.8 Mpc。1988 年 Huchra<sup>[60]</sup> 以球状星团为示踪天体, 推算出 M87 的位力质量  $M_{VT}$  和投影质量  $M_P$  分别为  $M_{VT} = (5.31 \pm 1.97) \times 10^{12} M_\odot$  ( $R_{\max} = 14.7$  kpc) 和  $M_P = (6.08 \pm 2.24) \times 10^{12} M_\odot$  ( $R_{\max} = 16.6$  kpc), 可见两者并无显著差异。

作为比较, 在之前的 1983 年, Fabricant 和 Gorenstein<sup>[81]</sup> 利用爱因斯坦天文卫星的 X 射线观测资料, 曾得出 M87 的质量为:  $M = (1.2 \sim 1.9) \times 10^{13} M_\odot$  ( $R_{\max} = 87$  kpc), 以及  $M = (3 \sim 6) \times 10^{13} M_\odot$  ( $R_{\max} = 260$  kpc)。考虑到两条途径  $R_{\max}$  值之差异, 这里的  $M$  比上面的  $M_{VT}$  和  $M_P$  明显来得大是可以理解的。

### (2) NGC5084

这是一个大质量透镜星系, 距离约为 30 Mpc。20 世纪晚期的 H I 观测发现, 该星系的自转质量为  $M_{\text{rot}} = 8.5 \times 10^{11} M_\odot$  ( $R_{\max} = 34$  kpc)<sup>[37, 43]</sup>, 而 21 世纪初同类工作得出的结果是  $M_{\text{rot}} = 1.4 \times 10^{12} M_\odot$  ( $R_{\max} = 36$  kpc)<sup>[38]</sup>, 两者的差异主要起因于极大自转速度从  $V_{\max} = 328 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  提高到了  $V_{\max} = 409 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

另一方面, 在 NGC5084 周边约 100 kpc 范围内计有 34 个伴星系, 其中 9 个星系的中心距  $\leq 80$  kpc。Carignan 等人<sup>[37]</sup> 根据有较完备观测资料的这 9 个伴星系样本, 推算出该星系的位力质量为  $M_{VT} = (6.3 \pm 3.4) \times 10^{12} M_\odot$ 。又由式 (7) 可推算出 NGC5084 的投影质量为  $M_P = (1.0 \pm 0.5) \times 10^{13} M_\odot$ 。作者经详细分析后认为, 后一数字可作为该星系总质量的最优估计值, 而 NGC5084 可算是质量最大的盘状星系之一。

### (3) NGC1961 (Arp 184)

NGC1961 是一个特殊的超大质量 Sb 旋涡星系, 距离约为 41.3 Mpc。1982 年, Shostak 等人<sup>[39]</sup> 根据射电 H I 观测, 得出它的自转质量为  $M_{\text{rot}} \geq 1.5 \times 10^{12} M_\odot$  ( $R_{\max} = 30$  kpc)。不久, Gottesman 等人<sup>[40]</sup> 由 NGC1961 周边的 5 个伴星系, 得出该星系的投影质量约为  $M_P = 10^{13} M_\odot$  ( $R_{\max} = 244$  kpc)。嗣后, Erickson 等人<sup>[43]</sup> 再次给出其自转质量  $M_{\text{rot}} = 7.5 \times 10^{11} M_\odot$  ( $R_{\max} = 24$  kpc), 与上述 Shostak 等人<sup>[39]</sup> 的测定值是相符的。 $M_P$  与  $M_{\text{rot}}$  值相差之大, 说明在这个特殊星系的外围存在着大质量的暗物质晕。



## (4) NGC3992

NGC3992 是一个外形对称的棒旋星系, 距离约为 14.2 Mpc。1982 年 Gottesman 和 Hunter<sup>[41]</sup> 指出, 由光学和射电观测可知, 该星系的自转质量很可能为  $M_{\text{rot}} = 2 \times 10^{11} M_{\odot}$  ( $R_{\text{max}} = 20$  kpc)。不久, Erickson 等人<sup>[43]</sup> 由 H I 观测得出它的自转质量为  $M_{\text{rot}} = 2.54 \times 10^{11} M_{\odot}$  ( $R_{\text{max}} = 19$  kpc)。另一方面, Gottesman 和 Hunter<sup>[41]</sup> 还利用 NGC3992 外围的 4 个伴星系, 得出该星系的投影质量为  $M_{\text{P}} \leq 4 \times 10^{11} M_{\odot}$  ( $R_{\text{max}} = 59$  kpc)。考虑到  $R_{\text{max}}$  值的不同, NGC3992 的这 3 个质量估值并无显著差异。

## (5) 3C273

3C273 是第一个被确认的类星体, 也是全天最亮的类星体 ( $m_{\text{V}} = 13.02$  mag), 红移  $z = 0.158$ 。20 世纪 80 年代末, Stockton<sup>[82,83]</sup> 在一项巡天工作中发现, 3C273 近邻天区内有 12 个星系, 11 个测得了红移。其中, 最靠近 3C273 的 4 个星系之红移与类星体红移之差  $\Delta z \leq 0.002$ 。Bahcall 和 Tremaine<sup>[11]</sup> 经仔细分析后确认, 这 4 个星系与 3C273 物理成协, 到 3C273 的最远投影距离为  $233 h^{-1}$  kpc, 而其余 8 个星系均为背景星系或者前场星系。据此, 他们利用这 4 个伴星系的径向速度和观测位置资料, 得出 3C273 的投影质量为  $M_{\text{P}} = 5 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$  (不确定性因子 2~3)。如取  $h = 0.73$ , 则有  $M_{\text{P}} = 6.8 \times 10^{13} M_{\odot}$  ( $R_{\text{max}} \leq 170$  kpc)。

## 5 小结与展望

为了确定河外星系的动力学质量, 人们提出了多种估测途径。在 20 世纪, 主要是自转质量、位力质量和投影质量。21 世纪初以来, 又有轨道质量、示踪质量、星流法质量等多种确定星系质量的方法。不过, 对于相关工作做得最多的近星系 M31, 尽管用到了上述所有的方法,  $M_{\text{A}}$  的测定值仍有相当大的不确定性, 甚至与银河系质量  $M_{\text{MW}}$  相比哪个为大, 至今尚未能给出明确的结论。

Evans 等人<sup>[17]</sup> 的工作指出, 影响星系质量测定值可靠性的主要误差因素有: (1) 因伴天体样本不够大所造成的统计误差; (2) 目标天体距离估值的不确定性; (3) 模型假设的变化 (不过充其量不会超过 30%)。显然, 为提高星系质量的测定精度, 必须力求减小这些因素的不利影响。

预期在不远的将来, 上述情况可望得以较大的改善。微角秒级精度的天体测量卫星 GAIA 已于 2013 年 12 月成功发射, 经过跨若干年时间基线的观测, 可以取得目标近星系更多伴天体 (如某些球状星团等) 的较高精度的自行资料, 并可用来测定河外星系的质量, 而目前的地面望远镜尚不能测得 (除麦哲伦云外) 河外星系的自行。另一方面, 地面设备将会取得更多晕族示踪天体的视向速度。Evans 和 Wilkinson<sup>[15]</sup> 曾估计, 如能测得 M31 周边、投影中心距  $20 \leq R \leq 50$  kpc 范围内 100 个球状星团的视向速度和自行, 那么  $M_{\text{A}}$  值 ( $R_{\text{max}} = 50$  kpc) 的相对测定精度可达到约 20%。

## 参考文献:

- [1] Ostriker J P, Peebles P J E. *ApJ*, 1973, 186: 467
- [2] Kapteyn J C. *ApJ*, 1922, 55: 302
- [3] Babcock H W. *Lick Obs. Bull.*, 1939, 19: 41
- [4] Wyse A B, Mayall N U. *ApJ*, 1942, 95: 24
- [5] Schwarzschild M. *AJ*, 1954, 59: 273
- [6] Schmidt M. *BAN*, 1957, 14: 17
- [7] Brandt J C. *ApJ*, 1960, 131: 293
- [8] Rubin V C, Ford Jr W K. *ApJ*, 1970, 159: 379
- [9] Hartwick F D A, Sargent W L W. *ApJ*, 1974, 190: 283
- [10] Newton K, Emerson D T. *MNRAS*, 1977, 181: 573
- [11] Bahcall J N, Tremaine S. *ApJ*, 1981, 244: 805
- [12] van den Burgh S. *PASP*, 1981, 93: 428
- [13] Federici L, Pecci F F, Marano B. *A&A*, 1990, 236: 99
- [14] Federici L, Bònoli F, Ciotti L, et al. *A&A*, 1993, 274: 87
- [15] Evans N W, Wilkinson M I. *MNRAS*, 2000, 316: 929
- [16] Côté P, Mateo M, Sargent W L W, et al. *ApJ*, 2000, 537: L91
- [17] Evans N W, Wilkinson M I, Guhathakurta P, et al. *ApJ*, 2000, 540: L9
- [18] Evans N W, Wilkinson M I. *ASPC*, 2000, 239: 299
- [19] Evans N W, Wilkinson M I, Perrett K M, et al. *ApJ*, 2003, 583: 752
- [20] Ibata R, Chapman S, Ferguson A M N, et al. *MNRAS*, 2004, 351: 117
- [21] Chapman S. *NewAR*, 2005, 49: 209
- [22] Carignan C, Chemin L, Huchtmeier W K, et al. *ApJ*, 2006, 641: L109
- [23] Fardal M A, Babul A, Geehan J J, et al. *MNRAS*, 2006, 366: 1012
- [24] van der Marel, Guhathakurta P. *ApJ*, 2008, 678: 187
- [25] Lee M G, Hwang H S, Kim S C, et al. *ApJ*, 2008, 674: 886
- [26] Seigar M S, Barth A J, Bullock J S. *MNRAS*, 2008, 389: 1911
- [27] Watkins L L, Evans N W, An J H. *MNRAS*, 2010, 406: 264
- [28] Tollerud E J, Beaton R L, Geha M C, et al. *ApJ*, 2012, 752: 45
- [29] van der Marel, Fardal M, Besla G, et al. *ApJ*, 2012, 753: 8
- [30] Veljanoski J, Ferguson A M N, Mackey A D, et al. *ApJ*, 2013, 768: L33
- [31] Fardal M A, Weinberg M D, Babul A, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 2779
- [32] Veljanoski J, Mackey A D, Ferguson A M N, et al. *MNRAS*, 2014, 442: 2929
- [33] Sargent W L W, Young P J, Bokserberg A, et al. *ApJ*, 1978, 221: 731
- [34] Huchra J, Brodie J. *AJ*, 1987, 93: 779
- [35] Murphy J D, Gebhardt K, Adams J J. *ApJ*, 2011, 729: 129
- [36] Agnello A, Evans N W, Romanowsky A J, et al. *MNRAS*, 2014, 442: 3299
- [37] Carignan C, Côté S, Freeman K C, et al. *AJ*, 1997, 113: 1585
- [38] Gottesman S T, Hunter Jr J H, Boonyasait V. *MNRAS*, 2002, 337: 34
- [39] Shostak G S, Hummel E, Shaver P A, et al. *A&A*, 1982, 115: 293
- [40] Gottesman S T, Hunter Jr J H, Shostak G S. *MNRAS*, 1983, 202: 21
- [41] Gottesman S T, Hunter Jr J H. *ApJ*, 1982, 260: 65
- [42] Gottesman S T, Hunter Jr J H, Ball J R. *IAUS*, 1983, 100: 93
- [43] Erickson L K, Gottesman S T, Hunter Jr J H. *Nature*, 1987, 325: 779
- [44] Woodly K A, Harris W E, Beasley M A, et al. *AJ*, 2007, 134: 494
- [45] Woodly K A, Gómez M, Harris W, et al. *AJ*, 2010, 139: 1871
- [46] Perelmuter J M, Brodie J P, Huchra J P. *AJ*, 1995, 110: 620
- [47] Sakamoto T, Chiba M, Beers T C. *A&A*, 2003, 397: 899

- 
- [48] Bettaglia G, Helmi A, Morrison H, et al. MNRAS, 2005, 364: 433
- [49] Hawkins M R S. Nature, 1983, 303: 406
- [50] Carney B W. PASP, 1984, 96: 841
- [51] Saha A. ApJ, 1985, 289: 310
- [52] Einasto J, Kassik A, Saar E. Nature, 1974, 250: 309
- [53] Burbidge G R. ApJL, 1975, 196: L7
- [54] Honma M, Sofue Y. PASJ, 1996, 48: 103
- [55] An J H, Evans N W. MNRAS, 2011, 413: 1744
- [56] Page T. ApJ, 1952, 116: 63
- [57] Walf R A, Bahcall J N. ApJ, 1972, 176: 559
- [58] van Moorsel L. A&A, 1987, 176: 13
- [59] Heisler J, Tremaine S, Bahcall J N. ApJ, 1985, 298: 8
- [60] Huchra J. IAUS, 1988, 126: 255
- [61] Varghese A, Ibata R, Lewis G F. MNRAS, 2011, 417: 198
- [62] Ibata R A, Irwin M J, Lewis G, et al. Nature, 2001, 412: 49
- [63] McConnachie A W, Irwin M J, Ibata R A. MNRAS, 2003, 343: 1335
- [64] Ibata R A, Martin N F, Irwin M J, et al. ApJ, 2007, 671: 1591
- [65] Conn A R, Ibata R A, Lewis G F, et al. ApJ, 2012, 758: 11
- [66] Kim S C, Lee M G, Geisler D, et al. AJ, 2007, 134: 706
- [67] Nolthenius R, Ford H C. ApJ, 1987, 317: 62
- [68] Fardal M, Guhathakurta P, Gilbert K, et al. ASPC, 2009, 419: 118
- [69] Peebles P J E. ApJ, 1989, 344: L53
- [70] Hodge P. The Andromeda Galaxy. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1992
- [71] Mateo M. ARA&A, 36: 435
- [72] Courteau S, van den Bergh S. AJ, 1999, 118: 337
- [73] Rubin V, Ford W. ApJ, 1970, 159: 379
- [74] Fusi Pecci F, Cacciari L, Federici L, et al. ASPC, 1993, 48: 410
- [75] Walterbos R A M, Kennicutt R C. A&A, 1988, 198: 61
- [76] Walterbos R A M, Schwering P B W. A&A, 1987, 180: 27
- [77] Walterbos R A M, Evans N W. MNRAS, 1999, 310: 645
- [78] Karachentsev I D, Kashibadze O G, Makarov D I, et al. MNRAS, 2009, 393: 1265
- [79] Zaritsky D. ASPC, 1999, 165: 34
- [80] Giovanni C, Baiesi P. MNRAS, 2009, 397: 1990
- [81] Fabricant D, Gorenstein P. ApJ, 1983, 267: 535
- [82] Stockton A. Nature, 1978, 274: 342
- [83] Stockton A. IAUS, 1980, 92: 89

## Approaches to Estimate Dynamical Masses of External Galaxies

ZHAO Jun-liang<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Kinematic data of satellite objects of external galaxies, such as dwarf galaxies, globular clusters and other halo population objects, have been used to estimate the dynamic masses of the galaxies in different approaches, including rotation mass, virial mass, projected mass and TME mass (Tracer Mass Estimator), orbital mass, timing mass, stellar stream method etc. During the 20th century, the main methods for mass estimates of galaxies are rotation mass, projected mass and orbital mass. In the 21st century, the current approaches turn to TME mass and stellar stream method, while virial mass and timing mass are also used.

Among the external galaxies for which the dynamical masses have been estimated, the most numerous work of mass determination is on Andromeda, M31, and the concerned results are listed in Table 1 of this paper. It can be seen from these results that the uncertainties of M31's mass estimators,  $M_A$ , are usually quite big, and even bigger than  $M_A$  itself in a few cases. Because of such big uncertainties of mass estimators, up to now there has not been the final conclusion for the most massive member galaxy in the Local Group, Andromeda or Milky Way Galaxy? So far as Andromeda is concerned, it can be found from the table that the reasonable estimate of its mass,  $M_A$ , is likely to be  $M_A = (11 \sim 15) \times 10^{11} M_\odot$  based on the results obtained during the recent 5~10 years.

The dynamic masses of some other external galaxies with different types are briefly introduced, including the cD galaxy M87, the lenticular galaxy NGC5084, the special galaxy NGC1961, the barred spiral galaxy NGC3992, and the quasar 3C273.

The GAIA satellite was successfully launched in December 2013. It will allow the determination of the proper motions of some 100 globular clusters with  $20 < R < 50$  kpc within the following years. It can be expected that then the relative uncertainty of the mass  $M_A$  will be reduced to some 20%.

**Key words:** external galaxy; dynamic mass; satellite object; light-of-sight velocity; dark halo; Andromeda