

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.02.01

# 星系自转曲线之观测研究进展

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:** 星系自转曲线测定对星系天文学研究有着重要的意义。现已发现, 除旋涡星系外, 其他类别的河外星系也有自转运动, 但自转曲线的特征有所不同。自转曲线研究的内容颇为丰富, 如是否存在普适自转曲线, 星系团环境对成员星系运动特征的可能影响, 星系物质转动速度的垂向梯度问题, 以及星系中暗物质的分布等, 对上述内容做了相关评述。

**关键词:** 星系; 旋涡星系; 自转曲线; 中性氢; 暗晕

**中图分类号:** P157      **文献标识码:** A

## 1 引 言

星系自转曲线测定对星系天文研究具有多方面的重要意义: 它可以用来探测星系的运动学状态、结构和质量分布, 给星系质量模型提供观测约束条件, 并进而探究星系内暗物质的存在, 亦可为了解星系演化进程提供有用的线索<sup>[1]</sup>。

从历史上看, 通常认为早在哈勃证实河外星系存在之前的 1914 年, 已有人从星系(当时称为星云)光谱中谱线的倾斜, 觉察到旋涡星系有自转<sup>[2]</sup>, 并为随后的一些工作所证实<sup>[3-7]</sup>。那时, 因观测技术水平所限, 为拍得可测出视向速度的星系光谱, 所能利用的谱线只是一些弱吸收线, 累积曝光时间甚至需长达 70~80 h, 即使到 1960 年仍需几个小时<sup>[8]</sup>, 且大多数观测对象仅限于明亮的星系核区<sup>[6,7,9-11]</sup>。鉴于上述原因, 在嗣后的 60 年左右时间内, 能测得自转曲线的星系数不足 100 个<sup>[10]</sup>, 且曲线所涉及的中心距范围仅为星系光学可测半径之  $1/3 \sim 1/2$ <sup>[10,12]</sup>。如 1948 年 Mayall<sup>[13]</sup>利用 H 和 K 线, 简单讨论了 30 个 S 星系(旋涡星系)的核区自转状况, 而 20 多年后这一数字才增加到 56 个<sup>[9]</sup>。

随着实测技术的改进, 以及用发射线(如  $H\alpha$  线等)取代吸收线来测定视向速度, 特别是综合孔径射电观测技术的应用, 自 20 世纪 80 年代起情况便大为改观。1983 年, Zasov 和 Kyazumov<sup>[14]</sup>在前人工作基础上, 以列表形式发表了含 100 个 S0-Irr 星系的自转曲线测定结

收稿日期: 2012-09-25; 修回日期: 2012-12-18

资助项目: 国家自然科学基金(10773020, 10778003, 10833055)

果。翌年, Kyazumov<sup>[15]</sup>又发表了 116 个 S 星系和少数 Irr 星系的自转速度。上述两项工作所给出的并不是观测自转曲线轮廓, 而是表征自转曲线特征的一些参数, 如自转速度峰值, 自转曲线转向点之中心距, 核区自转速度梯度, 视向速度最远测点之中心距  $R_{\text{last}}$ , 以及星系的倾角等。

1992 年, Mathewson 等人<sup>[16]</sup>发表了南天 1355 个 S 星系的有关观测资料。1995 年, Persic 和 Salucci<sup>[17]</sup>在 Mathewson 等人<sup>[16]</sup>工作的基础上, 给出了 967 个 S 星系的图示观测自转曲线。1996 年, Persic 等人<sup>[18]</sup>在探讨所谓“普适自转曲线 (universal rotation curve)”问题时用到了约 1100 个星系的自转曲线。同年, Mathewson 和 Ford<sup>[19]</sup>在讨论有关 Tully-Fisher 关系的问题时, (南天) 样本 S 星系数达到 2447 个, 并给出了星系的形状、倾角、视向速度, 以及自转曲线极大、极小视向速度之差等几何和物理参数。

为探究星系的质量分布以及可能存在的大质量暗晕, 自转曲线涉及的中心距范围应该越大越好。以仙女星系 M31 为例, 1915 年该星系观测视向速度最远测点的中心距  $R_{\text{last}}$  仅为 0.2 kpc<sup>[4]</sup>, 1918 年扩展到 0.5 kpc<sup>[7]</sup>, 而 1939 年  $R_{\text{last}}$  约为 20 kpc, 这已大致相当于该星系 Holmberg 半径 ( $R_{\text{Ho}}$ ) 的范围<sup>[20]</sup>。1970 年 Rubin 和 Ford<sup>[21]</sup>把这一范围扩大到 24 kpc, 不久 21 cm 射电观测使  $R_{\text{last}}$  进一步拓展到 30 kpc<sup>[12,22]</sup>, 达到  $1.5R_{\text{Ho}}$ 。另一方面, 在 Kyazumov<sup>[15]</sup>的样本中, 一些星系的视向速度最远测点之中心距  $R_{\text{last}}$  已超过 30 kpc, 甚至达到 45 kpc。

从形态类别来看, 最早发现星系有自转, 并测定其自转曲线的都是一些正常 S 星系<sup>[2-7]</sup>。后来, 又陆续发现其他类别的星系也会表现出有自转, 并对之进行了研究<sup>[10]</sup>。自 20 世纪 60 年代起, 有人开始讨论不同形态类别星系的自转曲线问题, 如 SB 星系<sup>[23,24]</sup>、Irr 星系<sup>[8,10,14,15,25]</sup>、E 星系<sup>[10,26]</sup>、S0 星系<sup>[4]</sup>, 以及不同次型的 S 星系<sup>[12,27,28]</sup>等。尽管如此, 绝大部分自转曲线, 特别是 20 世纪 90 年代取得的大样本资料, 均来自 S 星系<sup>[16-19]</sup>。

## 2 观测简史

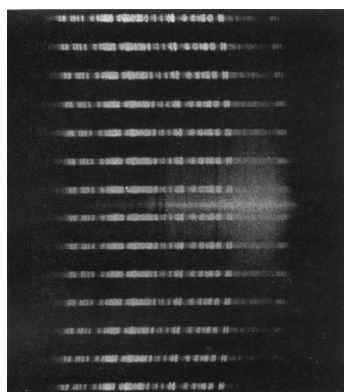


图 1 M31 中心区光谱<sup>[7]</sup>  
总曝光时间 79 h

用于测定星系自转曲线的谱线, 经历了从光学吸收线、光学发射线, 到射电发射线的发展过程。最早利用的是星系核区的吸收线 (如 H 线和 K 线), 测定方法的基本原理非常简单。观测时摄谱仪狭缝需沿星系长轴安置, 如目标星系有 (绕短轴的) 自转, 其不同测点便会有不同的观测视向速度, 而狭缝不同位置处所拍得星系光谱中的谱线就会有不同的多普勒位移, 这一观测效应曾被称为谱线倾斜 (line inclination, 参见图 1)。如记观测视向速度为  $v_c$ , 测点到星系中心的距离为  $x$ , 则可有

$$v_c = \alpha x + v_0 \quad , \quad (1)$$

这里  $\alpha$  为谱线倾角,  $v_0$  是目标星系中心的视向速度, 可由不同测点的  $(x, v_c)$  值求得。上述结果尚需作星系倾角改正。如设星

系实测图像之长、短径分别为  $a$  和  $b$ , 观测者视线与星系盘平面之交角为  $i$ , 则有

$$\tan i = b/a \quad , \quad (2)$$

而经倾角  $i$  改正后的实际视向速度为

$$v = v_c / \cos i \quad . \quad (3)$$

1918 年, Pease<sup>[7]</sup>通过上述途径对 M31 得出  $v_c = (-0.48x - 316) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 由此可推知距星系中心  $2'(500 \text{ pc})$  处的自转速度为  $58 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。Pease<sup>[7]</sup>同时还发现沿 M31 短轴的视向速度大体上保持为一常数, 可见 M31 确实在绕其短轴旋转 (见图 2)。

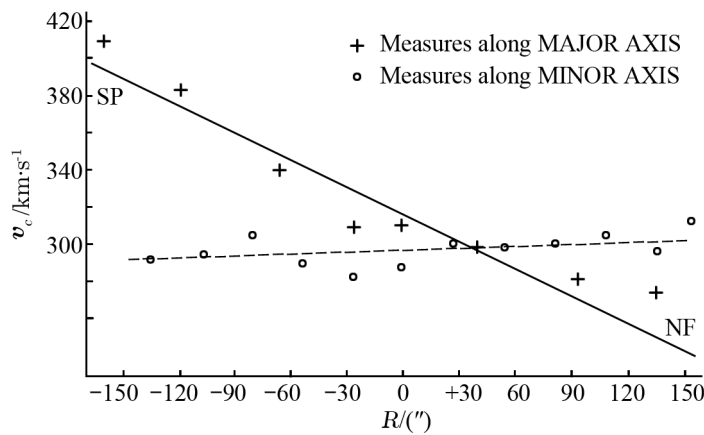


图 2 M31 中心区的视向速度曲线<sup>[7]</sup>  
实线和虚线分别为沿长轴和短轴的测定结果

公式 (1) 的应用意味着系统呈刚体转动, 即角速度保持不变, 而星系核球部分的自转状况也确实如此。不过, 随着  $R_{\text{last}}$  的增大, 星系自转变得更复杂, 完全不能用公式 (1) 来描述。

鉴于强发射线比吸收线 (即使是 H 线和 K 线) 更容易探测到, 最迟自 20 世纪 70 年代起, 人们便广泛通过发射线来测定星系的自转曲线, 其中最常用的发射线是  $\text{H}\alpha$ , 如 1992 年 Mathewson 等人<sup>[16]</sup>的一项工作中用到了 965 个星系的  $\text{H}\alpha$  自转曲线; 此外, 也用到  $[\text{NII}]$ 、 $[\text{SII}]$ 、 $[\text{OII}]$  等发射线<sup>[10,19,21,28-33]</sup>, 有的星系最远测点之中心距  $R_{\text{last}}$  已接近  $2R_{25}$ <sup>[32]</sup> ( $R_{25}$  亦称伏古勒半径<sup>[34]</sup>), 而在线尺度上对远距离星系已达到  $R_{\text{last}}=122 \text{ kpc}$ <sup>[29]</sup>。2001 年, Tecza 等人<sup>[35]</sup>首次用红外波段  $[\text{SiVI}]$  发射线, 讨论了塞弗特星系 NGC 1068 的速度场。另一方面, 发射线产生于 HII 区, 而在明亮的星系中央部分吸收线显著但往往少有 HII 区, 这正是早期只限于用吸收线来测定核区星系自转曲线的原因之一。基于同样的原因, 发射线也不适宜用于早型星系<sup>[11]</sup>。

射电波段的 21 cm HI 发射线对于测定星系自转曲线殊为重要, 这种来自星际气体的辐射在星系外缘也能探测到, 远超出光学发射线所能涉及的范围,  $R_{\text{last}}$  甚至可超过 50 kpc, 成为探

测星系最外区自转状况的唯一手段<sup>[1,10,36]</sup>。不仅如此,鉴于 HII 区常成批出现于旋臂结构内,在旋臂之间光学发射线速度却难以测定;然而,臂间区域通常会存在较为丰富的中性氢气体,可以用来测定这一区域可靠的视向速度<sup>[11]</sup>。

1957 年, van de Hulst 等人<sup>[37]</sup>首次对 M31 中的 HI 做了详细的观测,自转曲线测定的中心距范围为  $0.6^\circ \sim 2.5^\circ$  ( $7.7 \sim 32.3$  kpc), 要比 Rubin 和 Ford<sup>[21]</sup>在 1970 年由 HII 区发射线取得的 M31 自转曲线的范围 ( $< 24$  kpc) 来得大。嗣后, HI 被广泛用于星系自转曲线的测定。例如, 1975 年 Huchtmeier<sup>[38]</sup>在前人工作的基础上,给出了 17 个星系的 HI 自转曲线,其中少数星系的  $R_{\text{last}}$  已超过  $3R_{\text{Ho}}$ 。1981 年 Bosma<sup>[39]</sup>在讨论中性氢的分布和运动学时,用到了 25 个星系的射电自转曲线。1992 年 Mathewson 等人<sup>[16]</sup>的工作中用到了 551 个星系的 HI 自转曲线。1996 年 Persic 等人<sup>[18]</sup>在讨论 S 星系暗物质问题时,所用样本含有 1100 条光学和射电自转曲线。

为尽可能准确测定星系的自转曲线,最合适的观测对象是侧向星系,这时倾角改正的不确定性为最小(参见公式(3))。另一方面,在中心距范围仅为几个 kpc 的核球和星系盘内区,光学观测会受到星际消光的严重影响(尤其是侧向星系),不利于光学自转曲线的测定;同时,那里 HI 的面密度很低,这对射电自转曲线的测定亦颇为不利<sup>[39,40]</sup>。

鉴于中心区尘埃盘的消光影响在 CO 波段可以忽略不计,而 CO 线发射通常集中在星系中心区,上述问题可通过观测毫米波段的 CO 发射线得以解决<sup>[1]</sup>。1978 年, Burton 和 Gordon<sup>[41]</sup>给出了银河系的 HI 和 CO 自转曲线,两者符合得相当好。1986 年, Young 等人<sup>[42]</sup>对 14 个亮红外星系进行了毫米波观测,给出其中 9 个星系的核区 CO 自转曲线。20 世纪 90 年代的工作表明,在 S 星系盘的中间区域,  $H\alpha$ 、CO 和 HI 三类自转曲线彼此符合得很好,这就表明在盘的內区可以用 CO 取代  $H\alpha$  和 HI 来测定自转曲线<sup>[1,40,43,44]</sup>。进入 21 世纪后,随着毫米波探测技术的发展,人们取得了更多星系的核区 CO 自转曲线<sup>[45-48]</sup>。

### 3 不同形态星系的自转曲线

自转曲线的测定和研究的对象绝大多数为 S 星系,不过其他类别星系也会表现出有自转,只是自转曲线的某些特征与 S 星系有所不同。

#### 3.1 旋涡星系自转曲线的一般特征

所谓“自转曲线”,是指星系自转速度  $V$  随中心距  $R$  的变化曲线  $V(R)$ 。S 星系自转曲线的总体轮廓大致可分为 3 段:(1)从星系中心  $R \approx 0$  处起,  $V(R)$  随  $R$  的增大而增大,这是自转曲线的快速上升段。(2)随着  $R$  的进一步增大,较差自转盘的运动学特征开始显现,  $V(R)$  表现为较缓慢地增大,并在  $R_t \approx 2R_D$  处达到极大值  $V_{\text{max}}$  ( $V_{\text{max}}$  通常为  $200 \sim 300 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ); 这里  $R_D$  为盘的标长<sup>[1]</sup>, 而  $R_t$  是自转曲线的转向点 (turnover point) 的中心距。(3)一旦  $R > R_t$ ,  $V(R)$  (在略有下降后) 大体上保持不变,或者仅有缓慢减小或增大的趋势,这种平坦形曲线通常可一直维持到最远测点  $R_{\text{last}}$ , 不过其间曲线可能会表现出有少量(每秒数十公里)的起伏。自转曲线的这些基本特征,通常可以用“核球 + 自转盘 + 大质量暗晕”的三成分星系模型来解释。

随着空间分辨率的提高,发现星系中心区的自转曲线又可分为 3 种类型:(1) 中央峰型——在中心距  $R \approx 100 \sim 500 \text{ pc}$  附近曲线有一个明显的陡峰,之后  $V(R)$  减小,当  $R \approx 1 \text{ kpc}$  时再度增大,直至达到  $V_{\text{max}}$ 。(2) 无中央峰型——自转曲线自星系中心起急剧上升,并直接与外区的平坦曲线相接。(3) 刚体型—— $V(R)$  自星系中心起渐而增大,且在  $R < 1 \text{ kpc}$  范围内大体上满足  $V(R) \propto R$ ,即相当于刚体转动<sup>[44]</sup>。

### 3.2 不同次型旋涡星系的自转曲线

1971 年 Brosche<sup>[49]</sup>的工作表明,在它的 53 个星系样本中,对于从 Sab 星系起直至 Irr 型(哈勃级  $T = 2 \sim 10$ ,  $T$  亦可称形态码)的 48 个星系,它们的极大自转速度  $V_{\text{max}}$  表现为随哈勃序列渐而减小的趋势,从约  $240 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  起最终减小为  $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  左右(参见图 3)。不过,当时  $V_{\text{max}}$  的测定精度看来不太高,个别星系的光学和射电  $V_{\text{max}}$  之差几近  $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

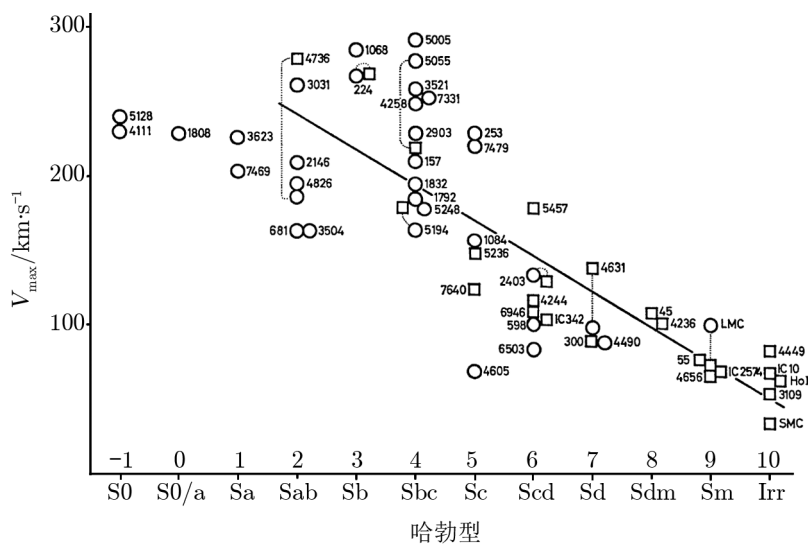


图 3 星系极大自转速度与哈勃型的关系<sup>[49]</sup>

上述结果在 S 星系方面为随后的工作所证实和拓展<sup>[12,27,28,34,44]</sup>。如 1973 年 Roberts 和 Rots<sup>[12]</sup>还发现越是晚型的星系,转向点中心距  $R_t$  就越大,而这与它们在质量和光度分布上的变化规律相一致——晚型星系面密度轮廓随中心距减小的趋势较为缓慢。1985 年 Rubin 等人<sup>[28]</sup>利用 60 个 S 星系样本(Sa、Sb、Sc 星系分别为 16、23、21 个)的观测资料,发现对应这 3 类星系,  $V_{\text{max}}$  值依次为 299、222 和  $175 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。另外,它们的自转曲线轮廓的  $R > R_t$  段大体上都呈平坦形。

### 3.3 棒旋星系的核区自转曲线

通常认为,普通旋涡星系(即 SA 型)的核球从总体上看具有旋转对称(等轴椭球体)外形,而棒旋星系(SB 型)的核区存在非旋转对称(三轴椭球形)的棒结构,因而后者核区部分的自转曲线比 SA 型星系会复杂些。



关于 SB 星系的视向速度测定, 早期可追溯到自 20 世纪 30 年代起的一些工作<sup>[50-53]</sup>, 如 1936 年 Humason<sup>[50]</sup>给出了 100 个星系的视向速度, 其中有 18 个为 SB 星系。

20 世纪 60 年代, Burbidge 等人<sup>[23,24,54-56]</sup>利用  $H\alpha$ 、[NII] 等发射线, 对若干 SB 星系核区的自转特征做了较为细致的观测研究, 观测时狭缝沿棒的取向安置。他们发现, 在棒结构所及的范围内自转曲线大致呈线性变化, 即  $V(R) \propto R$ 。核区的转动速度很大, 但在棒结构范围以外速度便急剧下降。星系中心两侧核区的自转速度是不对称的, 如星系 NGC 1097 棒两端 (棒长约 1.6 kpc) 的速度差约为  $550 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

顺便指出, 除核区外, SB 星系自转曲线的走向与 SA 星系相类似, 即保持平坦状或略有下降<sup>[38,57]</sup>。另外, Sofue 等人<sup>[44]</sup>曾讨论了 SB 星系的自转特征并与无棒 SA 星系做了比较, 认为总体上看两者并无显著差异, 只是 SB 星系自转曲线的起伏 ( $\pm(20 \sim 30) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 较 SA 星系 ( $\pm(10 \sim 20) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 更大些。

### 3.4 不规则星系

Roberts<sup>[10]</sup>在 1975 年就已指出, 除 S 星系外, 其他各种类型的星系也都会表现出有自转, 如不规则 (Irr) 星系, 以及早型星系中的椭圆 (E) 星系和透镜 (S0) 星系等, 其中研究得较多的是 Irr 星系。

自 20 世纪 60 年代起, 人们便开始探究 Irr 星系的自转特征, 从早期仅限于讨论个别 Irr 星系的自转曲线<sup>[8,14,15,58,59]</sup>, 到 21 世纪初目标 Irr 星系渐而增多<sup>[60-64]</sup>, 如 Garrido 等人<sup>[60,61,63,65]</sup>和 Epinat 等人<sup>[66,67]</sup>在 2002-2008 年间的几项工作共发表了 GHASP 巡天计划中, 由  $H\alpha$  发射线取得的数百计晚型星系的自转曲线, 其中给出  $V_{\max}$  等参数的 Irr 星系 (形态码  $T > 9.4$ ) 计有 29 个。由这些工作可以看出, 样本 Irr 星系之极大自转速度  $V_{\max}$  的范围为  $21 \sim 110 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 明显低于 Sc 星系的  $V_{\max}$  值<sup>[28]</sup>, 与早期 Brosche<sup>[49]</sup>的结果基本一致。另外, 如记最远测点  $R_{\text{last}}$  处的自转速度为  $V_{\text{last}}$ , 则对 Garrido 等人<sup>[60,61,63]</sup>工作中给出  $V_{\text{last}}$  的大部分样本星系有  $V_{\max} > V_{\text{last}}$ , 不过差数  $V_{\max} - V_{\text{last}}$  的均值仅约为  $14 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 说明转向点以外部分的自转曲线大致呈平坦状, 或者略有下降, 与 S 星系自转曲线的走向类似。

### 3.5 早型星系

1962 年 Walker<sup>[68]</sup>发现, E2 型星系 M32(NGC 221) 的核区有快速自转, 速度  $V(R)$  从星系中心起呈现线性增大, 至  $R = 2''.5$  即 8.4 pc 处达到  $65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相应的自转速度梯度为  $\dot{V} = \partial V / \partial R = 7.8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{pc}^{-1}$ 。之后,  $V(R)$  表现为线性减小, 至  $R \approx 9''$  处  $V(R) = 0$  (参见文献 [68] 中的图 2)。Walker 还据此估算了该星系核区的一些物理参数, 如自转周期、质量、密度以及质光比等。

不久, King 和 Minkowski<sup>[25]</sup>讨论了 4 个典型 E 星系的运动学状态。他们由吸收线倾斜发现, 其中两个 E5 星系 NGC 4621 和 NGC 4697 有自转, 并由此认为扁形 E 星系有自转并非罕见现象。上述结论为一些后续工作所证实<sup>[69-74]</sup>, 其中 Bertola 和 Capaccioli<sup>[69]</sup>首次给出了 E 星系 (NGC 4697) 的自转曲线, 发现  $V$  随中心距快速增大, 在  $R \approx 15''$  附近达到极大值  $V_{\max} \approx 65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 然后缓慢减小, 曲线形状与 S 星系相类似。E 星系的自转曲线看来因星系而异, 有的 E 星系  $V_{\max}$  可达到  $250 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  左右<sup>[71]</sup>, 不过核区部分曲线的  $V$  总是表现为持续

增大<sup>[70-72]</sup>。

另一类早型星系——S0 星系自转曲线的研究也比较少, 迄今也许不超过 20 个<sup>[14,49,71,73-75]</sup>。按形态分类, S0 星系 ( $T = -3 \sim 0$ ) 介于 E 星系和 S 星系之间。因此, 在自转曲线方面 S0 星系有时与 E 星系、有时与早型 S 星系一并研究<sup>[73-75]</sup>。S0 星系与 S 星系同属盘状星系, 其形态与 Sa 星系 ( $T = 1$ ) 尤为接近, 而两者的自转曲线总体形状亦颇为类似: 在核区部分  $V(R)$  随  $R$  的增大而迅速增大, 到达某一极大值  $V_{\max}$  后  $V(R)$  缓慢下降; 不过  $V_{\max}$  值因星系而异, 最小的不到  $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最大甚至可超过  $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[75]</sup>。

鉴于做了自转曲线研究的绝大部分为 S 星系, 下文如无明确说明, 则仅限于进一步讨论有关 S 星系自转曲线的若干问题。

## 4 普适自转曲线

随着大量 S 星系自转曲线的取得, 且发现它们的总体形状颇为类似, 人们试图从各个方面来对其自转曲线的形状进行分类。早期探究始于 1975 年 Roberts<sup>[76]</sup>及 Burbidge 和 Burbidge<sup>[77]</sup>的工作, 前者基于 HI 观测, 后者用的是光学资料。

1985 年, Rubin 等人<sup>[28]</sup>讨论了 60 个各次型 S 星系自转曲线与光度的统计关系, 发现与低光度星系相比, 无论对哪类 S 星系, 高光度星系自转速度的极大值  $V_{\max}$  都比较大, 核区的速度梯度也较大。这种关系本质上也就是 Tully-Fisher 关系, 因而大样本自转曲线便可用于检验 Tully-Fisher 关系<sup>[16,19]</sup>。

1991 年, Persic 和 Salucci<sup>[78]</sup>通过对 58 个 S 星系观测资料的分析发现, 自转曲线轮廓  $V(R)$  可以表述为星系光度和光学半径  $R_{\text{opt}}(R_{\text{opt}} \equiv 3.2R_D)$  之如下形式的函数<sup>[18,78]</sup>:

$$V(R) = 200(L_B/L_B^*)^\alpha [1 + f(L_B/L_B^*)(R/R_M - 1)] \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (4)$$

上式的大致适用范围为  $0.5 \leq R/R_{\text{opt}} \leq 1$ ; 式中幂指数  $\alpha \approx 0.25$ ,  $R_M \equiv 2.2R_D$ ,  $\lg L_B^* = 10.4(L_B$  为 B 波段光度), 以及函数  $f(L_B/L_B^*) = 0.12 - 0.24 \lg(L_B/L_B^*)$ , 而式 (4) 中数字系数的统计误差均不超过 5%。在此基础上 Persic 和 Salucci<sup>[78]</sup>提出了“普适自转曲线 (URC)”的概念, 并为嗣后基于大样本资料的工作所证实<sup>[18]</sup>。如果 URC 确实存在, 那么对于 S 星系, 自转曲线轮廓  $V(R)$  为星系的唯一参数 (光度) 所确定; 或者说只要有了光度, 便可利用 URC 估得任意中心距  $R$  处的星系自转速度。1996 年, Persic 等人<sup>[18]</sup>提出了一种形式更为复杂的 URC。

Sofue 和 Rubin<sup>[1]</sup>在他们 2001 年的评述中指出, 诸如式 (4) 形式 URC 的存在表明, 高光度星系的自转速度在达到 (范围较宽的) 极大值段后, 盘外区的自转速度  $V(R)$  随  $R$  的增大略有下降; 对于光度稍低的星系, 轮廓  $V(R)$  近乎呈平坦状; 对那些更低光度的星系, 自转速度始终维持单调增大。

除式 (4) 外, 有人还提出了不同形式的 URC。1999 年, Roscoe<sup>[79,80]</sup>在分析了南部天空 900 个 S 星系自转曲线的基础上, 认为 URC 可表达为中心距  $R$  的某种幂律函数:  $V(R) = AR^\alpha$ , 其中系数  $A$  与星系的绝对星等和面亮度有关, 而幂指数  $\alpha$  则与星系中核球、盘、晕的质量占比

等星系的其他参数有关。

星系的速度场(包括自转)取决于星系物质的密度分布。据此, Kravstov 等人<sup>[81]</sup>于 1998 年提出了星系自转曲线轮廓的 5 参数理论模型, 其中包括转向点的中心距  $R_t$  和转动速度  $V(R_t)$ 。2004 年, Garrido 等人<sup>[63]</sup>利用该模型研究了 46 个晚型星系(含少数 Irr 星系)的自转曲线, 并发现模型给出的 URC 与观测自转曲线符合得相当好。

另一方面, 也有人对 URC 的存在提出了质疑。如 Sofue 和 Rubin<sup>[1]</sup>指出, 从 1997 年 Verheijen<sup>[82]</sup>对大熊团 30 个 S 星系的一项工作可看出, 约有三分之一样本星系的自转曲线并不遵循 URC, 或者说它们明显因星系而异。1999 年 Sofue 等人<sup>[44]</sup>对 51 个 S 星系自转曲线的详细研究表明, Persic 等人<sup>[18]</sup>的 URC 只是与星系外区 ( $R > 10$  kpc) 的观测自转曲线符合得很好, 但中心区观测自转曲线的上升段要比 URC 陡得多, 并解释为该 URC 本来就是考虑了大质量晕而导出的。近期有人甚至认为, 给出任何形式的 URC 都是不可能的<sup>[65]</sup>。

总之, 关于 URC 是否确实存在, 它们的形式如何, 能在何种程度上和多大范围内对观测自转曲线给出合理解释等等, 此类问题仍需人们进一步探究。

## 5 环境影响

团星系与场星系所处的环境不同, 在团内环境中易于发生作用的一些物理过程会影响到团内成员星系的形态<sup>[83,84]</sup>, 同时亦会改变它们的内部运动状态, 其中包括自转曲线<sup>[1]</sup>。

### 5.1 星系的团心距

鉴于质量分层效应, 通常情况下越靠近团的中心区(即团心距越小), 团星系的数密度越高, 星系之间更容易发生相互作用, 并可能进而影响到星系的运动学状态。那么, 星系的自转曲线特征与其团心距是否存在某种关联?

20 世纪 80 年代的一些工作表明, 团星系外区自转速度梯度与星系到团中心的距离(团心距) $R_c$  之间存在某种相关性<sup>[84-88]</sup>。为了进行定量分析, Whitmore 等人<sup>[87]</sup>引入了所谓自转曲线的内区梯度 IG 和外区梯度 OG, 其中 IG 定义为在中心距  $R$  达到  $0.15R_{25}$  处的自转速度  $V(R)$  与  $V_{\max}$  之比, 而 OG 则定义为在  $R = 0.4R_{25}$  和  $R = 0.8R_{25}$  之间  $V(R)$  的增加值与  $V_{\max}$  之比。他们以 5 个星系团中 15 个团星系为样本, 发现样本团星系的 OG 与团心距  $R_c$  之间有很强的相关性:

$$OG = 10.3 + (43.2 \pm 10.9) \lg R_c \quad , \quad (5)$$

式中 OG 为百分比数, 所得相关系数为 0.73。这一结果表明, 内区团星系往往呈现下降形的自转曲线, 而外区团星系(以及场星系)多为平坦形或上升形的自转曲线。Whitmore 等人<sup>[87]</sup>认为, 上述结果可以用星系团内区的环境会使星系晕中部分质量剥离出去来解释。

然而, 20 世纪 90 年代的同类工作却未能明确证实这一点<sup>[31,32,89-91]</sup>。1993 年, Armram 等人<sup>[90]</sup>利用 5 个团中 21 个 S 星系精度更高的自转曲线样本, 得出 OG 与  $R_c$  之间的统计关系为

$$OG = 4.3 + (12.6 \pm 5.4) \lg R_c \quad . \quad (6)$$



基于这一回归方程中的斜率仅为式 (5) 中相应值的 31%, 且确定精度更高, Armram 等人<sup>[90]</sup>认为  $OG-R_c$  之间并不存在强相关性, 或者说星系团环境效应即使存在也是很弱的, 也许只是在内区 ( $R_c < 0.5$  Mpc) 才有所显示。上述观点在对距离最近 (因而可以研究得更仔细) 的星系团——Virgo 团的相关工作中也得到了证实<sup>[89,91]</sup>。

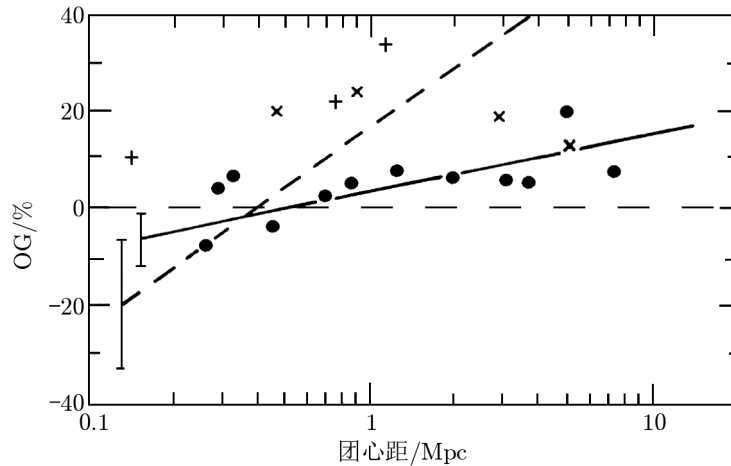


图 4  $OG-R_c$  关系<sup>[90]</sup>

图中实线和虚线分别为文献 [89] 和 [86] 给出的结果, 左端标出相应的误差棒。

不过, 鉴于问题的复杂性和样本星系数有限, Distefano 等人<sup>[89]</sup>还是认为他们的结果与 Whitmore 等人<sup>[87]</sup>的结论并非完全冲突。比较图 4 中的两条回归直线, 即式 (5) 和 (6), 也可以看出这一点——尽管式 (6) 中斜率的误差比式 (5) 小, 但相对误差却高达 43%, 明显比式 (5) 中的相应值 (25%) 大。

## 5.2 受扰自转曲线

与孤立的场星系不同, 团星系在演化过程中, 更容易受到多种物理过程的影响, 如星系交会、碰撞和并合, 星系与团之间的潮汐相互作用, 恒星和气体物质的剥离, 气体吸积, 团内气体的作用, 等等<sup>[92]</sup>。

Virgo 团是距离最近的大星系团, 它为研究星系运动学的环境效应提供了一个很好的样本。1999 年, Rubin 等人<sup>[92]</sup>以 Virgo 团中 81 个盘星系为样本, 讨论了光学自转曲线的运动学扰动问题。他们发现, 有近半数星系 (38 个) 具有规则自转曲线。所谓“规则自转曲线”, 其轮廓是随  $R$  的增大,  $V(R)$  大体上表现为快速上升部分、极大值区和平坦曲线部分 3 段 (参见 3.1)。

另一方面, 其余 43 个星系的自转曲线呈现不同程度的运动学扰动, 称之为“受扰自转曲线 (disturbed rotation curve)”。受扰自转曲线的表现是多方面的, 如星系长轴两侧自转速度的非对称性, 外区自转速度的持续下降, 内区自转速度轮廓的特殊性, 中区自转速度的小段下跌, 或者在团中心附近的某一范围内, 星系的自转速度都接近于零 (参见文献 [92] 中的图 11 和图 12)。

Rubin 等人<sup>[92]</sup>认为, 经过几个转动周期 (约 1 Ga) 后, 受引力扰动的星系便会回复到有规则 (轴对称或双对称) 的运动学状态。因此, 对于 Virgo 团内的一些星系来说, 每经过 1 Ga 左右时间必然会经历一次显著的运动学扰动, 或者说在其一生中已经历过若干次明显的潮汐交会。相反, 对那些具有规则自转曲线的 S 星系而言, 它们在最近 1 Ga 内没有经受大的引力扰动。Rubin 等人<sup>[92,93]</sup>还发现, 自转曲线的受扰程度与星系的形态和光度间不存在明显的相关性, 这说明从统计上看, 星系团环境对不同形态、不同质量星系自转曲线的影响是均衡的。另外, 在具有规则和受扰自转曲线的两类星系中, 星系的哈勃型、极大自转速度  $V_{\max}$  以及所处的局域星系密度都是类似的<sup>[93]</sup>。

作为比较, 一些工作表明大部分场星系 (74%) 的自转曲线是很有规则的, 而对其余少部分场星系 (26%) 来说, 它们的自转曲线也只是表现出受到少许引力扰动<sup>[28-30]</sup>。由此可见, 星系团环境确实会对团内诸多星系的自转曲线产生显著影响。不过, 如果引力扰动过程发生在较早时期 (比如 1 Ga 之前或更早), 在星系的观测自转曲线中就不能反映出来。

## 6 自转速度的垂向梯度

星系盘, 即使薄盘, 也是有一定厚度的。那么, 随着中面距  $z$  的增大, 盘物质的自转曲线是否会发生变化? 或者说自转速度在垂直星系中面的方向上是否存在垂向变化率 (或说梯度  $\gamma \equiv \partial V / \partial |z|$ )? 在 20 世纪内, 人们仅限于由星系中面附近物质的运动特性来探究星系的自转曲线, 大致相当于无限薄盘的运动情况。随着观测资料的不断累积和观测质量的提高, 天文学家开始关注中面外自转的垂向结构。

如设自转速度的垂向梯度具有面对称结构, 则可按下式解算  $\gamma$ <sup>[94]</sup>:

$$V(R, z) = V(R, 0) + \gamma |z|, \quad (7)$$

式中  $V(R, z)$  是中心距为  $R$ 、中面距为  $z$  处的自转速度。

2002 年, Fraternali 等人<sup>[95]</sup>在研究 S 星系 NGC 2403 速度场时发现, 除了通常的较差自转盘外, 还存在某种异常的非圆运动成分, 其转动速度比盘要小  $25 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 并认为它源自一个较厚的 HI 气体层的运动, 该气体层的质量约占星系 HI 总质量的 10%。2005 年, Barbieri 等人<sup>[96]</sup>关于 S 星系 NGC 4559 的工作证实了 Fraternali 等人<sup>[95]</sup>的上述发现, 并明确指出这种晕气体以厚盘形式出现, 又称面外气体 (extra-planar gas)。不久, Heald 等人<sup>[97]</sup>在对近侧向 S 星系 NGC 5775 的研究中得出  $\gamma \approx -8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$ 。嗣后, 同类工作 (包括对银河系) 也证实了星系自转速度垂向梯度的存在, 而  $\gamma$  的具体数值则因星系而异<sup>[98-103]</sup>。

表 1 给出已测得自转曲线垂向梯度  $\gamma$  值的一些结果 (含银河系) 及相关信息<sup>[104]</sup>, 表中  $z \in (\min, \max)$  是确定  $\gamma$  值时所用实测资料的中面距范围 ( $\gamma_e$  的含义见下文)。由表可见: (1) 所有的  $\gamma$  值都是在近 10 年内测得的, 这显然与近期高质量观测资料的不断积累有关; (2) 所有  $\gamma$  均为负值, 说明离开中面后星系物质的转动速度渐而减小; (3) 不同星系  $\gamma$  值的差异相当大,  $|\gamma|$  变化在  $8 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kpc}^{-1}$  之间, 这无疑与星系中物质垂向分布的结构有关; (4) 除银河

系外, 大部分星系的  $\gamma$  值均未给出测定值中误差, 而银河系  $\gamma$  值的相对误差已接近 30%, 其他星系  $\gamma$  值的相对不确定性很可能比这更大 (如 NGC 5775 为 50%)。为深入探究星系自转速度的垂向梯度及其与星系结构的关系, 显然需要更多、更好的观测资料。

表 1 星系自转曲线的垂向梯度

星系	$\gamma/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$	$z \in (\text{min}, \text{max})/\text{kpc}$	测定年份	文献	$\gamma_e/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$
银河系	$-22 \pm 6$		2008	[99]	
NGC 891	-15		2007	[102]	
NGC 2403	-12	(0.4 ~ 3)	2002	[94]	$-10 \pm 4$
NGC 4302	-30	(0.4 ~ 2.4)	2007	[98]	$-22.3 \pm 4.0$
NGC 4559	-10	(0.2 ~ 3.7)	2005	[100]	$-7.2 \pm 2.4$
NGC 5775	$-8 \pm 4$	(1.2 ~ 3.6)	2006	[96]	$-12 \pm 4.3$
UGC 7321	$\geq -25$		2003	[101]	

最近, Jałocha 等人<sup>[105]</sup>通过建立星系物质分布的薄盘模型, 从理论上估算了模型自转曲线的垂向梯度  $\gamma_e$ (参见表 1), 并和实测结果  $\gamma$  做了比较, 样本星系共有 4 个: NGC 2403、NGC 4302、NGC 4559 和 NGC 5775。从表列数字可以看出, 尽管有 3 个星系未给出实测值  $\gamma$  的中误差, 但理论值与实测结果显然相符。据此 Jałocha 等人<sup>[105]</sup>认为, 他们的薄盘模型虽然看似简单, 但能相当好地对  $\gamma$  做出正确的预言。不仅如此, 这一模型还能从定量上来探究 S 星系物质分布的总体特征。例如, 当中面附近的  $\gamma$  值较大时, 在远离核球的区域, 星系的物质分布必定呈扁平状, 而不是椭球状。在上述 4 个样本星系中, NGC 4302 的实测垂向梯度最大 ( $\gamma = -30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$ ), 薄盘模型得出的理论值为  $\gamma_e = -22.3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$ , 考虑到它们的不确定性 (不妨假设  $\gamma$  值的不确定性为  $30 \times 30\% = \pm 9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$ ), 则可见两者并无显著差异。另一方面, 如果改用“盘 + 晕”模型, 则相应值为  $\gamma_e = (-10.4 \pm 4.2) \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kpc}^{-1}$ <sup>[105]</sup>, 这显然就与实测  $\gamma$  值不符。

## 7 星系中暗物质的分布与质量模型

利用自转曲线探究星系暗物质已有约 40 年的历史。20 世纪 70 年代, Rubin 和 Ford<sup>[21]</sup>发表了 M31 的自转曲线, 并注意到至最远测点  $R_{\text{last}} = 24 \text{ kpc}$  处, 星系的质量是持续增大的。后来, Rubin 等人<sup>[27]</sup>认识到高光度 S 星系的自转曲线是平坦的, 延伸范围可达  $R = 34 \text{ kpc}$ 。很快, 观测和理论工作<sup>[106,107]</sup>便一致确认, 盘星系的外围存在大范围暗物质晕, 以合理解释平坦的自转曲线轮廓。嗣后, 直至最近, 人们一直借助自转曲线从多方面来探究星系中的暗物质<sup>[18,108-112]</sup>, 其中包括暗物质晕在星系中的分布, 而下文主要就这一问题给以简要介绍。

1985 年, Rubin 等人<sup>[28]</sup>通过对不同次型 S 星系 (指 Sa、Sb、Sc) 自转特性进行比较, 并详细讨论了样本星系的质光比与哈勃型的关系后指出, 在  $R \leq R_{25}$  (即相当于光学半径) 范围内的任何地方, 暗晕质量约占星系总质量的 50%, 且与星系形态并无明确的关系。他们认为暗

物质至少由 2 种成分组成：一种是盘状的，另一种更接近球分布；而既然与总质量相比盘物质的中心聚度更高，那么在可见星系的相当大区域内盘物质成分必然占主导地位。

1996 年, Persic 等人<sup>[18]</sup>利用大样本 S 星系的自转曲线, 讨论了星系光度与暗物质的关系, 其中引入若干表征自转曲线斜率的参数, 以对问题作定量分析, 并得出以下主要结论: (1) 在约  $2R_{\text{opt}}$  范围内的任何地方, 发光物质完全无法说明星系的运动学特征 (自转曲线轮廓), 或者说暗物质必然存在; (2) 暗物质在星系总质量中所占的比例随中心距的增大而增大; (3) 在任意归一化中心距 ( $R/R_{\text{opt}}$ ) 处, 上述占比随星系光度的减小而增大, 对光度最大的星系这一占比至少为 15%, 而光度最小的星系占比可高达约 85% (对于某些矮星系和低面亮度星系这一数字甚至可达 95%<sup>[81]</sup>); (4) 暗物质的密度轮廓与恒星盘迥异, 其中心聚度比可见物质小得多, 在  $2R_{\text{opt}}$  处两种成分的密度之比, 要比  $R_{\text{opt}}$  处的相应值大 10~30 倍。

在有关 S 星系质量分布的理论模型中, 通常假设星系物质有 4 种结构成分: 盘、核球、(发光的) 晕, 以及大质量非重子暗物质晕, 其中后者大致呈球状分布。自转曲线为检验星系质量模型提供了观测约束, 这就是说理论模型必须对观测自转曲线做出合理解释, 暗物质晕即由此应运而生——如果不存在大质量暗晕, 那么星系外区物质的转动速度必然会呈现开普勒式减小 (Keplerian fall-off), 即  $V(R) \propto R^{-1/2}$ , 自转曲线轮廓不可能表现为平坦状。显然, 这种主流观点隐含了一个前提: 星系的运动学状态完全取决于星系的引力场。

尽管暗晕的介入能较好地说明 S 星系外区的平坦状自转曲线, 但不同观点依然存在。例如, 1988 年 Nelson<sup>[113]</sup>明确提出, 暗晕假设可能是错误的, 他认为可以用非引力因素的作用——星际磁场来合理解释星系外区自转曲线轮廓的特征, 并从理论上作了说明; Nelson 的上述论点得到了一些人的支持。Battaner 等人<sup>[114]</sup>于 1992 年通过理论计算后指出, 磁张力 (magnetic tension) 能使气体聚合在一起, 并迫使其转得比纯引力作用下的转速更快; 对于像 M31 这样的星系, 约需要  $6 \times 10^{-10}$  T 强度的磁场。不过, 至少从目前来看, 星际磁场说显然未能成为相关研究领域的主流观点。

即使在纯引力作用的框架内, 进入 21 世纪以来的一些工作亦对星系结构的经典观念提出了挑战——在星系质量模型内, 无需引入球状暗晕成分, 也能对大部分星系的自转特征做出很好的预言<sup>[115,116]</sup>; 或者用一种简单的纯盘模型即可合理解释观测自转曲线的轮廓特征<sup>[110,111,117]</sup>。Jařocha 等人<sup>[111]</sup>认为, 非重子暗物质的成团尺度是星系团, 但在小尺度上这种物质的密度有可能很低, 它们在 S 星系质量中的占比远小于球状暗晕模型的预期值。另外, 也不能排除暗物质的多寡因星系而异的可能性——有的星系会含有较多的暗物质, 有的星系也许就没有暗物质; 对于后一种情况, 为解释观测自转曲线轮廓, 暗晕模型就显得不如简单的盘模型。

由上述简要讨论可知, 关于星系自转曲线的理论解释——构筑星系结构的质量模型, 看来还有很多工作要做。

## 参考文献:

- [1] Sofue Y, Rubin V. *ARA&A*, 2001, 39: 137
- [2] Slipher V M. *Lowell Obs. Bulletin*, 1914, 2: 66
- [3] Pease F G. *PASP*, 1915, 27: 133
- [4] Pease F G. *PASP*, 1915, 27: 134
- [5] Slipher V M. *Pop. Astr. Northfield Minu.* 1915, 23: 21
- [6] Pease F G. *PASP*, 1916, 28: 191
- [7] Pease F G. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1918, 4: 21
- [8] Mayall N U. *AnAp*, 1960, 23: 344
- [9] Mayall N U, Lindblad P O. *A&A*, 1970, 8: 364
- [10] Roberts M S. *IAUS*, 1975, 69: 311
- [11] van der Kruit P C, Allen R J. *ARA&A*, 1978, 16: 103
- [12] Roberts M S, Rots A H. *A&A*, 1973, 26: 483
- [13] Mayall N U. *AJ*, 1948, 54: 44
- [14] Zasov A V, Kyazumov G A. *SvA*, 1983, 27: 384
- [15] Kyazumov G A. *SvA*, 1984, 28: 496
- [16] Mathewson D S, Ford V L, Buchhorn M. *ApJS*, 1992, 81: 413
- [17] Persic M, Salucci P. *ApJS*, 1995, 99: 501
- [18] Persic M, Salucci P, Stal F. *MNRAS*, 1996, 281: 27
- [19] Mathewson D S, Ford V L. *ApJS*, 1996, 107: 97
- [20] Babcock H W. *Lick Obs. Bulletin*, 1939, 19: 41
- [21] Rubin V C, Ford W K Jr. *ApJ*, 1970, 159: 379
- [22] Roberts M S, Whitehurst R N. *ApJ*, 1975, 201: 327
- [23] Burbidge E M, Burbidge G R. *ApJ*, 1960, 132: 30
- [24] Burbidge E M, Burbidge G R, Prendergast K H. *ApJ*, 1960, 136: 704
- [25] King I R, Minkowski R. *ApJ*, 1966, 143: 1002
- [26] Peterson C. *Stellar motions in elliptic galaxies*, PhD. Thesis. Berkeley: Univ. of Calif., 1975
- [27] Rubin V C, Ford W K Jr, Thonnard N. *ApJ*, 1978, 225: L107
- [28] Rubin V C, Burstein D, Ford W K Jr, et al. *ApJ*, 1985, 289: 81
- [29] Rubin V C, Ford W K Jr, Thonnard N. *ApJ*, 1980, 238: 471
- [30] Rubin V C, Ford W K Jr, Thonnard N. *ApJ*, 1982, 261: 439
- [31] Amram P, Le Coarer E, Marcelin M, et al. *A&AS*, 1992, 94: 175
- [32] Amram P, Marcelin M, Balkowski C, et al. *A&AS*, 1994, 103: 5
- [33] Corradi R L M, Boulesteix J, Bosma A, et al. *A&A*, 1991, 244: 27
- [34] Rubin V C. *IAUS*, 1979, 84: 211
- [35] Tecza M, Thatte Nm Maiolino R. *IAUS*, 2001, 205: 216
- [36] Faber S M, Gallagher J S. *ARA&A*, 1979, 17: 135
- [37] van de Hulst H C, Raimond E, van Woerden H. *BAN*, 1957, 14: 1
- [38] Huchtmeier W K. *A&A*, 1975, 45: 259
- [39] Bosma A. *AJ*, 1981, 86: 1825
- [40] Sofue Y. *ApJ*, 1996, 458: 120
- [41] Burton W B, Gordon M A. *A&A*, 1978, 63: 7
- [42] Young J S, Schloerb F P, Kenney J, et al. *ApJ*, 1986, 304: 443
- [43] Sofue Y, Tomita A, Honma M, et al. *PASJ*, 1999, 51: 737
- [44] Sofue Y, Tutui Y, Honma M, et al. *ApJ*, 1999, 523: 136
- [45] Sofue Y, Koda J, Nakanishi H, et al. *PASJ*, 2003, 55: 59
- [46] Onodera S, Koda J, Sofue Y, et al. *PASJ*, 2004, 56: 439
- [47] Koda J, Sofue Y. *PASJ*, 2006, 58: 299



- [48] Sofue Y. *ASPC*, 2008, 396: 27
- [49] Brosche P. *A&A*, 1971, 13: 293
- [50] Humason M I. *ApJ*, 1936, 83: 10
- [51] Mayall N U. *Lick Obs. Bulletin*, 1939, 19: 33
- [52] Humason M, Mayall N U, Sandage A R. *AJ*, 1956, 61: 97
- [53] Mayall N U. *IAUS*, 1958, 5: 23
- [54] Burbidge E M, Burbidge G R, Prendergast K H. *ApJ*, 1960, 132: 654
- [55] Burbidge E M, Burbidge G R, Prendergast K H. *ApJ*, 1960, 132: 661
- [56] Burbidge E M, Burbidge G R, Prendergast K H. *ApJ*, 1962, 136: 119
- [57] Pence W D. *ApJ*, 1981, 247: 473
- [58] Reakes M. *MNRAS*, 1980, 192: 297
- [59] Alves D R. *ApJ*, 2000, 542: 789
- [60] Garrido O, Marcelin M, Amram P, et al. *A&A*, 2002, 387: 821
- [61] Garrido O, Marcelin M, Amram P, et al. *A&A*, 2003, 399: 51
- [62] Weldrake D T F, de Blok W J G, Walter F. *MNRAS*, 2003, 340: 12
- [63] Garrido O, Marcelin M, Amram P. *MNRAS*, 2004, 349: 225
- [64] Stanimirović S, Staveley-Smith L, Jones P A. *ApJ*, 2004, 604: 176
- [65] Garrido O, Marcelin M, Amram P. *MNRAS*, 2005, 362: 127
- [66] Epinat B, Amram P, Marcelin M, et al. *MNRAS*, 2008, 388: 500
- [67] Epinat B, Amram P, Marcelin M. *MNRAS*, 2008, 390: 466
- [68] Walker M F. *ApJ*, 1962, 136: 695
- [69] Demoulin M -H. *ApJ*, 1970, 160: L79
- [70] Morton D C, Chevalier R A. *ApJ*, 1972, 174: 489
- [71] Morton D C, Chevalier R A. *ApJ*, 1973, 179: 55
- [72] Bertola F, Capaccioli M. *ApJ*, 1975, 200: 439
- [73] Peterson C J. *ApJ*, 1978, 222: 84
- [74] Carter D, Jenkins C R. *MNRAS*, 1993, 263: 1049
- [75] Noordermeer E, van der Hulst J M, Sancisi R, et al. *MNRAS*, 2007, 376: 1513
- [76] Roberts M S. *Galaxies and the Universe*, Sandage A, et al, eds. Chicago: Univ. Chicago Press, 1975: 309
- [77] Burbidge E M, Burbidge G R. *Stars and the Stellar Systems IX.*, Sandage A, et al, eds. Chicago: Univ. Chicago Press, 1975: 81
- [78] Persic M, Salucci P. *ApJ*, 1991, 368: 60
- [79] Roscoe D F. *A&A*, 1999, 343: 697
- [80] Roscoe D F. *A&A*, 1999, 343: 788
- [81] Kravstov A V, Klypin A A, Bullock J S, et al. *ApJ*, 1998, 502: 48
- [82] Verheijen M A W. *ASPC*, 1997, 117: 190
- [83] Dressler A. *ARA&A*, 1984, 22: 185
- [84] Cayatte V, van Gorkom J H, Balkowski C, et al. *AJ*, 1990, 100: 604
- [85] Burstein D, Rubin V C, Ford Jr, W K, et al. *ApJ*, 1986, 305: L11
- [86] Rubin V C, Whitmore B C, Ford Jr. *ApJ*, 1988, 333: 522
- [87] Whitmore B C, Forbes D A, Rubin V C. *ApJ*, 1988, 333: 542
- [88] Whitmore B C, Forbes D A. *ApSS*, 1989, 156: 175
- [89] Distefano A, Rampazzo R, Chincarini G, et al. *A&AS*, 1990, 86: 7
- [90] Amram P, Sullivan III W T, Balkowski C, et al. *ApJ*, 1993, 403: L59
- [91] Sperandio M, Chincarini G, Rampazzo R, et al. *A&AS*, 1995, 110: 279
- [92] Rubin V C, Waterman A H, Kenney J D P. *AJ*, 1999, 118: 236
- [93] Rubin V C, Haltiwanger J. *ASPC*, 2001, 230: 421
- [94] Jaloča J, Bratek L, Kutschera M, et al. *MNRAS*, 2010, 407: 1689
- [95] Fraternali F, van Moorsel G, Sancisi R, et al. *AJ*, 2002, 123: 3124
- [96] Barbieri C V, Fraternali F, Oosterloo T, et al. *A&A*, 2005, 439: 947

- [97] Heald G H, Rand R J, Benjamin R A, et al. ApJ, 2006, 636: 181
- [98] Heald G H, Rand R J, Benjamin R A, et al. ApJ, 2006, 647: 1018
- [99] Heald G H, Rand R J, Benjamin R A, et al. ApJ, 2007, 663: 933
- [100] Levine E S, Heiles C, Blitz L. 2008, ApJ, 679: 1288
- [101] Barbieri C V, Fraternali F, Oosterloo T, et al. A&A, 2005, 439: 947
- [102] Matthews L D, Wood K. ApJ, 2003, 593: 721
- [103] Oosterloo T, Fraternali F, Sancisi R. AJ, 2007, AJ, 134: 1019
- [104] Fraternali F. IAUS, 2009, 254: 255
- [105] Jałocha J, Bratek Ł, Kutschera M, et al. MNRAS, 2011, 412: 331
- [106] Ostriker J P, Peebles P J E. ApJ, 1973, 186: 467
- [107] Ostriker J P, Peebles P J E, Yahil A. ApJ, 1974, 193: L1
- [108] Kravtsov A V, Klypin A A, Bullock J S, et al. ApJ, 1998, 502: 48
- [109] McGaugh S S, Rubin V C, de Blok W J G. AJ, 2001, 122: 2381
- [110] Jałocha J, Bratek Ł, Kutschera M. ApJ, 2008, 679: 373
- [111] Jałocha J, Bratek Ł, Kutschera M, et al. MNRAS, 2010, 406: 2805
- [112] Cardone V F, Capone M, Radicella N, et al. MNRAS, 2012, 423: 141
- [113] Nelson a H. MNRAS, 1988, 233: 115
- [114] Battaner E, Garrido J L, Membrado M, et al. Nature, 1992, 360: 652
- [115] Palunas P, Williams T B. AJ, 2000, 120: 2884
- [116] Williams T B, Bureau M, Cappellari M. MNRAS, 2009, 400: 1665
- [117] Bratek Ł, Jałocha J, Kutschera M. MNRAS, 2008, 391: 1373

## Developments in Observations and Studies of Rotation Curves of 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:** The rotation curve of a galaxy describes how the rotational velocity  $V(R)$  of its matter depends on the distance  $R$  from the galaxy center, and represents evidence for the mass distribution within the galaxy and can be used for studying its kinematics and dynamics characteristics and inferring its evolutionary history. Both optical and radio observations of rotation velocities within galaxies can be used to derive their  $V(R)$ , by using absorption lines such as H and K lines and emission lines such as  $H\alpha$ , HI and CO lines. A brief review of developments in observations and studies of rotation curves of galaxies is given in this paper.

Generally speaking, the  $V(R)$  curve increases monotonically and steeply in the central region of a galaxy out to a distance  $R_t$  of the turnover point, at which the  $V(R)$  reaches a maximum value  $V_{\max}$ , and beyond  $R_t$  the velocity either remains constant or varies gradually with a small amplitude, which is usually called as the flat rotation curve.

The major researches on rotation curves have been done for spiral galaxies. It has been found that the maximum velocity  $V_{\max}$  increases from the late type spirals to early ones, which are of some 300,220 and 175  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  respectively for Sa, Sb, and Sc galaxies. Besides normal spirals, galaxies with various Hubble types also show rotations in some way, including barred spiral, elliptical, lenticular and irregular galaxies.

Since the 1970s the difference between the matter distribution implied by the luminosity and that implied by the flat rotation curve has been used as strong evidence that galaxies are embedded in extended halos of dark matter, because without such massive dark halos, rotation velocities in the outer regions of galaxies should show the Keplerian falloff. However, some people argue such an explanation for the flat rotation curve, and believe that the models without dark matter are also able to satisfactorily reproduce the observed kinematics in most cases. Moreover, someone pointed out that there is also a possibility that the rotation of galaxies in the outmost regions could be derived by a non-gravitational effect—magnetic fields, not gravitationally by dark matter.

In addition to what mentioned above, some important issues on rotation curves of galaxies are briefly described or discussed. These include (1) Is there a universal rotation curve for spirals, which means that the profiles of rotation curves of spirals are dependent upon the unique globe parameter—galaxy luminosity? (2) Environmental effects on rotation curves of galaxies in clusters, such as distances of galaxies from the cluster center and gravitational interaction among galaxies. (3) The vertical changes of galaxy rotation curves, i.e. a vertical gradient or falloff in rotation speed from the mid-plane of a galaxy. (4) Exploring the distribution of dark matter in galaxies from studies on rotation curves, and the distribution is very likely different from galaxy to galaxy.

**Key words:** galaxy; spiral galaxy; rotation curve; neutral hydrogen; dark halo