

文章编号: 1000-8349(2010)02-164-15



# Tully-Fisher 关系之研究进展

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** Tully-Fisher 关系 (TF 关系) 对于宇宙距离尺度和星系演化研究具有重要意义。对 TF 关系的发现史和嗣后的研究进展做了简要的评述, 包括红外波段的 TF 关系、星系倾角问题、影响 TF 关系的若干因素、透镜星系的 TF 关系、重子 TF 关系、TF 关系的宇宙学演化等。

**关键词:** TF 关系; 晚型星系; 星系演化

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

1977 年, Tully 和 Fisher<sup>[1]</sup> 通过对本星系群、M81 星系群和 M101 星系群中 10 个近距旋涡星系样本的分析表明, 这些星系的绝对星等 (光度) 与自转速度之间存在某种很好的相关关系, 其基本形式为

$$M = \alpha \lg V_0 + \beta, \quad (1)$$

称为 Tully-Fisher 关系 (TF 关系)。式中  $M$  为星系的绝对星等, 由观测视星等和距离推得;  $V_0$  为 21 cm 射电观测所得到的星系 HI 盘的圆运动速度, 可由多普勒致宽效应引起的谱线宽度  $W$  推得, 或者亦可由星系自转曲线求得;  $\alpha$  和  $\beta$  为常参数, 又称 TF 参数。这里, 还需就星系的倾角  $i$  以及星系内恒星非正圆轨道引起的随机运动  $V_{\text{rand}}$  对  $V_0$  加以改正, 有<sup>[15]</sup>

$$V_0 = (V_c - V_{\text{rand}}) / \sin i, \quad (2)$$

式中  $V_c$  是观测值, 而  $V_0$  的含意是把任意倾角星系的自转速度改正到侧向状态后的相应值, 对于侧向星系有  $i = 90^\circ$ , 而正向星系为  $i = 0^\circ$ 。

**收稿日期:** 2009-07-24; **修回日期:** 2009-11-24

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目 (10773020); 重点资助项目 (10778003,10833005)

显然, 式 (1) 的表观形式与造父变星周光关系  $M = \alpha \lg P + \beta$  完全一样, 不同的是以星系气体盘的自转速度  $V_c$ , 取代了变星的光变周期  $P$ 。只要对若干已知距离的星系测定其绝对星等和自转速度, 便可确定关系式 (1) 中的 TF 参数  $\alpha$ (斜率) 和  $\beta$ (零点), 即对 TF 关系作绝对定标。于是, 对于未知距离的星系来说, 就可以根据式 (1), 利用线宽  $W$  或自转曲线所推得的最大自转速度  $V_c$  来确定星系的绝对星等  $M$ , 并进而由下式推算星系的距离  $r$ :

$$(m - M)_0 = 5 \lg r - 5, \quad (3)$$

这里  $m$  是星系的视星等,  $(m - M)_0$  是已经过银河系消光改正后的距离模数。

Tully 和 Fisher 利用他们所导出的关系  $(M_{pg})_0 = -3.5 - 6.25 \lg V_0$  (见图 1), 推算了室女团和大熊团的距离, 得出这两个团的距离模数  $(m - M)_0$  分别为  $30.6 \pm 0.2$  和  $30.5 \pm 0.35$  [1]。

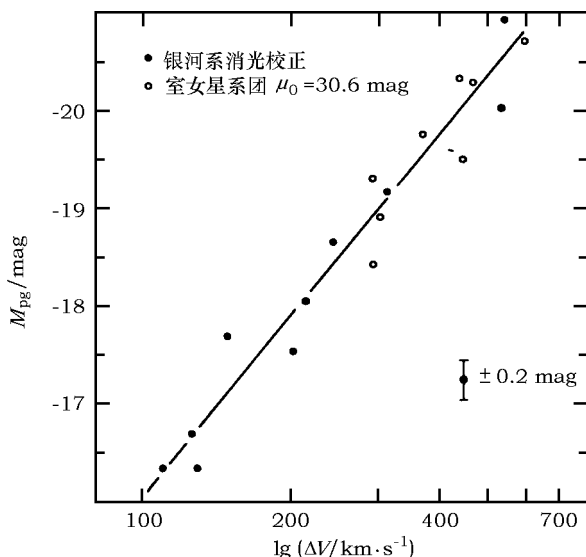


图 1 Tully-Fisher 得到的绝对照相星等 - 自转速度关系 [1]

从历史上看, 早在 20 世纪 20 年代初, Öpik<sup>[2]</sup> 就已尝试用类似的方法来估计 M31 的距离, 但 Hubble 对此并未予以认可<sup>[3]</sup>。嗣后的一些工作表明, 已有人渐而注意到这样一个事实: 对晚型旋涡星系和不规则星系来说, 星系 HI 轮廓的线宽与光度之间存在某种关系, 但研究者并未利用这种关系来确定星系的距离<sup>[4~7]</sup>。

显然, 由 TF 关系确定的星系距离可归类于光度距离, 又因为该方法需要用到星系的自转速度, 故亦称运动学距离, 而 TF 关系又可称为光度 - 线宽关系 (luminosity-line width relation)。这是天体距离的一种相对测定方法, 除观测量的测定精度外, 星系测距结果的准确程度还取决于标距关系 (即 TF 关系) 的弥散度, 星际消光值的不确定性, 以及参数  $\alpha$  和  $\beta$  的定标精度等多方面因素。鉴于旋涡星系和不规则星系在许多星系团和团外场区中普遍存在, TF 关系的发现为测定河外星系的距离开辟了一条有效的途径, 适用范围最远可超过 30 亿光年; 进而可研究这一范围内宇宙的大尺度结构、哈勃流和与之有关的星系本动速度, 以及盘状星系的动力学演化等。另一方面, 由于银河系附近分布的主要是旋涡星系和不规则星系, 可以利用造

父变星直接对 TF 关系进行绝对定标。由 TF 关系确定的星系距离与星系的红移无关 (即与星系的宇宙学距离无关), 也与 Ia 型超新星作为标准烛光所得到的星系距离无关, 它提供了一种独立的星系相对测距方法, 因而迅速引起人们的广泛关注, 并很快对之开展多方面的深入研究, 甚至出现了引文 [8] 的发表年份竟先于文献 [1] 正式发表日的罕见情况。

1977 年以来对 TF 关系的探究和应用大致表现为以下几方面: (1) 红外测光资料的应用; (2) 星系倾角对观测视星等的影响; (3) 可能影响到 TF 关系的因素; (4) 透镜星系的 TF 关系; (5) 重子 TF 关系; (6) 演化问题。

## 2 红外波段的 TF 关系

Aaronson 等人<sup>[9]</sup>首先考虑到通过星系的红外测光取代可见光观测, 来改进 TF 关系。他们指出, 在建立 TF 关系并用于星系距离测定时, 必须对一些观测量加以必要的改正, 而鉴于晚型旋涡星系特征各异, 此类改正的不确定性会对结果带来误差。在这些改正因素中, 星际介质消光对星系测光值的影响尤为重要。这种影响又表现为两个方面, 即被测星系内部的消光  $A_i$  (与星系倾角  $i$  的大小有关) 和银河系消光  $A_b$  (与星系的银纬  $b$  统计相关), 而根据 Sandage 和 Tammann<sup>[8]</sup>的工作, 前者对蓝色星等的影响甚至可能超过 1 mag。

为了尽可能减小星系内部消光  $A_i$  的影响, Aaronson 等人<sup>[9]</sup>在  $H(1.6 \mu\text{m})$  波段上对 TF 关系开展了相关的研究。他们意识到, 对红外测光来说  $H$  波段的信噪比最高, 而  $H$  波段的消光值仅为  $B$  波段的 10% 左右 ( $R$  和  $I$  波段的相应值分别为 61% 和 44%<sup>[10]</sup>);  $H$  波段上星系的辐射实际上主要来自晚型巨星, 很少 / 甚至不会受到尘埃或气体发射的影响; 对不同类别的晚型星系来说, 与  $B$  波段光度相比, 红外辐射都能更好地表征星系中恒星的质量。Aaronson 等人<sup>[9]</sup>利用室女团和大熊团中 29 个旋涡星系的  $H$  波段观测, 得出了弥散度更小的光度 - 线宽关系, 也就是红外 TF 关系 (IRTF 关系)。Jacoby 等人<sup>[11]</sup>在有关的评述中对 Aaronson 等人的工作给以充分的肯定。

嗣后, 不少作者对不同波段的 TF 关系进行了探讨, 并在此基础上开展了深入的研究。1980 年, Mould 等人<sup>[12]</sup>利用倾角  $i > 45^\circ$  的亮旋涡星系样本确定了室女团的距离。同年, Aaronson 等人<sup>[13]</sup>利用 IRTF 关系确定了 4 个星系团的距离, 测距范围约为室女团距离的 4 倍, 并进而估计了哈勃常数  $H_0$  值。1988 年, Pierce 和 Tully<sup>[14]</sup>利用大熊星系团内完备星系样本的 CCD 测光资料发现,  $B$ 、 $R$  和  $I$  波段 TF 关系的弥散度分别为 0.37、0.31 和 0.28 mag。1992 年, Pierce 和 Tully<sup>[10]</sup>又由 15 个近距星系样本, 得到了  $B$ 、 $R$ 、 $I$  和  $H$  共 4 个波段的 TF 关系 (见图 2), 结果表明  $H$  波段的 IRTF 关系最为密切 (即弥散度最小)。20 世纪末, Binney 和 Merrifield<sup>[15]</sup>对有关工作做了简要的总结。

近年来, 许多人深入探究了包括可见光在内的多波段 TF 关系, 并进而用于相关的研究。例如, 2003 年 Iodice 等人<sup>[16]</sup>利用 16 个极环星系 (polar ring galaxy) 的可见光和近红外观测资料, 研究了  $B$  和  $K$  波段的 TF 关系, 并对暗物质晕的形状作了讨论。2006 年, Badregal 等人<sup>[17]</sup>利用  $B$  和  $K_S$  波段观测资料, 讨论了 S0 星系的 TF 关系。2007 年, de Rijcke 等人<sup>[18]</sup>利用  $B$  和  $K$  波段观测资料, 探讨了 TF 关系对早型和晚型星系的普适性问题。2008 年, Masters 等人<sup>[19]</sup>利用 2MASS 资料, 详细研究了  $J(1.2 \mu\text{m})$ 、 $H$  和  $K_S(2.2$

$\mu\text{m}$ ) 波段的 TF 关系, 并进而讨论了 TF 关系与星系形态的关系。同年, Meyer 等人<sup>[20]</sup> 研究了  $B$  和  $K$  波段的 TF 关系的斜率和弥散度, 发现这两个波段 TF 关系的观测弥散度分别为 0.40 mag 和 0.33 mag, 内禀弥散度分别为 0.33 mag 和 0.25 mag。

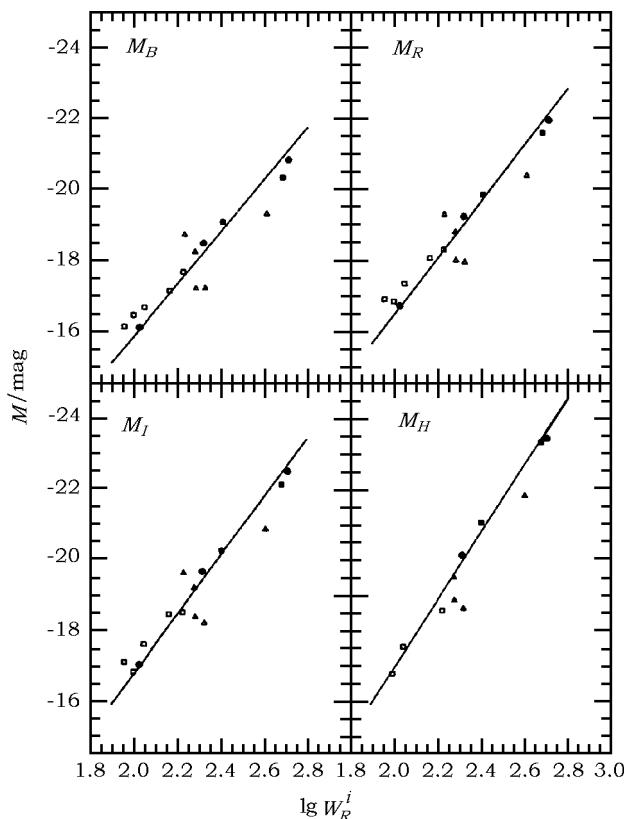


图 2 4 个不同波段的 TF 关系

不同符号对应不同星系群中的星系<sup>[10]</sup>。纵坐标为绝对星等, 横坐标  $W_R^i$  是与多普勒致宽效应有关的量<sup>[15]</sup>。

另一方面, 红外波段的银河系消光改正  $A_b$  也明显比可见光波段小, 例如  $V$ 、 $J$ 、 $H$  和  $K_S$  波段的消光比率分别为 3.1、0.92、0.59 和 0.38, 因而 IRTF 关系更适用于  $|b|$  较小的星系<sup>[20,21]</sup>。不过, 观测视星等的宇宙学改正(即  $k$  改正)与波长的关系较为复杂, 以  $R$  波段  $k_R(z) = 0.35z$  为最小(这里  $z$  为红移);  $K_S$  波段  $k_{K_S}(z) = -3.06z$  为最大, 即使对不太远的星系(如  $z \approx 0.04$ ) 来说该项改正可超过 0.1 mag, 因而必须加以考虑<sup>[20]</sup>。

### 3 星系倾角的计算和消光改正

TF 关系中涉及了 2 个基本观测量: (1) 星系视星等  $m$ , 用以表征星系的光度, 且与星系的距离有关; (2) HI 21 cm 谱线宽度  $W$ , 用以推算星系的自转速度, 与星系距离无关。上述 2 个参数的原始观测值都必须就星系倾角  $i$  产生的观测效应加以改正, 其中对观

测星等  $m$  是作内部消光改正, 对线宽  $W$  是作投影改正, 而这两项改正值的大小与倾角  $i$  间的关系是反向的。

显然,  $i$  越小, 即星系盘面越是接近正向, 由内部消光  $A_i$  引起的、对视星等的改正就越小。另一方面, 由式 (2) 可知, 星系的倾角  $i$  越小,  $V_0$  的确定误差越大。因此可见, 为了能对基本观测量取得较为可靠的改正, 须充分注意样本星系的合理选取。例如, 为尽可能减小倾角对改正值确定精度的影响, Tully 和 Fisher 当初所选用的定标星系均满足  $80^\circ > i > 50^\circ$ <sup>[1]</sup> 在最近的一项工作中, Meyer 等人<sup>[20]</sup> 则取  $i > 45^\circ$  的星系作为分析用的样本。

倾角  $i$  通常按下式计算:

$$\cos^2 i = \frac{(b/a)^2 - (b/a)_{90}^2}{1 - (b/a)_{90}^2}, \quad (4)$$

其中  $a$ 、 $b$  分别为星系盘的长、短轴,  $(b/a)$  即为轴比, 而  $(b/a)_{90}$  为侧向星系的轴比。在 Meyer 等人<sup>[22]</sup> 的工作中取  $(b/a)_{90} = 0.12$ <sup>[20]</sup>, 而轴比  $(b/a)_{90} < 0.12$  的星系均视作为侧向星系。

为了计算内部消光  $A_i$ , 需要就星系盘中消光物质的分布建立某种模型, 同时设定旋涡星系和不规则星系均为光薄天体。就光薄模型而言通常又可分为三类: (1) 发光恒星与尘埃均匀混合; (2) 尘埃位于一无限薄的消光层内; (3) 尘埃位于有限厚度的消光层内, 而该层只占发光恒星所在天区的一部分。在上述双成分模型中以模型 (3) 较为合理, 相应的内部消光改正为<sup>[11]</sup>

$$A_i = -2.5 \lg \left[ f(1 + e^{-\tau \sec i}) + (1 - 2f) \left( \frac{1 - e^{-\tau \sec i}}{\tau \sec i} \right) \right], \quad (5)$$

式中  $\tau$  为光深。参数  $f$  是发光恒星天区中未被尘埃层遮蔽部分所占的比例, 当  $f = 0.5$  时即退化为最简单的无限薄尘埃层模型, 这时有<sup>[23]</sup>

$$A_i = -2.5 \lg \left[ 0.5(1 + e^{\tau \sec i}) \right]. \quad (6)$$

参数  $\tau$  和  $f$  需借助宽波段范围的星系面测光来加以确定, 如 Tully 和 Fouqué<sup>[23]</sup> 曾采用  $\tau \approx 0.55$  和  $f \approx 0.25$  ( $B$  波段)。

## 4 影响 TF 关系的一些表观因素

### 4.1 观测波段

TF 关系一经提出, 很快引起人们的广泛关注和深入研究。随着红外观测资料的应用, 有人开始注意到 TF 参数中的斜率  $\alpha$  与观测波段间的关系。1979 年, Aaronson 等人在他们的工作中指出, 红外波段 TF 关系中的斜率 ( $-\alpha \approx 9.5$ ) 明显要比可见光波段 ( $-\alpha$  在  $6 \sim 7$  间)<sup>[1,8]</sup> 来得陡。翌年, Rubin 等人<sup>[24]</sup> 则对之提出了相反的看法。不久, Aaronson 等人<sup>[25]</sup> 通过本超星系团中 300 个晚型星系 (Sa-Im) 观测资料的分析, 重新确认斜率与观测波段有关——红外波段的  $\alpha$  值比蓝 ( $B$ ) 波段更陡。1983 年, Bottinelli 等人<sup>[26]</sup> 明确指出, 斜率  $\alpha$  是波长的连续函数, 并得出  $-\alpha$  值约从  $B$  波段的 5 变化为  $H$  波段的 10。1992 年, Pierce 和 Tully<sup>[10]</sup> 由星系团内 15 个旋涡星系和不规则星系样本, 得出  $B$ 、 $R$ 、 $I$  和  $H$  波段 TF 关系的斜率分别为  $-\alpha = 7.84$ 、 $8.23$ 、 $8.72$  和  $9.5$ , 这一结果与他们在 1988 年所得到的

数值略有不同<sup>[14]</sup>, 并被后人多次引用<sup>[11,15]</sup>。2007年, Pizagno 等人<sup>[27]</sup>由 162 个星系在  $g$ 、 $r$ 、 $i$  和  $z$  这 4 个波段取得的观测资料发现, TF 关系的斜率分别为  $-\alpha = 5.48$ 、 $5.96$ 、 $6.32$  和  $6.59$ 。最近, Masters 等人<sup>[19]</sup>通过对 2MASS 的  $J$ 、 $H$ 、 $K_S$  波段观测资料的细致分析, 同样得出斜率  $\alpha$  随波长而变陡的结论 (具体数值略有不同), 且随着波长的进一步增长, 斜率  $\alpha$  不再明显变化,  $-\alpha$  的渐近值为  $9\sim 10$ 。

由上述工作可以看出, TF 关系的斜率  $\alpha$  随波长而变陡已成定论。

#### 4.2 星系的形态类别

TF 关系是否与样本星系的形态类别有关, 这是人们所关心的另一个重要问题。Aaronson 等人<sup>[25]</sup>在 1983 年一项工作中的结论是, 在红外波段 TF 参数与星系形态之间并无显著的相关性, 在蓝波段也仅表现出有少许相关性。嗣后, 1988 年 Pierce 等人<sup>[14]</sup>的工作, 以及 1994 年 Bernstein 等人<sup>[28]</sup>的工作都证实了上述基本结论。另一方面, 尽管 Rubin 等人<sup>[29]</sup>曾于 1985 年宣称, Sa 和 Sc 星系  $I$  波段 TF 关系的斜率近乎相同, 但存在 1.5 mag 的零点差, 然而 1997 年 Giovanelli 等人<sup>[30]</sup>的工作表明, 这一偏差仅约为 0.3 mag。

2006 年, Master 等人<sup>[31]</sup>利用 31 个近距离星系团和星系群中大样本 (807 个) 旋涡星系的  $I$  波段资料, 讨论了 TF 关系参数与星系形态的关系。他们发现, 对于 Sa、Sb 和 Sc 星系, 斜率  $-\alpha$  分别为 5.52、7.07 和 7.87, 可见差异是明显的, 晚型旋涡星系 TF 关系的斜率较早型旋涡星系来得陡, 但它们之间却并不存在零点差。最近, Shen 等人<sup>[93]</sup>的工作看来支持了 Master 等人的结论, 尽管斜率  $-\alpha$  的具体数值不尽相同, 但变化趋势是一致的。近期工作与较早时期研究结果之间所存在的差异, 也许还需要更进一步的深入探究。

#### 4.3 星系的面亮度

随着观测技术的改进, 人们开始关注对低面亮度星系的研究, 其中包括讨论这类星系的 TF 关系。所谓低面亮度 (LSB) 星系, 通常是指那些中心区  $B$  星等面亮度不超过  $\mu_B(0) \approx 23 \text{ mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$  的星系。1995 年, Zwaan 等人<sup>[32]</sup>利用 42 个低面亮度星系的  $B$  波段观测资料率先讨论了它们的 TF 关系, 结果发现此类星系的 TF 关系与普通旋涡星系并无差异; 同年 Sprayberry 等人<sup>[33]</sup>的工作支持了这一观点。然而, 2000 年 O'Neil 等人<sup>[34]</sup>的工作则对此提出了质疑, 他们发现低面亮度星系明显偏离普通星系的 TF 关系。另一方面, 20 世纪末 Persic 等人<sup>[35]</sup>和 Matthews 等人<sup>[36]</sup>的工作表明, TF 关系低光度端 (相应于低面亮度星系) 呈现向下的弯曲状。2002 年, Chung 等人<sup>[37]</sup>详细地分析后认为, O'Neil 等人所发现的现象实际上并不存在。2003 年, Courteau<sup>[38]</sup>更是明确指出, 旋涡星系的 TF 关系与星系的面亮度无关, 也与是否有棒结构无关。

对于上述互相矛盾的结论有人已经给出了一些解释, 如样本的选择效应<sup>[36]</sup>、射电观测第一旁瓣内包括了一些明亮的伴星系<sup>[37]</sup>等。看来, 上述问题的最终解决, 无疑需要更多更好的观测资料。

#### 4.4 径向 TF 关系

2007 年, Yegorova 等人<sup>[39]</sup>仔细讨论了旋涡星系 TF 关系随中心距 (观测点到星系中心距离) 的变化特征, 即所谓“径向 TF (RTF) 关系”, 星系样本取自文献 [40~42], 计有 961 个旋涡星系。设定星系盘为指数薄盘, 标长为  $R_D$ , 并遵循 Persic 等人<sup>[43]</sup>的做法, 取  $R_0 = 3.2 R_D$  为表征星系物理尺度的特征半径 (星系在中心距小于  $R_0$  范围内的光度占星系总光度的 83%)。

作者就  $R_n = 0.2 nR_0 (n = 1, 2, \dots, 6)$ ，利用  $R_n \pm 0.1R_0$  (或  $R_n \pm 0.03R_0$ ) 范围内的观测点，分别确定 TF 关系的零点和斜率。结果发现，这两个 TF 参数都随着中心距的变化而呈现系统性变化 (参见图 3 及文献 [39] 中的有关列表)。

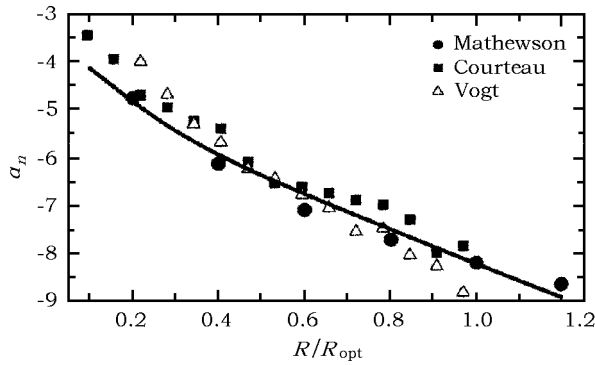


图 3 TF 关系的斜率随中心距的变化 [39]

横坐标为以  $R_0$  为中心距，纵坐标为斜率；不同符号代表了不同样本的结果，而实线为理论拟合曲线。

在上述结果的基础上，作者还对 RTF 关系的物理意义做了简要的讨论，其中包括星系结构、星系中的物质分布以及暗物质问题等。

## 5 透镜星系的 TF 关系

为了导出 TF 关系并用于星系距离的测定，样本星系 (亦称 TF 星系) 的合理选定至关重要。Jacoby 等人 [11] 指出，TF 星系必须含有能探测到的气体，且这些气体基本上应具有圆运动特征。鉴于早型 (E/S0) 星系中的气体往往呈块状分布而不易探测到，且可能表现为非圆运动，TF 星系最好选用无特殊形态的正常 Sb-Irr 星系。另一方面，对于低光度的不规则星系来说，星系中气体的运动学状态主要表现为局域性湍流而不是整体自转，当光度低于某一限值时 TF 关系将不再成立。据此，Jacoby 等 [11] 认为 TF 星系的光度应亮于  $M_B \approx -16$  mag，对更暗的星系，线宽改正会很大，而倾角也变得更难以确定。

透镜 (S0) 星系与旋涡星系同属盘状星系。不少作者认为，在星系团内旋涡星系中可以通过气体的潮汐剥离和冲压剥离过程演化为透镜星系 [44~46]。如果情况确实如此，那么这类过程是较为平稳的，对星系的光度和自转速度应无太大的影响，TF 关系仍然应该成立 [47]。

最早，Dressler 等人 [48] 在 1983 年的一项工作中认为，没有证据表明透镜星系存在 TF 关系。1999 年，Neistein 等人 [49] 深入地讨论了透镜星系在  $I$  波段上的 TF 关系，研究样本包括了 18 个近距透镜星系，倾角范围为  $i = 37^\circ \sim 76^\circ$ ，星系的距离则通过面亮度起伏测定来加以标定。他们发现，与晚型星系相比，透镜星系 TF 关系的绝对星等之零点偏差比较小 (对  $M_I$  约为 0.3 mag)，但内禀弥散度相对较大，对  $M_I$  约为 0.7 mag，对  $\lg V_c$  约为 0.15 dex。对此，Neistein 等人 [49] 给出的解释是，简单的气体剥离并非是形成透镜星系的唯一过程。

几年后，Mathieu 等人 [47] 的工作对上述观点提出了疑义。他们利用 6 个有较小核球的侧向透镜星系，在  $I$  和  $H$  两个波段上讨论了样本星系的 TF 关系，并与 Neistein 等人的结

果做了比较。因为样本较小而难以确定 TF 关系的斜率, 他们直接援用旋涡星系 TF 关系的斜率<sup>[10]</sup>, 结果发现尽管样本星系星等的系统偏差达 1.8 mag, 但弥散度仅约为 0.3 mag。除了考虑到两个样本在观测精度上的差异之外, Mathieu 等人<sup>[47]</sup>对之的解释是, 这些小核球(即以星系盘为主)的透镜星系是旋涡星系经气体剥离后形成的, 与全体透镜星系相比它们有着更好的 TF 关系。

最近, Williams 等人<sup>[54]</sup>利用  $K$  波段观测资料研究了旋涡星系和透镜星系的 TF 关系, 样本星系共有 28 个, 其中旋涡星系和透镜星系各 14 个, 经分析后得出的结果是, 这两类星系的 TF 关系并无显著的差异。由此可见, 迄今关于透镜星系 TF 关系的研究尚未能得出完全一致的结论。

实际上, 透镜星系的结构、运动学、测光和光谱性质因星系而差异甚大, 可谓是五花八门, 许多工作表明这类星系可能有两类主要的形成途径, 即旋涡星系通过对晕气体的有效剥离, 以渐进方式演化为透镜星系; 或者因为与另一个较小质量盘星系的并合, 前身旋涡星系快速转化为透镜星系<sup>[44,50,51]</sup>。

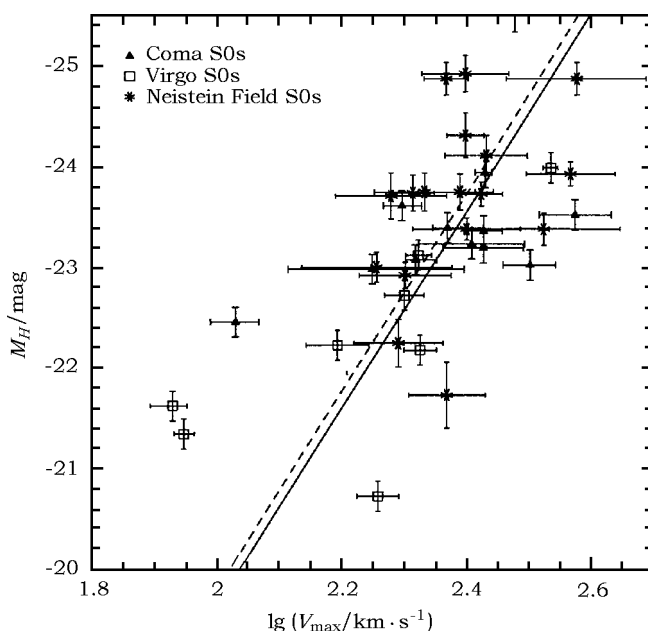


图 4 不同 S0 星系样本  $H$  波段的 TF 关系<sup>[52]</sup>

实线是晚型旋涡星系的 TF 关系拟合结果<sup>[10]</sup>; 虚线为 S0 星系的拟合结果; 斜率固定为与实线相平行。

2003 年, Hinz 等人<sup>[52]</sup>通过对透镜星系 TF 关系的分析, 讨论了该类星系的形成机制问题。在这项工作中, Hinz 等人选取的透镜星系观测样本是团星系的测光资料, 而不是前人所用的场星系, 从而能更可靠地确定样本星系的距离。在他们的透镜星系样本中, 既包括其观测的 10 个后发团星系和 8 个室女团星系资料, 又包括前人观测的 13 个后发团星系的资料<sup>[53]</sup>。Hinz 等人发现, 与晚型旋涡星系相比, 样本透镜星系  $I$  和  $H$  波段 TF 关系的光度偏差很小, 仅约为 0.2 mag, 但弥散度却比较大, 可达 1 mag 左右(见图 4)。据此 Hinz 等人认为, 今天



所观测到的性质各异的透镜星系可能有着不同的形成史，而不是只有晚型旋涡星系经气体剥离而演化为透镜星系的单一形成机制<sup>[53]</sup>。

## 6 重子 TF 关系

经典意义上的光学 TF 关系 (TFR) 亦称光度 - 自转速度关系。从定性上说，对这一关系通常理解为星系光度反映了星系质量的大小，而星系质量又与星系的圆运动速度  $V_c$  有着严格的比例关系<sup>[56]</sup>。1988 年，人们开始认识到 TF 关系之所以成立，是因为星系自转速度与盘的总重子质量相关，而后者是一种更为基本的关系<sup>[57]</sup>。重子质量  $\mu_b$  应该包括恒星质量  $\mu_s$  和气体质量  $\mu_{\text{gas}}$  两部分，即  $\mu_b = \mu_s + \mu_{\text{gas}}$ ，与  $\mu_s$  相关的 TF 关系称为恒星质量 TF 关系 (sTFR)，与  $\mu_b$  相关的 TF 关系称为重子 (或恒星 + 气体) 质量 TF 关系 (bTFR 或 gsTFR)，简称重子 TF 关系<sup>[58]</sup>。

2000 年，McGaugh 等人<sup>[56]</sup> 利用已发表的观测资料，对 50 多个星系的 sTFR 和 gsTFR 做了较为详细的对比研究。他们发现， $V_c$  不超过约  $90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  的那些暗星系在 sTFR 图上的位置，要明显低于由较亮星系导出的拟合直线 (见图 5(a))，或者说此类星系 TF 关系的斜率比亮星系来得陡。考虑到这些暗星系含有非常丰富的气体，作者利用观测得到的中性氢 (HI) 质量，推算出气体质量  $M_{\text{gas}}$ ，然后得出相应的 gsTFR 图 (见图 5(b))。显然，sTFR 图上暗星系位置偏低的现象，在 gsTFR 图上已不复存在。据此 McGaugh 等人<sup>[56]</sup> 认为，从本质上说 TF 关系反映了星系自转速度与盘的总重子质量之间的关系  $\mu_b \propto V_c^4$ ，而仅考虑星系中恒星质量的光学 TF 关系只是它的一种近似表述。

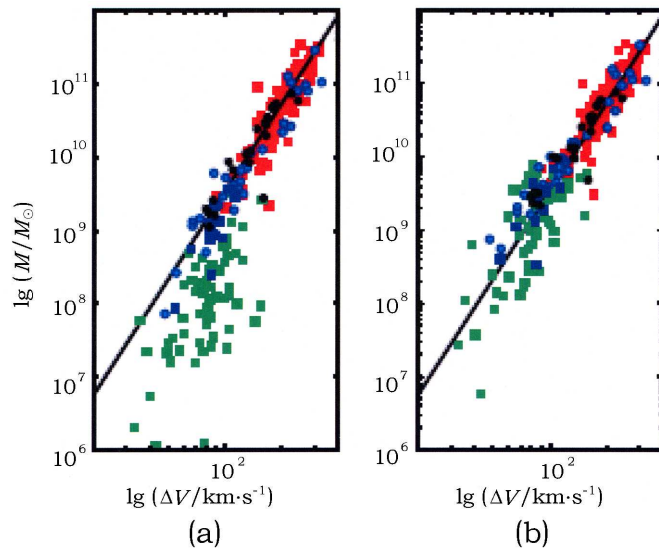


图 5 星系间的比较<sup>[56]</sup>

(a) 星系 sTFR, (b) bTFR; 横坐标为  $\Delta V$  ( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 纵坐标为质量  $M/M_\odot$ , 均以对数标度给出; 直线为红波段的拟合结果, 相关系数高达 0.92, 斜率约为 4。

继 McGaugh 等人的工作之后, 不少人对涉及重子 TF 关系的问题进行了多方面的探索<sup>[59~62]</sup>。如 2001 年 Bell 和 de Jong<sup>[59]</sup> 发现盘重子质量与星系自转速度间关系的斜率为 3.5, 而同年 Verheijen<sup>[60]</sup> 得出的斜率为 4, 与 McGaugh 等人<sup>[56]</sup> 的结果完全一致。

2006 年 Geha 等人<sup>[63]</sup> 利用 SDSS 资料中的 101 个星系, 研究了极低质量 (光度) 矮星系的重子 TF 关系。样本星系所处的环境相差甚巨, 有的位于致密星系群中, 而有些是完全孤立的场星系, 由 HI 线宽测得的该类星系的平均自转速度为  $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Geha 等人发现, 样本星系光学 TF 关系的弥散度显然要比重子 TF 关系的弥散度来得大; 进而利用一些较大质量的星系, 他们得出  $\mu_b - V$  关系的斜率为  $3.70 \pm 0.15$ <sup>[63]</sup>。

2007 年, de Rijcke 等人<sup>[58]</sup> 进一步研究了早型 (E) 和晚型 (S + Irr) 星系的 sTFR 和 gsTFR, 样本星系中既有巨星系又有矮星系, 这些星系在质量上的差异超过 3 个数量级<sup>[62,64~68]</sup>。他们发现, 尽管星系的质量差异很大, 但在 sTFR 图上早型和晚型星系都分布在低质量端 ( $\lg \mu_s \leq 9$ ) 向下弯曲的同一条曲线附近, 而在  $\lg \mu_s \approx 9.0 \sim 12.0$  范围内可用直线  $\lg \mu_s = (3.08 \pm 0.20) + (3.27 \pm 0.09) \lg V_c$  来拟合。另一方面, 在 gsTFR 图上,  $\lg \mu_s \approx 8.0 \sim 12.0$  范围内的早型和晚型星系都可以用同一条直线  $\lg \mu_b = (3.25 \pm 0.14) + (3.15 \pm 0.07) \lg V_c$  很好地拟合, 重子 TF 关系的斜率为  $3.70 \pm 0.15$ , 拟合精度好于质量 TF 关系中的直线部分<sup>[56]</sup>。de Rijcke 等人<sup>[58]</sup> 还发现, 在 gsTFR 图上矮椭圆星系的位置略偏于上述拟合直线的下方。对此他们给出的解释是, 与晚型星系相比, 早型矮星系因星系风和冲压剥离而损失了相当一部分气体。

最近, Stark 等人<sup>[55]</sup> 选取了 148 个满足  $\mu_{\text{gas}} > \mu_s$  的所谓“气体主导星系 (gas-dominated)”, 得出重子 TF 关系的斜率为  $(3.94 \pm 0.7) \pm 0.8$ , 零点为  $(1.79 \pm 0.26) \pm 0.25$  (这里分别给出了拟合结果的偶然误差和系统误差), 并用以推算“恒星主导 ( $\mu_s > \mu_{\text{gas}}$ ) 星系中的恒星质量。

## 7 TF 关系的演化问题

TF 关系反映了晚型星系在光度和极大自转速度之间的明显相关性, 可用于研究盘状星系的动力学演化和恒星演化史。例如, Eisenstein 等人<sup>[69]</sup> 就曾利用本地 TF 关系 ( $z = 0$ ) 弥散度非常小这一特征, 作为星系演化模型的重要观测约束。更重要的是, 追溯 TF 关系随红移的演化情况, 可探究星系演化和宇宙结构的形成史<sup>[70]</sup>。

1996 年, Vogt 等人<sup>[71]</sup> 率先对红移范围 0.1~1 的 9 个暗场星系进行了研究。他们发现, 与本地 TF 关系相比, 由运动学资料推算出的这些远星系的 B 波段光度仅高出约  $\Delta M_B \leq 0.6 \text{ mag}$ , 与 Forbes 等人<sup>[72]</sup> 得到的结果一致, 这里  $\Delta M_B$  是指远距离星系光度比本地星系光度增亮的部分。不久, Rix 等人<sup>[73]</sup> 和 Simart 等人<sup>[74]</sup> 利用不同的样本 (星系数分别为 24 和 22, 红移范围分别为 0.16~0.34 和 0.23~0.43) 却得出  $\Delta M_B \approx 1.5 \sim 2 \text{ mag}$ 。1999 年, Vogt<sup>[75]</sup> 对红移范围为 0.2~1 的 100 个盘状星系的研究, 发现与本地 TF 关系相比, 远星系 TF 关系的斜率和零点并无显著差异,  $\Delta M_B < 0.3 \text{ mag}$ 。显然, 上述对场星系的研究结果并不互相一致。

进入 21 世纪后, 对 TF 关系演化的探究趋于细化。2002 年, Ziegler 等人<sup>[70]</sup> 利用红移范围 0.1~1 的 60 个晚型场星系样本研究了 B 波段的 TF 关系, 发现大质量星系没有

表现出明显的演化效应,但最小质量星系之 TF 关系的斜率为  $-5.77 \pm 0.45$ , 与本地星系的斜率  $-7.92 \pm 0.18$  相比显得较为平坦。他们认为这可能有两方面原因:即星系的光度演化,以及在他们的样本中补充了一批红移约大于 0.2 的蓝星系样本; Ziegler 等人<sup>[70]</sup>还指出,之前所得到的不同结果也能用选择效应来解释。翌年, Kobulnicky 等人<sup>[76]</sup>通过对 64 个红移范围为  $0.26 < z < 0.82$  的场星系样本进行分析,也证实了上述光度演化与星系质量有关的现象。

2004 年, Böhm 等人<sup>[77]</sup>利用 113 个红移范围为  $0.1 < z < 1.0$  的晚型星系样本,进一步证实此类星系的光度演化与星系质量有关:最低质量星系的  $\Delta M_B$  最大可达约 2 mag, 而最大质量星系  $\Delta M_B$  的数值很小,甚至可忽略不计。

为了尽可能减小消光的影响,近年来人们开始用红外波段的 TF 关系来研究演化问题<sup>[77~79]</sup>。2005 年, Conselice 等人<sup>[78]</sup>利用 101 个红移范围  $0.2 < z < 1.2$  盘状星系,讨论了  $K$  波段 TF 关系和恒星质量 TF 关系,发现两者都未表现出演化效应。2006 年, Flores 等人<sup>[79]</sup>分析了 35 个  $0.4 < z < 0.75$  的星系的观测数据,结果表明从  $z = 0.6$  起,  $K$  波段 TF 关系和恒星质量 TF 关系在斜率、零点以及弥散度上都没有呈现演化效应。

另一方面,近期 Puech 等人<sup>[80]</sup>的工作却得出了不同的结果:从 65 个  $z \approx 0.6$  星系的分析,发现了  $K$  波段 TF 关系的零点演化,表明与本地星系相比,远星系光度减弱了  $\Delta M_B = (0.66 \pm 0.14)$  mag, 与前人的结论相反。对此, Puech 等人认为原因在于他们改进了本地 TF 关系,以及远星系自转速度测定精度的提高。

上文介绍的工作所用的星系样本都不太大。2006 年, Weiner 等人<sup>[81]</sup>利用大样本星系(在  $B$  波段约有 1 000 个星系,在  $J$  波段约有 670 个星系)讨论了 TF 关系的演化情况,红移范围为  $z = 0.4 \sim 1.2$ 。他们在两个波段都发现 TF 关系斜率的演化,与过去相比,目前大质量亮星系的光度要比小质量星系减小得更多,这一结果与 2002 年 Ziegler 等人<sup>[70]</sup>的结论恰好相反。

最近, Fernández-Lorenzo 等人<sup>[82]</sup>深入研究了  $B$ 、 $R$  和  $I$  波段 TF 关系的演化问题,共有 344 个星系,最大红移为  $z = 1.3$ 。他们的结论是 TF 关系呈现出光度演化的趋势,与具有相同自转速度的本地星系相比,过去的(大红移)星系的光度更大,且所有 3 个波段的零点差几乎相同:计算结果  $\Delta M = (1.0 \pm 0.15)$  mag, 与 Böhm 等人<sup>[77]</sup>和 Bamford 等人<sup>[83]</sup>的工作相一致。他们还认为,这一结果支持了盘状星系形成的坍缩模型,而不是吸积模型<sup>[82]</sup>。

除了以上代表性工作外,最近几年中还有不少人利用高红移星系来探究 TF 关系的演化<sup>[84~87]</sup>,但仍未取得一致的结论, Portinari 和 Sommer-Larsen<sup>[88]</sup>对有关情况做了较为全面的评述。

上述工作所用的星系样本都是场星系。2002 年, Metevier 等人<sup>[89]</sup>率先考察了远距离星系团的 TF 关系,7 个样本星系取自星系团 C10024,红移为  $z = 0.4$ 。结果没有发现星系团 TF 关系的斜率和零点有显著变化,但代表过去时期这一关系的弥散度要比本地 TF 关系来得大。2003 年, Milvang-Jensen 等人<sup>[90]</sup>利用 8 个  $z = 0.83$  的团内旋涡星系,以及 19 个  $z = 0.15 \sim 0.90$  场星系做了一项研究,发现对于确定的自转速度来说,团星系的光度要比场星系大  $0.5 \sim 1$  mag,这可能起因于团内旋涡星系在向星系团中心内落的过程中,有一段时间恒星形成率比较高,从而说明确实存在星系的光度演化。

2005 年, Bamford 等人<sup>[91]</sup>在 6 个星系团观测天区内选取了 80 个盘状星系(红移范围  $0.25 \leq z \leq 1$ ), 其中 58 个为场星系, 22 个为团星系。他们发现如果给定自转速度, 团星系光度比场星系大 ( $0.7 \pm 0.2$ ) mag, 与 Milvang-Jensen 等人<sup>[90]</sup>的结果一致。不过, Bamford 等人谨慎地指出, 这种差异究竟起因于光度演化还是星系自转速度的变化, 尚需进一步的工作来深入探讨。

鉴于团星系用于 TF 关系研究的样本星系数很少, 目前不足以就环境对 TF 关系的影响得出明确的结论。

除了以上实测研究, 近 10 年来一些作者对 TF 关系的起源和演化问题从理论上进行了探索。例如, 1999 年 Steinmetz 等人<sup>[92]</sup>借助高分辨率的宇宙学模拟, 研究了 TF 关系的起源问题。他们发现,  $z = 1$  时模型星系 TF 关系的  $B$  波段光度要比现在大约亮 0.7 mag, 与一些实测研究结果相符, 因而认为 TF 关系的斜率和相关性的密切程度可以在等级式宇宙模型中自然地得到解释。2007 年, Portinari 等人<sup>[88]</sup>通过对盘状星系形成和演化的宇宙学  $N$  体 + 流体动力学模拟, 发现在  $z = 0 \sim 1$  期间,  $B$  波段 TF 关系的斜率并没有演化, 但零点则约增亮 0.85 mag, 大致处于不同观测结果的中间值附近。Portinari 等人<sup>[88]</sup>还认为, 上述现象主要是一种光度效应, 而恒星质量 TF 关系则未出现明显的演化。但是, 这并不意味着个别星系内的恒星质量没有发生变化。 $z$  在  $1 \rightarrow 0$  期间单个星系的质量通常会增大 0.5~1 倍, 与之同时自转速度也相应地增大, 于是在 TF 图上星系位置的变化主要表现为沿着 TF 关系演化, 而质量 TF 关系本身(指它的零点和斜率)并不呈现出任何显著的演化效应。

毫无疑问, 涉及 TF 关系的研究课题颇为丰富, 工作亦渐而细化, 本文对之仅能给出简要评述而无法包含其全部内容。鉴于 TF 关系既是一种重要的标距关系, 可广泛用于测定远天体的距离尺度, 而且对于理解盘状星系的结构和演化殊为重要, 相信随着观测资料的不断累积, 相关研究将会进一步深入, 并取得更为明确的结论。

## 参考文献:

- [1] Tully R B, Fisher J R. *A&A*, 1977, 54: 661
- [2] Öpik E. *ApJ*, 1922, 55: 406
- [3] Hubble E P. *The Realm of the Nebulae*, New Haven: Yale University Press, 1936
- [4] Roberts M S. *AJ*, 1962, 67: 437
- [5] Rogstad D H, Shostad G S. *ApJ*, 1972, 176: 315
- [6] Balkowski C, Bottinelli L, Chamaraux P et al. *A&A*, 1974, 34: 43
- [7] Shostad G S. *ApJ*, 1975, 198: 527
- [8] Sandage A, Tammann G A. *ApJ*, 1976, 210: 7
- [9] Aaronson M, Huchra J, Mould J. *ApJ*, 1979, 229: 1
- [10] Pierce M J, Tully R B. *ApJ*, 1992, 387: 47
- [11] Jacoby G H, Branch D, Ciardullo R et al. *PASP*, 1992, 104: 599
- [12] Mould J, Aaronson M, Huchra J. *ApJ*, 1980, 238: 458
- [13] Aaronson M, Mould J, Huchra J, et al. *ApJ*, 1980, 239: 12
- [14] Pierce M J, Tully R B. *ApJ*, 1988, 330: 579
- [15] Binney J, Merrifield M. *Galactic Astronomy*, Princeton: Princeton University Press, 1998: 422
- [16] Iodice E, Arnaboldi M, Bournaud F, et al. *ApJ*, 2003, 585: 730
- [17] Badregal A G, Aragón-Salamanca A, Merrifield M R. *MNRAS*, 2006, 373: 1125

- [18] de Rijcke S, Zeilinger W W, Hau G K T, et al. *ApJ*, 2007, 659: 1172
- [19] Masters K L, Springob C M, Huchra J P. *ApJ*, 2008, 135: 1738
- [20] Meyer M J, Zwaan M A, Webster R L, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 1712
- [21] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. *ApJ*, 1998, 500: 525
- [22] Masters K L, Giovanelli R, Haynes M P. *AJ*, 2003, 126: 158
- [23] Tully R B, Fouqué P. *ApJS*, 1985, 58: 67
- [24] Rubin V C, Burstein D, Thonnard N. *ApJ*, 1980, 242: L149
- [25] Aaronson M, Mould J. *ApJ*, 1983, 265: 1
- [26] Bottinelli L, Gouguenheim L, Payurel G, et al. *A&A*, 1983, 118: 4
- [27] Pizagno J, Prada F, Weinberg D H, et al. *AJ*, 2007, 134: 945
- [28] Bernstein G M, Guhathakurta P, Raychaudhury S et al. *AJ*, 1994, 107: 1962
- [29] Rubin V C, Burstein D, Ford W K, et al. *ApJ*, 1985, 289: 81
- [30] Giovanelli R, Haynes M P, Herter T, et al. *AJ*, 1997, 113: 53
- [31] Master K L, Springob C M, Haynes M P, et al. *ApJ*, 2006, 653: 861
- [32] Zwaan M A, van der Hulst J M, de Blok W J G, et al. *MNRAS*, 1995, 273: L35
- [33] Sprayberry D, Bernstein G M, Impey C D, et al. *ApJ*, 1995, 438: 72
- [34] O'Neil K, Bothun G D, Schobert J. *AJ*, 2000, 119: 136
- [35] Persic M, Salucci P. *MNRAS*, 1991, 248: 325
- [36] Matthews L D, van Driel W, Gallagher J S. *AJ*, 1998, 116: 2196
- [37] Chung A, van Gorkom J H, O'Neil et al. *AJ*, 2002, 123: 2387
- [38] Courteau S. *RevMexAA*, 2003, 17: 171
- [39] Yegorova I A, Salucci P. *MNRAS*, 2007, 377: 507
- [40] Persic M, Salucci P. *ApJS*, 1995, 99: 501
- [41] Mathewson D S, Ford V L, Buchhorn M. *ApJS*, 1992, 81: 413
- [42] Vogt N P, Haynes M P, Herter T et al. *AJ*, 2004, 127: 3273
- [43] Persic M, Salucci P, Stel F. *MNRAS*, 1996, 281: 27
- [44] Gunn J E, Gott J R. *ApJ*, 1972, 176: 1
- [45] Lavery R J, Pierce M J, McClure R D. *AJ*, 1992, 104: 2067
- [46] Couch W J, Ellis R S, Sharples R M, et al. *ApJ*, 430: 121
- [47] Mathieu A, Merrifield M R, Kuijken K. *MNRAS*, 2002, 330: 251
- [48] Dressler A, Sandage A. *ApJ*, 1983, 265: 664
- [49] Neistein E, Maoz D, Rix H-W, et al. *AJ*, 1999, 117: 2666
- [50] Dressler A. *ApJ*, 1980, 354: L45
- [51] Bekki K, Shioya Y, Couch W J. *ApJ*, 2002, 577: 651
- [52] Hinz J L, Rieke G H, Caldwell N. *AJ*, 2003, 126: 2622
- [53] Hinz J L, Rix H-W, Bernstein G M. *AJ*, 2001, 121: 683
- [54] Williams M J, Bureau M, Cappellari. *arXiv: 0902.1500v2*, 2009
- [55] Stark D V, McGaugh S S, Swaters R A. *AJ*, 2009, 138: 392
- [56] McGaugh S S, Schombert J M, Bothun G D, et al. *ApJ*, 2000, 533: L99
- [57] Persic M, Salucci P. *MNRAS*, 1988, 234: 131
- [58] de Rijcke S, Zeilinger W W, Hau G K T et al. *ApJ*, 2007, 659: 1172
- [59] Bell E F, de Jong R S. *ApJ*, 2001, 550: 212
- [60] Verheijen M A W. *ApJ*, 2001, 563: 694
- [61] Gurovich S, McGaugh S S, Freeman K C, et al. *PASA*, 2004, 21: 412
- [62] McGaugh S S. *ApJ*, 2005, 632: 859
- [63] Geha M, Blanton M R, Masjedi M et al. *ApJ* 2006, 653: 240
- [64] Tully R B, Pierce M J. *ApJ*, 2000, 533: 744
- [65] de Rijcke S, Prugniel P, Simien F, et al. *MNRAS*, 2006, 369: 1321

- [66] Magorrian J, Ballantyne D. MNRAS, 2001, 322: 702
- [67] Kronawitter A, Saglia R P, Gerhard O, et al. A&AS, 2000, 144: 53
- [68] Coté S, Carignan C, Freeman K. AJ, 2000, 120: 3027
- [69] Eisenstein D J, Loeb A. ApJ, 1996, 459: 432
- [70] Ziegler B L, Böhm K J, Fricke K, et al. ApJ, 2002, 564: L69
- [71] Vogt N P, Forbes D A, Phillips A C, et al. ApJ, 1996, 465: L15
- [72] Forbes D A, Phillips A C, Koo D C, et al. ApJ, 1996, 462: 89
- [73] Rix H-W, Guhathakurta P, Colless M, et al. MNRAS, 1997, 285: 779
- [74] Simart L, Pritchett C J. ApJ, 1998, 505: 96
- [75] Vogt N P. ASPC, 1999, 193: 145
- [76] Kobulnicky H A, Willmer C N A, Phillips A C, et al. ApJ, 2003, 599: 1006
- [77] Böhm A, Ziegler B L, Saglia R P, et al. A&A, 2004, 420: 97
- [78] Conselice C J, Bundy K, Ellis R S et al. ApJ, 2005, 628: 160
- [79] Flores H, Hammer F, Puech M, et al. A&A, 2006, 455: 107
- [80] Puech M, Flores H, Hammer F, et al. A&A, 2008, 484: 173
- [81] Weiner B J, Willmer C N A, Faber S M, et al. ApJ, 2006, 653: 1049
- [82] Fernández-Lorenzo M, Cepa J, Bongiovanni A, et al. A&A, 2009, 496: 389
- [83] Bamford S P, Aragón-Salamanca A, Milvang-Jensen B. MNRAS, 2006, 366: 308
- [84] Van Starckenburg L, van der Werf P P, Moorwood A F M. A&A, 2006, 450: 25
- [85] Kassin S A, Weiner B J, Faber S M, et al. ApJ, 2007, 660: L35
- [86] Böhm A, Ziegler B L. ApJ, 2007, 668: 846
- [87] Chiu K, Bamford S P, Bunker A. MNRAS, 1997, 377: 806
- [88] Portinari L, Sommer-Larsen J. MNRAS, 2007, 375: 913
- [89] Metevier A J, Koo D C. ASPC, 2002, 268: 173
- [90] Milvang-Jensen B, Aragón-Salamanca A, Hau G K T, et al. MNRAS, 2003, 339: L1
- [91] Bamford S P, Milvang-Jensen B, Aragón-Salamanca A, et al. MNRAS, 2005, 361: 109
- [92] Steinmetz M, Navarro J F. ApJ, 1999, 513: 555
- [93] Shen S Y, Wang C H, Chang R X, et al. ApJ, 2009, 705: 1496

## Progress of Studies on the Tully-Fisher Relation

ZHAO Jun-liang

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In 1977, Tully and Fisher found a remarkable relation between the luminosity and the maximum rotational velocity of late-type galaxies, This “TF relation (TFR)” can be exploited to study the dynamical evolution and star formation history of disk galaxies, and provides a powerful tool to estimate distances of distant objects such as galaxy clusters. Since then lots of various studies concerning TFR have been done by different authors.

In 1979, infrared H-band magnitude was firstly introduced by Aaronson et al. to improve the TFR. Observations in the infrared band can offer two main distinct advantages over visible wave-

lengths: first, that the internal extinction at  $H$  band is only 10% that in  $B$  band, and second, that the infrared is a better tracer of the stellar mass than  $B$  luminosity, which leads to a tighter TFR with smaller scatter. In the following years,  $J$  and  $K$  bands have also been used to establish the TFR.

There are two fundamental observational quantities in the TFR: the apparent magnitude and the maximum rotational velocity of a galaxy, both of them must be corrected for observational effects caused by the inclination of the galaxy; the internal extinction correction can be estimated by modeling the distribution of extinction materials. In order to reduce uncertainties of inclination corrections one must carefully select the sample galaxies with a proper range of inclinations. Besides, there are a number of factors which can have effects on the TFR, including wavebands used for observations, morphology and surface brightness of galaxies, and galactocentric radii (radial TFR).

While a work published in 1983 showed no evidence for any actual correlation between galactic luminosity and the observed mean stellar rotation speed for S0 galaxies, the an  $I$ -band TFR was firstly found from a sample of 18 nearby S0 galaxies more than 10 years later, with little zero point offset from the TFR of late-type galaxies and a big scatter in the relation. In the recent 10 years or so, from observational data in some different wavebands, a number of TFR studies for S0 galaxies have been completed, and the possible scenario of formation and evolution of them are discussed as well, but the results have not yet been in satisfactory agreement with one another.

In 2000, one recognized that the traditional luminosity-line width relation is a subset of a more fundamental relation between baryonic mass and rotational velocity. Therefore, the concept of the baryonic TFR was proposed, which is important for gas-rich galaxies because much of their baryonic mass is not in the form of stars. At a given circular velocity, such kind of galaxies should appear underluminous but would, after correction for the gas content, fall on the underlying baryonic TFR. Afterwards, the baryonic TFR have been studied in different respects and some interesting results have been obtained.

By studying the TFRs of high redshift galaxies, it was found that the kinematics of distant galaxies show evidence for an increase in luminosity compared to the TFRs for local galaxies. In recent 10 years, by using both field and cluster galaxies, contents of studies on the evolution of the TFR have been developing, including the slope, the zero-point and the scatter of the relation, but the conclusions given by different authors are not yet in good agreement with each other. Meanwhile, the evolution of the TFR has also been exploited theoretically, based on cosmological  $N$ -body simulation of disc galaxy formation and evolution.

**Key words:** TF relation; late-type galaxy; galactic evolution