

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2017.04.01

# 球状动力学系统的基本面 ——从椭圆星系到球状星团

庞晓莹<sup>1,3</sup>, 沈世银<sup>2,3</sup>

(1. 上海应用技术大学 理学院, 上海 201418; 2. 上海天文台, 上海 200030; 3. 上海师范大学 上海市星系与宇宙学半解析重点实验室, 上海 200234)

**摘要:** 基本面是球状动力学系统的有效半径、中心速度弥散度和平均面亮度三者之间的相关关系。椭圆星系和球状星团的基本面都与位力面发生偏离。评述了两者基本面的研究进展, 并对基本面偏离位力面的原因进行探讨。球状系统偏离位力面的原因, 通常可以归结为系统结构的非均匀性和非常数的质光比。对于这两个不同尺度的动力学系统, 其非常数的质光比的起因是不同的: 对于椭圆星系, 质光比的变化主要是由暗物质含量或是初始质量函数的变化导致的; 对于球状星团, 二体弛豫时标短, 动力学演化是导致其质光比改变的主要原因。

**关键词:** 基本面; 椭圆星系; 球状星团; 动力学演化

**中图分类号:** P157      **文献标识码:** A

## 1 基本面的倾斜

基本面是关于早型星系, 尤其是椭圆星系的有效半径  $R_e$ 、中心速度弥散度  $\sigma_0$  和有效半径内的平均面亮度  $I_e$  这 3 个基本观测参数之间的相关关系<sup>[1, 2]</sup>:

$$\lg R_e = a \lg \sigma_0 + b \lg I_e + C, \quad (1)$$

其中,  $\sigma_0$  通常是视向速度的弥散度,  $C$  是常数。不同的研究团队采用数目不等的椭圆星系样本。虽然观测波段不同, 拟合得到的椭圆星系的基本面参数 ( $a, b$ ) 却基本一致, 而且弥散度很小<sup>[3-7]</sup>。

通过统计早型星系基本面的不同研究结果, 王彩虹等人<sup>[8]</sup>发现:  $a$  和  $b$  的值随观测波长变化不大, 从可见光至红外波段,  $a$  值的范围为 1.16 ~ 1.70,  $b$  值的范围为 -1.03 ~ -0.74,

收稿日期: 2017-08-07; 修回日期: 2017-08-18

资助项目: 国家自然科学基金 (11503015, 11673032, 11573050, 11433003); 973 项目 (2014CB845705)

通讯作者: 庞晓莹, xypang@bao.ac.cn

平均值为  $a = 1.46$ ,  $b = -0.82$ 。若系统是位力平衡, 基本参数应为  $a = 2$ ,  $b = -1$ , 此时基本面也称位力面。椭圆星系的基本面参数与位力面的不同, 即其基本面相对于位力面有一个夹角, 这称为基本面的倾斜。

为了探寻椭圆星系基本面倾斜的原因, 本文第 2 章将从理论上推导球状动力学系统的位力面, 第 3 章从位力面的理论假设寻找椭圆星系基本面倾斜的可能原因。除了椭圆星系, 观测发现球状星团也有与椭圆星系类似的基本面, 第 4 章将讨论球状星团基本面倾斜的原因。最后, 总结椭圆星系和球状星团基本面倾斜的原因。

## 2 球状动力学系统的位力面

一般认为, 基本面的相关性源于引力束缚系统的位力定理。对于一般的球对称动力学系统, 位力定理可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$\langle \sigma^2 \rangle = \gamma \frac{GM_{\text{dyn}}}{r_{\text{h}}}, \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  是三维速度弥散度, 可表示为  $\langle \sigma^2 \rangle = (3 - \beta_{\theta} - \beta_{\phi}) \langle \sigma_r^2 \rangle$ 。  $\sigma_r$  是视向速度弥散度,  $\beta_{\theta}$ ,  $\beta_{\phi}$  分别表征系统沿  $\theta$  和  $\phi$  方向的速度各向异性的程度,  $\beta_{\theta} = 1 - \sigma_{\theta}^2 / \sigma_r^2$ ,  $\beta_{\phi} = 1 - \sigma_{\phi}^2 / \sigma_r^2$ 。当系统没有转动时,  $\beta_{\phi} = 0$ 。对于各向同性的球状动力学系统,  $\beta_{\theta} = 0$ 。  $r_{\text{h}}$  是三维的半质量半径, 一般需要转换成可观测的二维投影半质量半径  $R_{\text{h}}$ :  $r_{\text{h}} \approx 4/3 R_{\text{h}}$ <sup>[9]</sup>。  $M_{\text{dyn}}$  为系统的动力学质量。

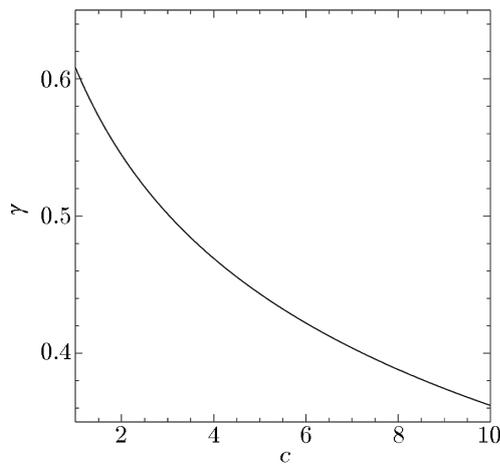


图 1 球状动力学系统的中心聚度  $c$  与  $\gamma$  的关系<sup>[14]</sup>

$\gamma$  取决于系统密度轮廓的分布。Spitzer<sup>[10]</sup> 早在 1969 年就通过研究发现, 对于一般代表性的密度轮廓,  $\gamma$  约为 0.4。例如, Hernquist 密度轮廓,  $\gamma \approx 0.403$ <sup>[11]</sup>。星系暗晕结构的 NFW (Navarro-Frenk-White) 密度轮廓<sup>[12, 13]</sup>, 是中心聚度  $c$  的函数 ( $c$  定义为  $c = r_{\text{v}} / r_{\text{h}}$ ):  $\rho(r) \propto (cr/r_{\text{v}})^{-1} (1 + cr/r_{\text{v}})^{-2}$ , 其中,  $r_{\text{v}}$  是位力半径。Lokas 和 Mamon<sup>[14]</sup> 通过计算得到,  $\gamma$  与中心聚度  $c$  相关, 如图 1 所示。

值得一提的是, 对于均一性 (homology) 结构的系统, 系统满足以下条件: 1) 中心聚度  $c$  相同, 不同质量的系统的密度轮廓是自相似的,  $\gamma$  为常数 (见图 1); 2) 动力学参数  $3 - \beta_{\theta} - \beta_{\phi}$  是常数, 即不同质量的系统的各向异性程度和旋转程度满足自相似性。若系统打破均一性, 中心聚度  $c$  不再是固定值, 则  $\gamma$  和  $3 - \beta_{\theta} - \beta_{\phi}$  为非常数, 随系统的质量而变化。

球状动力学系统若满足均一性, 即  $3 - \beta_{\theta} - \beta_{\phi} = d$ ,  $d$  和  $\gamma$  都为常数。将以上两项及  $r_{\text{h}} \approx 4/3 R_{\text{h}}$  同时代入式 (2) 可得:

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{3} \gamma \frac{GM_{\text{dyn}}}{\frac{4}{3}R_h} = \frac{1}{2} G \gamma \frac{\frac{1}{2}L}{R_h^2} \frac{M_{\text{dyn}}}{L} R_h \propto IYR_h \quad (3)$$

其中,  $Y$  为系统的质光比,  $Y = M_{\text{dyn}}/L$ ,  $L$  为系统的光度;  $I$  为半质量半径处对应的平均面亮度,  $I \propto \frac{1}{2}L/R_h^2$ 。质光比可以分解成重子物质比例的倒数 ( $M_{\text{dyn}}/M_*$ ,  $M_*$  为系统的恒星质量) 与恒星质光比 ( $M_*/L$ ) 的乘积:  $M_{\text{dyn}}/L = M_{\text{dyn}}/M_* \times M_*/L$ 。若质光比  $Y$  为常数, 则式 (3) 可以表示为:

$$\sigma^2 \propto IR_h \quad (4)$$

对式 (4) 两边取对数:  $\lg R_h = 2\lg \sigma_r - \lg I + C$ , 即变为式 (1) 的基本面, 此时对应的系数为:  $a = 2, b = -1$ , 这就是球状动力学系统的位力面。

### 3 基本面倾斜的原因

以上球状动力学系统的位力面的推导基于以下三个基本假设。

- (1) 系统已经达到位力平衡。
- (2) 不同质量的系统满足结构均一性条件: 1) 表面密度轮廓是自相似的, 即  $\gamma$  是常数; 2) 动力学参数  $3 - \beta_\theta - \beta_\phi$  是常数, 各向异性程度和旋转程度自相似性。
- (3) 系统的质光比  $M_{\text{dyn}}/L = M_{\text{dyn}}/M_* \times M_*/L$ , 是常数。

椭圆星系的基本面弥散度虽然很小, 但是系数  $a$  和  $b$  与位力面的系数有明显差别。因此, 椭圆星系的实际性质与基本假设的差别可能引起基本面的倾斜。

#### 3.1 位力平衡

根据  $\Lambda$  冷暗物质 ( $\Lambda$  cold dark matter,  $\Lambda$ CDM) 结构形成理论, 暗物质沿着纤维状结构 (filament) 进行并合和碰撞等级成团。当暗物质位力化时, 并合和碰撞停止, 系统达到稳定状态, 重子物质在暗物质晕中开始坍缩形成星系结构, 此时椭圆星系才开始形成。如果椭圆星系的平衡只是靠内部恒星的二体弛豫过程, 那么它的弛豫时标远大于宇宙年龄, 因此恒星间的相互作用在椭圆星系中并不显著<sup>[15]</sup>, 但是, 椭圆星系在形成过程中一般经历多次并合过程 (漩涡星系间并合, 成为椭圆星系)。并合和碰撞过程是剧烈弛豫过程, 时标远小于恒星的二体弛豫。这一过程使椭圆星系在其年龄内可能达到动力学弛豫, 也就是位力化。由于基本面研究的对象是椭圆星系的致密核心, 此处二体弛豫时标短, 可以认为是已经位力化<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 结构的非均一性 (Non-homology)

##### 3.2.1 表面密度轮廓

椭圆星系的表面密度轮廓大多遵循 Sersic 分布 ( $\rho \propto R^{1/n}$ )<sup>[17]</sup>, 但是指数  $n$  并不是常数, 而是因星系而异, 打破了结构均一的假设。Trujillo 等人<sup>[18]</sup>统计了 200 个椭圆星系的 Sersic 指数  $n$ , 发现  $n$  随着星系的亮度增大而增大 ( $n$  越小, 密度分布越集中)。不但如此, 椭圆星系中心核区有两种类型: 一种中心核区的表面密度基本是一个常数, 变化不大, 这种叫指数核<sup>[19]</sup> (power-law cores), 通常对应质量较大的星系; 另一种是中心核区的密度随着半径减小

而急剧增大<sup>[19]</sup>，通常叫无核 (cuspy cores)，这种类型的椭圆星系质量偏小。由此可见，椭圆星系的密度轮廓与质量相关，并不满足均一性。

根据 NFW 暗物质晕模型，中心聚度  $c$  与星系的质量反相关<sup>[12, 13]</sup>，即星系质量越大，结构越弥散。目前很多观测结果都已经证明了这一关系的存在<sup>[20-22]</sup>。因此，式 (3) 中  $\gamma$  的值随椭圆星系的质量而改变，不再是常数。Trujillo 等人<sup>[18]</sup>认为密度分布的非均一性可以解释 75% 的基本面的倾斜。

### 3.2.2 速度分布

椭圆星系内恒星的速度并非各向同性，沿短轴方向和长轴方向的速度弥散度并不相等<sup>[23]</sup>，因此  $\beta_\theta \neq 0$ 。除了随机运动，很多椭圆星系绕短轴有一定的旋转，即  $\beta_\phi \neq 0$ 。不但如此，旋转对于总动能的贡献因星系不同而变化很大<sup>[24]</sup>。早在 1983 年，Davies 等人<sup>[23]</sup>发现椭圆星系的旋转随着星系质量减小而变大。质量小的椭圆星系几乎都是旋转支撑的系统<sup>[25]</sup>，而且其旋转率与转速正相关，即旋转导致椭圆星系的形状变扁。盘状的 (disky) 椭圆星系的旋转速度比盒状的 (boxy) 椭圆星系更大<sup>[26]</sup>。观测上发现，质量小的椭圆星系在形态上通常是各向同性扁球体，大质量椭圆星系则是各向异性三轴椭球体。

Capellari<sup>[27]</sup>在 2016 年的《天文与天体物理学年鉴》(ARAA) 文章中，总结了椭圆星系的旋转特性，并按其进行分类。旋转的椭圆星系主要分规则旋转 (regular rotation) 和无规则旋转 (non-regular rotation) 两大类。规则旋转的椭圆星系一般没有核，有盘状结构，转速较快，质量相对较小；无规则旋转的大多有核心 (core)，转速较慢，一般为大质量星系。Capellari 定义了一个参数  $\lambda_R$ ，表征星系的旋转速度。 $\lambda_R$  与星系质量成反比 (见参考文献 [27] 中的式 (17))，即质量越小，椭圆星系旋转得越快 (见参考文献 [27] 中的图 14)。说明椭圆星系的动力学参数  $3 - \beta_\theta - \beta_\phi$  并不是常数，而是依赖质量而变化。椭圆星系的旋转影响其形态结构，即速度分布同时影响表面密度轮廓，违背了均一性的假设，不再是自相似。虽然如此，Busarello 等人<sup>[28]</sup>提出，即使考虑了旋转及各向异性的速度分布，并不能完全解释观测到的基本面的倾斜。

### 3.3 非常数的质光比

椭圆星系不但含有发光物质，也有暗物质，质光比  $M_{\text{dyn}}/L$  是  $M_{\text{dyn}}/M_*$  (重子物质比例的倒数) 和  $M_*/L$  (恒星质光比) 两项的乘积。研究表明，质光比  $M_{\text{dyn}}/L$  并不是常数，而是与椭圆星系的质量、光度和速度弥散度相关<sup>[7, 29]</sup>。

引起质光比  $M_{\text{dyn}}/L$  变化的可能原因之一是  $M_{\text{dyn}}/M_*$  的变化，即暗物质含量  $(1 - M_*/M_{\text{dyn}})$  的变化。星系重子物质的比例随着星系暗晕质量 (根据  $\Lambda$ CDM 模型) 增大后再减小，约在  $10^{11.7} M_\odot$  (对应银河系) 处有一个峰值<sup>[30]</sup>。因此，对于不同质量的椭圆星系，重子物质比例不一样，暗物质含量也不同。一般椭圆星系 (不包括矮星系) 的暗晕质量都大于  $10^{11.7} M_\odot$ ，因此星系的质量越大，暗物质含量越高。同时人们通过观测发现暗物质的结构分布随星系质量变化<sup>[7]</sup>，暗物质在有效半径内的比例随着椭圆星系的质量增大而增加<sup>[31]</sup>。动力学的演化，例如旋转，可以引起质光比的变化，旋转大的椭圆星系中心暗物质比例较旋转小的椭圆星系小<sup>[32]</sup>。

恒星质光比  $M_*/L$  变化是导致椭圆星系质光比  $M_{\text{dyn}}/L$  为非常数的原因之二。根据简单星族模型 (simple stellar populations, SSP), 在金属度一定的条件下, 一个星族随着恒星演化, 大质量恒星逐渐损失, 恒星质光  $M_*/L$  比随年龄增大, 与星族的总质量无关。椭圆星系的成分都是年老的星族, 整体上  $M_*/L$  应该是变化不大。对  $M_*/L$  影响更大的是椭圆星系的初始质量函数 (initial mass function, IMF)  $\xi(m)$ 。如果 IMF 表示为:

$$\xi(m) \propto m^{-\alpha}, \quad (5)$$

其中,  $m$  是恒星质量,  $\alpha$  是 IMF 的指数。假设星族演化到椭圆星系的年龄为  $13 \text{ Ga}$ <sup>[29]</sup>, 使用相同的质量上下限, 对式 (5) 积分, 恒星质光比  $M_*/L$  随着指数  $\alpha$  的增大而变大。Cappellari 等人<sup>[32]</sup>在 2006 年的研究中指出, 不同椭圆星系间的 IMF 变化并不大。但是, Cappellari 团队在 2012 年利用 ATLAS<sup>3D</sup><sup>[33]</sup> 多波段观测数据 (射电至可见光) 进行星系分类, 研究了 200 多个椭圆星系后发现, 它们的 IMF 随着星系质量的变化而系统地变化<sup>[34]</sup>, 并在 2016 年的文章中<sup>[27]</sup> 中再次论证了这一观点。

综上所述, 若质光比与椭圆星系的质量有以下相关关系:

$$M_{\text{dyn}}/L \propto M_{\text{dyn}}^\alpha, \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3), 用平均表面亮度  $I$  代替光度  $L$ , 基本面可以表示为:

$$R_h \propto \sigma_r^{2(\frac{1-\alpha}{1+\alpha})} I^{\frac{1}{1+\alpha}}. \quad (7)$$

若要使式 (7) 与观测到的基本面符合, 则  $\alpha \approx 0.2$ <sup>[26]</sup>。Cappellari 等人<sup>[32]</sup> 统计了 25 个哈勃望远镜观测到的早型星系的质光比与质量的关系, 得到  $\alpha = 0.27 \pm 0.03$ , 顺利地解释了基本面的偏离。

此外, 椭圆星系的质光比也受结构非均一性的影响<sup>[18]</sup>。导致质光比变化的原因很多, 非常数的质光比则是目前基本面倾斜的最好解释, 但仍有待观测和模拟结果的进一步论证。

## 4 球状星团的基本面

### 4.1 球状星团的星族

Djorgovski<sup>[35]</sup> 在 1995 年统计了银河系内几十个球状星团的样本, 得到球状星团核心区的基本面:

$$R_c \propto \sigma_0^{2.2 \pm 0.15} I_0^{-1.1 \pm 0.1}. \quad (8)$$

式 (8) 近乎完美地符合位力面。有趣的是, 当用半光度半径  $R'_h$  和  $R'_h$  内对应的平均面亮度  $I'_h$  时, 基本面就发生了倾斜:

$$R'_h \propto \sigma_0^{1.4 \pm 0.2} I'_h^{-0.8 \pm 0.1}. \quad (9)$$

此时, 球状星团与椭圆星系的基本面相似, 与位力面偏离 (需要指出的是,  $\sigma_0$  的值都是中心核区的速度弥散度)。球状星团基本面的倾斜是否与椭圆星系有相同的原因呢?

Djorgovski<sup>[36]</sup>发现, 球状星团的核半径  $R_c$  和中心速度弥散度  $\sigma_0$  都与团的中心聚度  $c$  相关 ( $c$  随星团质量变化)。根据这一结论, 我们假设:  $R'_h/R_c = f_1(c)$ ,  $I'_h/I_0 = f_2(c)$ ,  $f_1(c)$  与  $f_2(c)$  都是中心聚度  $c$  的函数。将式 (9) 中  $R'_h$  和  $I'_h$  分别用  $R_c$  和  $I_0$  表示, 即

$$R_c \times f_1(c) \propto \sigma_0^{1.4 \pm 0.2} [I_0 \times f_2(c)]^{-0.8 \pm 0.1} \quad (10)$$

如果球状星团结构均一, 则  $f_1(c)$  与  $f_2(c)$  都是常数。式 (10) 只是相当于式 (8) 两边乘以常数, 最终得到的  $R'_h$  处的基本面应该与  $R_c$  处的只是零点的不同 (截距的变化)。但是观测得到的式 (9) 较式 (8) 发生了倾斜, 说明球状星团的结构并非均一, 即  $f_1(c)$  与  $f_2(c)$  为非常数。Wang 等人<sup>[37]</sup>对球状星团进行  $N$  体数值模拟后发现, 由于恒星黑洞往中心堆积, 质光比随着星团半径的增大而减小。球状星团没有暗物质, 所以总质光比  $M_{\text{dyn}}/L$  等于恒星质光比  $M_*/L$ 。  $R'_h$  处对应的恒星质光比  $M_*/L$  与  $R_c$  对应的并不相同, 这是式 (9) 与式 (8) 不同的另一解释。

McLaughlin<sup>[38]</sup>统计了 Harris 球状星团表<sup>[39]</sup>, 得到其 V 波段的质光比为常数:  $M_*/L = 1.45 \pm 0.10$ 。这个结论似乎与位力方面的假设一致。球状星团年龄都很老, 可以认为年龄几乎相等<sup>[40]</sup>, 因此常数的质光比也符合 SSP 的预测。Rejkuba 等人<sup>[41]</sup>统计了银河系与河外星系 (如 Cen A, M 31, LMC, M33, Virgo cluster, Fornax 等) 的球状星团, 发现质光比并非是常数, 而是随着星团质量的增加而增大, 而且测得质光比的值小于 SSP 的预测值。需要指出的是, SSP 只有恒星演化, 并没有考虑动力学演化。

#### 4.2 球状星团的动力学

根据数值模拟及解析模型的研究结果, 星团的动力学演化会影响星团的光度、颜色及质光比<sup>[42-45]</sup>。星团内部的动力学过程主要是恒星通过二体弛豫 (two-body relaxation) 达到平衡的过程, 即当两颗恒星交会后, 大质量恒星的动能减小, 在星团中央堆积; 同时小质量恒星获得能量而加速, 往星团外围运动, 其中一部分恒星因速度足够大, 甚至逃逸出星团。最终整个系统达到能量均分状态。这在观测上表现为星团的质量分层效应<sup>[46-48]</sup>。这个过程中损失的小质量恒星, 其质光比比大质量恒星的大。相同年龄、质量和金属度的星团, 经过动力学演化, 质光比比纯恒星演化的 SSP 的预测值小。通常质量大的星团的二体弛豫时标比质量小的更长, 因此, 如果年龄相同, 小质量星团更接近能量均分, 比大质量星团损失更多的小质量恒星, 从而质光比更小。实际上, 由于恒星演化, 质量大于  $5 M_\odot$  的恒星会在  $4 \sim 100 \text{ Ma}$  内离开主序演化, 成为主序后星, 并通过星风作用将  $80\% \sim 90\%$  的质量抛射到宇宙空间<sup>[49]</sup>。这样的质量损失使整个星团的引力势减小, 而这对于小质量星团更是“雪上加霜”, 加剧了小质量恒星的逃逸过程, 使星团的质光比进一步降低。若忽略球状星团的年龄微小差别, 质光比随球状星团的质量增加而变大的趋势, 恰恰反应了星团内部能量均分时标随质量增加而变长。在考虑了星团的恒星演化、恒星遗迹的形成、星团瓦解及能量均分过程后, 球状星团模型能够较好地与观测的质光比符合<sup>[45]</sup>。

另外, 球状星团并非全部是球对称结构。观测发现不少球状星团的椭率较大<sup>[50]</sup>, 形状的变椭可能是由于星团的旋转导致<sup>[51, 52]</sup>。星团的旋转起源于分子云的旋转。根据 Fiestas 等人<sup>[53]</sup>的 Fokker Planck 模型, 星团的旋转随着星团变老而变慢。虽然到了球状星团的年龄,

旋转已经变慢, 但旋转仍能占系统总动能的 10% 左右。Hong 等人<sup>[54]</sup>的  $N$  体数值模型中, 在原有的动力学演化基础上加入了星团的旋转。模拟发现, 旋转较快的星团经历较大的质量损失, 特别是小质量恒星的损失。因此, 旋转导致的质量损失使星团的质光比进一步变小。

由此看来, 球状星团的动力学演化引起的小质量恒星的损失, 是观测的质光比比 SSP 模型预言要小的主要原因。并且质量损失与星团的质量相关: 质量越大的星团, 质量损失比例越小。

若用非常数的质光比解释球状星团的基本面倾斜, 根据式 (7), 球状星团对应  $\alpha \approx 0.18$ 。如果要量化动力学演化对球状星团的质光比与质量的相关性的影响, 需要计算不同物理过程 (如二体弛豫、旋转等) 对系数  $\alpha$  的贡献, 从而找出球状星团的基本面倾斜的主要原因。

## 5 小 结

椭圆星系与球状星团都是年老的星族系统, 其基本面倾斜的原因有相同点, 也有不同点。可以认为两者都是位力平衡系统, 但是基本面偏离了理论的位力面。可能原因是结构的非均匀性, 表面密度的分布因星系、星团而变化, 以及椭圆星系与球状星团都有不同程度的旋转等。

另一方面, 非常数的质光比似乎可以很好地解释两者的基本面的倾斜。虽然两者的质光比都遵循式 (6), 都与系统的总质量相关, 但是主要原因并不完全相同。初始质量函数形式的改变都能使两者的恒星质光比为非常数。椭圆星系总质光比为非常数的主要原因, 可能是暗物质的分布及其含量比例随星系而变化。球状星团则是因为动力学演化主导了非常数的质光比。椭圆星系主要通过剧烈的二体弛豫 (并合和碰撞) 过程达到平衡。相反, 球状星团只需要  $4 \times 10^8$  Ma 就能达到二体弛豫。目前观测到的绝大部分球状星团都可以认为已经处于能量均分态。

若要具体区分不同物理过程对基本面倾斜的影响, 最易量化的是非常数的质光比 (与质量相关)。研究椭圆星系最好的工具是暗物质模型, 研究球状星团则是  $N$  体数值模型。通过对模型初始条件的设置, 参数的调节, 细化物理过程对式 (6) 中  $\alpha$  的影响, 有望给出基本面倾斜的量化解释。

### 参考文献:

- [1] Djorgovski S, Davis M. ApJ, 1987, 313: 5915
- [2] Dressler A, Lynden-Bell D, Buzunov D, et al. ApJ, 1987, 313: 42
- [3] Pahre M A, Djorgovski S G, de Carvalho R R. AJ, 1998, 116: 1606
- [4] Bernardi M, Sheth R K, Annis J, et al. AJ, 2003, 125: 1866
- [5] La Barbera F, Busarello G, Merluzzi P, et al. ApJ, 2008, 689: 913
- [6] Jun H D, Im M. ApJL, 2008, 678: 97
- [7] Thomas J, Saglia R P, Bender R, et al. MNRAS, 2011, 415: 545

- [8] 王彩虹, 王有芬, 沈世银, 等. 天文学进展, 2011, 29: 48
- [9] Wolf J, Martinez G D, Bullock J S, et al. MNRAS, 2010, 406: 1220
- [10] Spitzer L Jr. ApJL, 1969, 158: 139
- [11] Hernquist L. ApJ, 1990, 356: 359
- [12] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. ApJ, 1996, 462: 563
- [13] Navarro J F, Frenk C S, White S D M. ApJ, 1997, 490: 493
- [14] Lokas E L, Mamon G A. MNRAS, 2001, 321: 155
- [15] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics. 2nd ed. Princeton: Princeton University Press, 2008: 734
- [16] Faber S M, Dressler A, Davies R L. Nearly Normal Galaxies: From the Planck Time to the Present. New York: Springer-Verlag, 1987: 175
- [17] Caon N, Capaccioli M, D'Onofrio M. MNRAS, 1993, 265: 1013
- [18] Trujillo I, Burkert A, Bell E F. ApJL, 2004, 600: 39
- [19] Gebhardt K, Richstone D, Ajhar E A, et al. AJ, 1996, 112: 105
- [20] Sereno M, Covone G. MNRAS, 2013, 434: 878
- [21] Duffy A R, Schaye J, Kay S T, et al. MNRAS, 2008, 390: L64
- [22] Oguri M, Bayliss M B, Dahle H, et al. MNRAS, 2012, 420: 3213
- [23] Davies R L, Efstathiou G, Fall S M, et al. ApJ, 1983, 266: 41
- [24] Busarello G, Longo G, Feoli A. A&A, 1992, 262: 52
- [25] de Zeeuw T, Franx M. ARA&A, 1991, 29: 239
- [26] Kormendy J, Bender R. ApJL, 1996, 464: 119
- [27] Cappellari M. ARAA, 2016, 54: 597
- [28] Busarello G, Capaccioli M, Capozziello S, et al. A&A, 1997, 320: 415
- [29] Renzini A, Ciotti L. ApJL, 1993, 416: 49
- [30] Guo Q, White S, Li C, et al. MNRAS, 2010, 404: 1111
- [31] Rix H W, de Zeeuw P T, Cretton N, et al. ApJ, 1997, 488: 702
- [32] Cappellari M, Bacon R, Bureau M, et al. MNRAS, 2006, 366: 1126
- [33] Cappellari M, Emsellem E, Krajnović D, et al. MNRAS, 2011, 413: 813
- [34] Cappellari M, McDermid R M, Alatalo K, et al. Nature, 2012, 484: 485
- [35] Djorgovski S. ApJL, 1995, 438: 29
- [36] Djorgovski S. The Formation and Evolution of Star Clusters. Pasadena: Palomar Observatory, 1991: 112
- [37] Wang L, Spurzem R, Aarseth S, et al. MNRAS, 2016, 458: 1450
- [38] McLaughlin D E. ApJ, 2000, 539: 618
- [39] Harris W E. AJ, 1996, 112: 1487
- [40] Vandenberg D A, Bolte M, Stetson P B. AJ, 1990, 100: 445
- [41] Rejkuba M, Dubath P, Minniti D, et al. A&A, 2007, 469: 147
- [42] Baumgardt H, Makino J. MNRAS, 2003, 340: 227
- [43] Lamers H J G L M, Anders P, De Grijs R. A&A, 2006, 452: 131
- [44] Kruijssen J M D, Lamers H J G L M. A&A, 2008, 490: 151
- [45] Kruijssen J M D. A&A, 2008, 486: L21
- [46] Hillenbrand L A, Hartmann L E. ApJ, 1998, 492: 540
- [47] Chen L, de Grijs R, Zhao J L. AJ, 2007, 134: 1368
- [48] Pang X, Grebel E K, Allison R J, et al. ApJ, 2013, 764: 73
- [49] Chiosi C, Maeder A. ARA&A, 1986, 24: 329
- [50] White R E, Shawl S J. ApJ, 1987, 317: 246
- [51] Gebhardt K, Fischer P. AJ, 1995, 109: 209
- [52] McLaughlin D E, Anderson J, Meylan G, et al. ApJS, 2006, 166: 249
- [53] Fiestas J, Spurzem R, Kim E. MNRAS, 2006, 373: 677
- [54] Hong J, Kim E, Lee H M, et al. MNRAS, 2013, 430: 2960

## The Tilt of Fundamental Plane: from Elliptical Galaxies to Globular Clusters

PANG Xiao-ying<sup>1,3</sup>, SHEN Shi-yin<sup>2,3</sup>

(1. School of Science, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200218, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China; 3. Key Lab for Astrophysics, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

**Abstract:** The fundamental plane (FP) is a scaling relation among effective radius, central velocity dispersion and average surface brightness of spherical dynamical systems, which is expected to be originated from the virial equilibrium of their members. However, observations show that the FPs of elliptical galaxies, as well as globular clusters are both tilted from virial plane. This paper gives an overview on the FP studies of elliptical galaxies and globular clusters and makes comparisons. The non-homologous structure and non-constant mass-to-light ratio are the main reasons of the FP tilt. For elliptical galaxies, the variation of mass-to-light ratio is originated from the change of dark matter fraction and possible variation of the stellar initial mass function in different mass systems. For globular clusters, the two-body relaxation timescale of stars is much shorter, where the dynamical evolution makes the main contribution to their non-constant mass-to-light ratios.

**Key words:** fundamental plane; elliptical galaxies; globular clusters; dynamical evolution