

文章编号: 1000-8349(2008)03-0257-09



致密星团的分层效应及其形成机制

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 老年球状星团和年轻的超星团是两类不同性质的致密星团, 观测表明它们都表现出某种程度的质量分层效应。该文在介绍这两类星团质量分层的探测途径和观测表象的基础上, 对形成这种分层效应的两种可能的机制——动力学分层和原初分层做了简要的讨论和评述。

关键词: 天体物理学; 星团; 球状星团; 超星团; 质量分层; 形成机制

中图分类号: P154.1 **文献标识码:** A

1 引 言

作为一类恒星集团, 球状星团因其自身的一些特性, 在若干天体物理学领域, 如银河系早期的恒星形成条件、银晕的结构、恒星系统的演化和动力学, 以及河外星系的研究等, 都占有很重要的地位。

在经典的银河系星团分类中, 与疏散星团和星协相比, 球状星团外形较为规则, 是一类致密的老年恒星集团, 年龄超过 10^{10} 年, 质量比较大 (可达 $10^6 M_{\odot}$ 或更大), 因而累积光度比较高, 光度大的可达 $M_v = -9 \text{ mag}$, 个别星团甚至可以达到 $M_v < -10 \text{ mag}^{[1]}$ 。正因为如此, 在较远的一些河外星系中仍然可以观测到许多球状星团, 而通常观测不到疏散星团。

自 20 世纪 60 年代起, 人们在包括正常星系和星暴星系在内的一些河外星系中发现了另一类致密星团——超星团^[2-5], 它们既不能归入球状星团, 又不能归入疏散星团。其外形、致密程度和质量与球状星团相仿, 质量通常大于 $3 \times 10^4 M_{\odot}$, 最大甚至可达 $10^7 M_{\odot}$ 量级; 另一方面, 它们的年龄较轻, 一般仅为几百万年, 最年老的也只有 10^8 年量级, 与疏散星团的年龄范围相近, 因而又可称为大质量年轻星团或年轻的致密富星团。超星团的光度范围大致为 $M_v \simeq -9 \sim -15 \text{ mag}$, 光谱型通常早于 A3 型^[6]。有人认为至少有一部分超星

收稿日期: 2007-06-01; 修回日期: 2007-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (10773020)

团, 可以存在 10^{10} 年或更长的时间, 并最终演化为今天所观测到的球状星团, 因此它们可能是老年球状星团的前身天体, 不过对此尚未有定论^[7,8]。

显然, 球状星团和超星团是两类年龄截然不同的致密星团。有趣的是, 这两类致密星团都表现出了不同程度的质量分层效应, 从而引起人们的注意并对此进行了广泛深入的研究。

恒星集团的质量分层是一种观测现象, 对于研究星团的形成和动力学演化等问题有着重要的意义。一般来说, 星团的质量分层可以表现为两个方面, 即空间分层和速度分层。它们的观测表现是, 对星团成员星来说, 存在某种质量-团心距关系: 大质量恒星大多向团中心集聚, 小质量恒星则大多分布在星团的外围区域。可能还有质量-速度弥散度关系: 大质量恒星的速度弥散度小, 而小质量恒星的速度弥散度大。不过, 具体情况则因星团而异^[9]。

除了球状星团和超星团这两类致密星团^[10-12]外, 在一些疏散星团^[13-15], 以及在恒星形成区^[16,17]内, 都观测到了成员星的质量分层。由此可见, 在物理性质很不相同的一些恒星系统中, 质量分层是一种相当普遍的观测现象, 任何恒星形成和演化理论必须对其做出合理的解释。有意思的是, 甚至在比星团尺度大得多的天体集团——星系团中, 也观测到了各类质量分层效应^[18-21]。

2 球状星团的质量分层

对于球状星团质量分层的研究主要集中于空间质量分层, 这是因为就球状星团来说, 很难取得中央密集区内不同质量恒星的高精度运动学观测资料, 这一点与疏散星团的情况不同^[9]。不过, 随着哈勃望远镜 (HST) 用于星团的观测研究, 鉴于 HST 的高空间分辨率和高聚光能力, 这种状况已有相当程度的改观。另一方面, 质量分层在球状星团的核区最明显, 随着团心距的增大这种效应往往会变得越来越不显著。在半质量半径或半光半径处, 分层效应就更不明显了^[22]。

星团的现时质量函数 (PDMF) 具有以下幂律形式^[23]:

$$\xi(m) = dN/dm = \xi_0 m^{-\alpha}, \quad (1)$$

式中, ξ_0 是归一化常数, 幂指数 α 是 PDMF 的斜率。在一些研究中有人采用了更合理的多重幂律形式, 即对不同质量范围的恒星, 式 (1) 中的斜率 α 取不同的数值^[24]。不过, 只要所涉及的星团 CMD 图上主序星的质量范围有限, 作为一级近似, 便可以采用式 (1) 这种单一斜率的函数形式。

球状星团空间质量分层的一个观测表现是, 恒星的观测光度函数 (以及质量函数) 因团心距的不同而不同, 即随着团心距的增大, 质量函数的斜率 α 逐渐变陡, 这说明相对外部区域而言, 在星团的中心区内有较多质量比较大的亮星。例如, 对星团 M92 和 M15 的质量分层的探究便采用了这条途径^[11,25]。另一方面, 随着星团的动力学演化, 与大质量恒星相比, 小质量恒星更可能出现于星团的最外部区域, 它们的束缚能较小, 容易摆脱团的引力束缚而逸出星团。由此可以推知, 星团的动力学演化时间越长, 它们的总体 PDMF 就显得越平坦^[26]。

质量分层的另一个观测证据是, 在星团中心区探测到了径向色指数梯度, 即 $(U-B)$ 和 $(B-V)$ 颜色朝着星团中心渐而变得更蓝, 这在球状星团 M15(NGC 7078) 中已有发现^[27,28]。

造成这种观测现象可能有两种原因: 由于双星和单星间的相互作用使星团核心区集聚了大量的蓝星, 或者是因为在中心区缺少低质量的主序星, 而这两种状态的出现很可能都与质量分层效应有关——大质量恒星向星团的中心区沉积。1994 年, De Marchi 和 Paresce 利用 HST 的观测资料, 在 M15 的中心区分辨出了大量的蓝色恒星, 其中大部分是蓝离散星^[29]。M15 是研究得最多的球状星团之一, 这个星团离开银道面比较远, 银面距约为 -4.7 kpc ^[30], 轨道偏心率并不太大 ($e = 0.34$)。所以, M15 与银河系的相互作用非常小, 星团外区恒星的潮汐剥离和蒸发效应也很小, 因而它目前的状态主要取决于星团形成期的初始条件和此后的内部动力学演化。

另一个对质量分层研究具有典型意义的球状星团是 Palomar 5(Pal 5)。这是一个颇为特别的晕族球状星团, 它的结构非常松散, 范围比较大, 质量仅约为 $5 \times 10^3 M_{\odot}$, 是一个低中心聚度的小质量星团, 并具有较扁的运动轨道 ($e = 0.46$), 距离银河系中心相当远, 银心距达 18.6 kpc 。由 SDSS 的大视场测光资料发现, 从 Pal 5 伸展出一些明显的潮汐尾, 延伸范围超过 10° ^[31,32]。潮汐尾的质量至少是目前团质量的 1.2 倍, Pal 5 主体的现时质量仅为 $5\,000 M_{\odot}$, 而它的原始质量估计约为 $70\,000 M_{\odot}$ ^[33]。

对于这样一个低中心聚度的团来说, 如果在大部分演化过程中中心聚度始终很低, 那就不会经历明显的内部动力学演化, 光度函数应该与原始状态没有什么差别, 而动力学质量分层应该不存在。事实上, 从 HST 的两个不同中心距小视场 (约为 $2'.4 \times 2'.4$) 的深度 ($V < 27.5 \text{ mag}$) 观测, 确实没有发现团的核心区表现出有质量分层^[34]。另一方面, 大视场 SDSS 观测资料 ($i^* < 22.0 \text{ mag}$) 也没有揭示出 Pal 5 的中心区和潮汐尾的光度函数有任何差异^[32]。但是, 后来 Koch 等人^[22]利用地面望远镜的大视场测光资料 (极限 B 星等约为 24.5), 证实 Pal 5 的光度函数随团心距而变化, 同时还发现团内较大质量的双星更明显地向团中心集聚, 这就有力地说明了该星团存在空间质量分层。这项工作表明, 为了有效地探讨星团质量分层的观测效应, 测光观测资料不仅要涉及足够暗的恒星, 而且被测恒星所涉及的视场范围应该足够大。

从目前来看, 讨论球状星团是否存在质量分层的主要途径, 是比较同一星团内不同团心距区域的光度函数, 这方面的工作是很多的 (如参考文献 [35—38] 等)。

3 超星团的质量分层

1971 年, van den Bergh^[39]在对星系 M82(NGC 3034) 的研究中, 提出了超星团的概念。实际上, 在 20 世纪 60 年代初 Hodge^[40]已在大麦云内观测到了这种年轻的大质量星团。之后, 这类星团不仅在星暴星系, 而且在包括银河系在内的一些正常星系中都有所发现, 有关情况可参见文献 [6], 此处不再赘述。

R136 是位于大麦云中的著名亮星云剑鱼 30(直径约为 120 光年) 核区的超星团, 年龄为 $3 \sim 5 \text{ Ma}$ 。1985 年, 人们利用全息斑点干涉技术分辨出了 R136 中的恒星^[41]。1996 年, Brandl 等人发现^[42], R136 中恒星密度轮廓的核半径随着恒星质量的增大而减小, 变化范围为 $1''.2 \sim 0''.2$ (见图 1), 其中核半径 R_c 按下式计算^[42]:

$$R_c = \sqrt{\frac{3\sigma_0^2}{4\pi G\rho_0}}, \quad (2)$$

式中, σ_0 是团中心区的视向速度弥散度, ρ_0 为中心区的质量密度, G 为引力常数。另一方面, 星团恒星质量函数的斜率随团心距的增大而变陡。上述两点充分说明, R136 存在明显的质量分层效应。

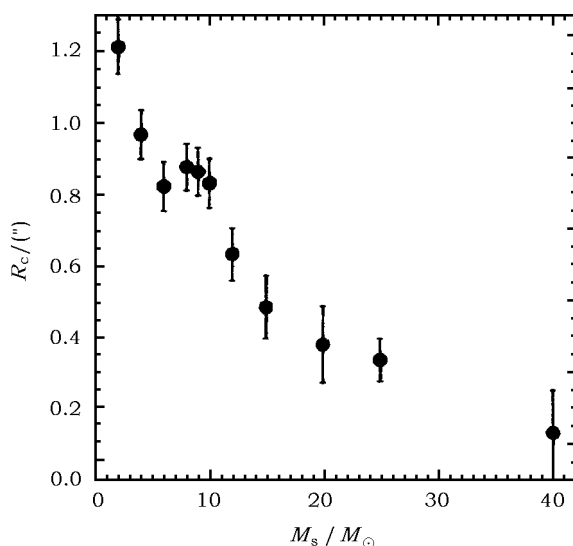


图 1 R136 的核半径与恒星质量的关系^[42]

除了 R136 之外, 人们对大麦云中其他一些年轻致密富星团的质量分层也进行了较多的研究, 这是因为大麦云是最近的河外星系, 距离约为 (50 ± 2) kpc^[1], HST 可以为之提供较为充分的观测资料。它首次能分辨出大小麦云内一些富星团中心附近的单颗恒星, 而它们中不乏大质量的年轻星团, 与银河系星团的情况有很大的不同。这方面的工作比较多, 例如, 2002 年 de Grijs 等人^[43-45] 对大麦云中最年轻的两个富星团 NGC 1805 和 NGC 1818 (年龄约为 6400 万年) 进行了研究, 结果表明它们的 PDMF 的斜率随团心距而变化, 说明这两个星团存在质量分层。2004 年, Gouliermis 等人^[46] 的工作证实了他们的结论。最近, Kerber 和 Santiago^[23] 对包括上述两个团的大麦云内 5 个年轻富星团 (另 3 个为 NGC 1831、NGC 1868 和 Hodge 14) 进行了研究, 这些星团的年龄范围为 6400 万年 ~ 18 亿年。结果表明, 所有这 5 个星团 PDMF 的斜率都随团心距 R 的增大而变陡, 从 $R < R_c$ 中心区内的 $\alpha \leq 1.8$, 增大到 $R = 2 \sim 3R_c$ (对 Hodge 14 是 $R = 2 \sim 4R_c$) 区域内的 $\alpha \simeq 2.35$, 由此说明所有这些星团都明显存在质量分层效应。

M82 是最近的大质量星暴星系, 距离为 (3.6 ± 0.3) Mpc, 在该星系中至少有 20% 的恒星形成出现于超星团之中, 在星系核区有 20 多个超星团, 其中 M82-F 是距星系中心 500 pc 范围内最明亮的光学可见星团, 估计该星团年龄的范围为 40~60 Ma^[47]。由于尘埃消光严重, 为探究这类超星团的特征, 必须进行近红外观测。M82 中超星团的典型年龄约为 10^7 a, 它们为探索初始质量函数 (IMF) 的变化提供了非常好的机会。

对于那些无法分辨出其中单颗恒星的远距离超星团来说, 不可能通过恒星计数直接探测团的质量分层效应。但是, Sternberg^[48] 注意到: 对一个有质量分层的星团来说, UV 和 IR 波段的像应该比可见光波段的像来得小, 因为前者的光辐射主要来自红超巨星, 而后者主要

来自中等质量的主序星。

McCrady 等人^[47]利用 HST 所取得的高分辨率资料,对星团 M82-F 的多波段光学像进行了分析。结果发现:随着观测波段的的增长,星团像的尺度逐渐减小,而且这种趋势相当明显。在较短的波段,波长越短支配星团光辐射的恒星的温度越高,不过这些恒星仍位于主序上,它们是一些中等质量的主序星。另一方面,在较长波段光辐射主要来自演化晚期的恒星,它们的初始质量要比星团主序折向点处恒星的质量大。星团大小与观测波长负相关,意味着 M82-F 存在质量分层效应:近红外光辐射主要来自大质量的演化晚期红星,它们的中心聚度要比中等质量主序星的中心聚度高,而后者则是可见光辐射的主要来源。

4 关于质量分层的形成机制

从上面的讨论可以看出,对于致密星团来说,无论是年老的球状星团,还是年轻的超星团,质量分层表现为一种较普遍存在的观测现象,因此这类现象的形成机制引起人们浓厚的兴趣,并进行了深入的探讨和研究。

关于质量分层效应的起源,可能存在两种完全不同的机制:动力学质量分层和原初质量分层。

所谓动力学机制,是认为分层效应起源于星团形成后的内部动力学演化。团内恒星因相互间的交会,即因两体弛豫过程而趋于能均分状态^[49,50]。从总体上看,在这个过程中团内的大质量恒星会因损失动能而使运动速度减小,结果便朝着团中心内落,而小质量恒星则因获得动能而使运动速度增大,并向星团外围区域扩散。如果设星团中恒星的平均质量为 \bar{m} , 而其中某一类大质量恒星的质量为 m_h , 那么该类恒星内落至星团中心所需要的时标为^[50,51]

$$t_{\text{seg}} \approx \bar{m}/m_h \times t_{r1}, \quad (3)$$

式中, t_{r1} 是星团的半质量弛豫时标。弛豫时标 t_{r1} 的含意是,经过 t_{r1} 这么长一段时间后,因恒星间的相互交会,使恒星的动能重新进行分配,并达到大体上服从麦克斯韦分布的状态。

Spitzer 定义恒星系统动力学质量分层的特征时标为 $m_1/m_2 \times t_{r1}$, 这里 m_1 和 m_2 是团内恒星质量的最低值和最高值, t_{r1} 为两体弛豫时标^[23,49]。这个关系式表明,当 $m_2 \gg m_1$ 时,出现质量分层所需的时间是很短的。因此,有人使用内部动力学演化效应来解释非常年轻(年龄不超过 200 万年)的星团(如猎户星云星团)的质量分层现象^[52]。另一方面,质量分层时标 t_{seg} 与 t_{r1} 成正比,而弛豫时标 t_{r1} 与恒星的数密度成反比^[50],所以弛豫的影响首先出现于星团的核区,这就是质量分层效应在球状星团核区最明显,并随着团心距增大而变得越来越不显著的原因之一。

星团的动力学演化不仅会因质量分层效应使小质量恒星倾向于分布在星团的外围区域,而且会使外区中的恒星进一步摆脱团的引力束缚而从星团中逃逸出去。这里又有两种不同的逃逸机制:(1) 2 颗恒星间发生一次密近交会,结果使其中一颗恒星的运动速度大于当地的逃逸速度而逸出星团,这一过程称为抛射;(2) 一系列较弱的远距交会使一颗恒星因不断获得能量,最终它的运动速度会大于逃逸速度而逸出星团,这种渐进式的逃逸过程称为蒸发,蒸发过程比抛射更复杂,而抛射可算是蒸发的一种特例。动力学质量分层和团内恒星的蒸发,这两

种效应的联合作用使得较小质量的恒星比较容易从团中逸出。在这种动力学演化的过程中,随着小质量恒星不断脱离星团,团的质量函数变得越来越平坦^[15,23,26]。

除了上述星团内部的动力学演化效应外,来自外部的引力作用也会影响到星团的动力学演化,这就是外部动力学效应。外部动力学效应的起因又可以分为一般意义上的银河系潮汐力场的作用,以及当星团穿越银盘过程中的盘冲击作用。尽管这种外部作用对团中心区域的恒星来说并不重要,但会提高恒星脱离星团的逃逸率^[50]。

一些球状星团的 PDMF 要比另一些平坦,斜率较为平坦的星团的半光半径往往比较小,或者银心距比较小,而破坏率则比较高^[53],但质量函数的斜率与星团金属度之间的关系则很不明显,因而这种现象看来主要取决于星团的银心距^[54]。人们相信这类关系主要起因于内部的动力学演化和外部的潮汐剥离。在银心距较小的地方,银河系引力场比较强,潮汐剥离的现象就更为普遍,而位于远距离银晕中的星团应该更容易保住它们的小质量成员星。此外,观测表明还有其他一些因素在起作用,如团内恒星的中心聚度,星团运动轨道的偏心率 and 倾角等。特别是在那些低中心聚度的星团内,团内恒星的交会率相对较低,动力学分层的发展过程就比较慢。如 King 等人^[55]早已注意到,球状星团质量分层的程度与星团势阱的深度有关,或者说与中心聚度的大小有关。

与动力学分层不同的另一种机制是原初质量分层,这种机制可以是恒星演化理论的一种结果:因为原星团中央区的密度较高,相应地形成更多大质量恒星的可能性更大。在团内恒星形成之初,质量分层现象的出现可以有两途径:(1)质量分层现象是通过原恒星之间的相互作用出现的,因为随着密度的增高,原恒星间发生碰撞的可能性就增大^[56];(2)原恒星的质量越大,对周围物质的吸积率也越大,并由此造成团星的质量分层^[57]。这两种因素的结果是越靠近星团的中心,越容易形成较大质量的恒星,从而产生原初质量分层。

许多研究表明,对于一些年轻的富星团来说,由恒星演化状态所确定的星团的真实年龄,远小于因标准两体弛豫过程产生能观测到的质量分层所需要的时间,但在这些星团中,也观测到了明显的质量分层现象^[16,17,44,51,58],这就不能用动力学分层机制来解释。McMillan 和 Vesperini^[51]提出用分层指数

$$f_{\text{seg}} = R/R_h \quad (4)$$

来表征一个星团中质量分层的程度,这里 R 和 R_h 分别为整个团的半质量半径和团内大质量恒星的半质量半径。一些数值模拟工作表明:对于一个初始无质量分层的系统来说,内部动力学演化不可能用来说明在这类系统中所观测到的质量分层的程度^[56]。

大质量恒星大多在恒星形成区的中心区形成,这一点已经为不少观测和理论研究所证实^[59-63],说明一些星团在诞生之时已存在质量分层,对此人们往往用在年轻星团的中心区域内恒星有较高的吸积率,作为此类初始质量分层的主要形成机制^[63]。

最近,McMillan 和 Vesperini 通过 N 体数值模拟,提出了一种星团形成机制,以更细致地探索在星团形成的早期阶段,产生质量分层的动力学过程^[51]。他们沿用了 Bonnell 等人的恒星形成模型^[64]:一开始恒星的形成是以一些小的星群的形式出现的,然后这些小星群再通过并合形成较大的系统——星团。同时假设,这些星群在形成之时内部就已存在明显的质量分层,或者星群自身的弛豫时标非常短,因而在实现并合之前就能出现质量分层。无论哪种情况,最后形成的星团会继承它们前身星群内恒星的 分层现象,从而为那些存在质量分层的年

轻星团提供了一种自然的解释。进一步的研究结果表明, 尽管成群或无成群初始条件都会导致类似的分层密度轮廓, 形成质量分层的年轻星团, 但是成群系统达到这一状态的过程要比无群系统快得多。

对于星团来说, 质量分层是一种较普遍的现象。这种分层效应可以是初始的, 也可以是演化引起的, 更可能是两者兼而有之, 具体情况则取决于团的禀性质和运动轨道。不过, 至少就目前来看, 很难估计在所观测到的质量分层中, 有多少是初始的, 又有多少是起因于演化效应。在这个问题上的未来进展, 无疑取决于获得更多、精度更高的观测资料和深入的理论研究这两方面的因素。

参考文献:

- [1] Binney J, Merrifield M. *Galactic Astronomy*. Princeton: Princeton University Press, 1998
- [2] Hodge P W. *ApJ*, 1961, 133: 413
- [3] van den Bergh S. *A&A*, 1971, 12: 474
- [4] Arp H, Sandage A. *AJ*, 1981, 90: 1163
- [5] Melnick J, Moles M, Terlevich R. *A&A*, 1985, 149: L24
- [6] 赵君亮. *天文学进展*, 2007, 25: 13
- [7] Larsen S S. *A&A Suppl. Ser.* 1999, 139: 393
- [8] Zhang Q, Fall S M. *ApJ*, 1999, 527: L81
- [9] 赵君亮. *天文学进展*, 2007, 25: 338
- [10] De Marchi G, Paresce F. *ApJ*, 1996, 467: 658
- [11] Andreuzzi G, Buonanno R, Fusi Pecci F, et al. *A&A*, 2000, 353: 944
- [12] Howell J H, Guhathakurta P, Tan A. *AJ*, 2000, 119: 1259
- [13] Raboud D, Mermilliod J-C. *A&A*, 1998, 333: 897
- [14] Durgapal A K, Pandey A K. *A&A*, 2001, 375: 840
- [15] Bonato C, Bica E. *A&A*, 2005, 437: 483
- [16] Hillenbrand L A, Hartmann L W. *ApJ*, 1998, 492: 540
- [17] Stolte A, Brandner W, Brandl B, et al. *AJ*, 2006, 132: 253
- [18] Springob C M, Haynes M P, Giovanelli R. *ApJ*, 2005, 621: 215
- [19] Andreon S. *A&A*, 2002, 382: 82
- [20] Dors O L Jr, Copetti M V F. *A&A*, 2006, 452: 473
- [21] Adami C, Biviano A, Mazure A. *A&A*, 1998, 331: 439
- [22] Koch A, Grebel, E K, Odenkirchen M, et al. *AJ*, 2004, 128: 2274
- [23] Kerber L O, Santiago B X. *A&A*, 2006, 452: 155
- [24] Kroupa P. *MNRAS*, 2001, 322: 231
- [25] Pasquali A, de Marchi G, Pulone L, et al. *A&A*, 2004, 428: 469
- [26] Baumgardt H, Makino J. *MNRAS*, 2003, 340:227
- [27] Bailyn C D, Grindlay J E, Cohn H, et al. *AJ*, 1989, 98: 882
- [28] Cederbloom S E, Moss M J, Cohn H N, et al. *AJ*, 1992, 103: 480
- [29] De Marchi G, Paresce F. *ApJ*, 1994, 422: 597
- [30] Harris W E. *AJ*, 1996, 112: 148
- [31] Odenkirchen M, Grebel E K, Rockosi C M, et al. *ApJ*, 2001, 548: L165
- [32] Odenkirchen M, Grebel E K, Dehnen W, et al. *AJ*, 2003, 126: 2385
- [33] Dehnen W, Odenkirchen M, Grebel E K, et al. *AJ*, 2004, 127: 2753
- [34] Grillmair C J, Smith G H. *AJ*, 2001, 122: 3231

- [35] Piotto G, Zoccani M. *A&A*, 1999, 345: 485
- [36] Albrow M D, De Marchi G, Sahu K C. *ApJ*, 2002, 579: 660
- [37] Bellazzini M, Fusi Pecci F, Montegriffo P, et al. *AJ*, 2002, 123: 2541
- [38] Andreuzzi G, Testa V, Marconi G, et al. *A&A*, 2004, 425: 509
- [39] van den Bergh S. *A&A*, 1971, 12: 474
- [40] Hodge P W. *ApJ*, 1960, 131: 351
- [41] Weugert G, Baier G. *A&A*, 1985, 150: L18
- [42] Brandl B, Sams B J, Bertoldi F, et al. *ApJ*, 1996, 466: 254
- [43] de Grijs R, Johnson R A, Gilmore G F, et al. *MNRAS*, 2002, 331: 228
- [44] de Grijs R, Gilmore G F, Johnson R A, et al. *MNRAS*, 2002, 331: 245
- [45] de Grijs R, Gilmore G F, Mackey A D, et al. *MNRAS*, 2002, 337: 597
- [46] Gouliermis D, Keller S C, Konizas E, et al. *A&A*, 2004, 416: 137
- [47] McCrady N, Graham J R, Vacca W D. *ApJ*, 2005, 621: 278
- [48] Sternberg A. *ApJ*, 1998, 506: 721
- [49] Spitzer L. *Dynamical Evolution of Globular Clusters*. Princeton: Princeton University Press, 1987
- [50] Binney J, Tremaine S. *Galactic Dynamics*. Princeton: Princeton University Press, 1987
- [51] McMillan S T, Vesperini E. *ApJ*, 2007, 655: L45
- [52] Kroupa P, Aarseth S, Hurley J. *MNRAS*, 2001, 321: 699
- [53] Piotto G, Zoccani M. *A&A*, 1999, 345: 485
- [54] Chabrier G, M é ra D. *A&A*, 1997, 328: 83
- [55] King I R, Sosin C, Cool A M. *ApJ*, 1995, 452: L33
- [56] Bonnell I A, Davies M R. *MNRAS*, 1998, 295: 691
- [57] Behrend R, Meader A. *A&A*, 2001, 373: 190
- [58] Gouliermis D, Keller S C, Kontizas M, et al. *A&A*, 2004, 416: 137
- [59] Elmegreen B, Krakowski A. *ApJ*, 2001, 562: 433
- [60] Klessen R. *ApJ*, 2001, 556: 837
- [61] Bonnell I A, Clarke C J, Bate M R, et al. *MNRAS*, 2001, 324: 573
- [62] Stanke T, Smith M D, Gredel R, et al. *A&A*, 2006, 447: 609
- [63] Bonnell I A, Bate M R. *MNRAS*, 2006, 370: 488
- [64] Bonnell I A, Bate M R, Vine S. *MNRAS*, 2003, 343: 413

Mass Segregation of Compact Star Clusters and its Origins

ZHAO Jun-liang

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

Abstract: The phenomenon of mass segregation of a star cluster means a preferential concentration of high mass stars towards the cluster center and a preferential allocation of lower mass stars towards the periphery of the cluster, which seems to occur in star systems with widely distinct physical properties. As a kind of compact star systems, globular clusters are very old ones with ages of older than 10^{10} years, which are different from another kind of young compact clusters, super star clusters (SSC) or massive young clusters (MYC), with ages ranging from a few 10^6 to 10^8 years. It is interesting that mass segregation of member stars has been observed for these two kinds of compact clusters.

An important observational effect of mass segregation of a star cluster is expected that the slope α of the PDMF (present day mass function) of the cluster is dependent on radial distance r from the cluster center, in the sense α becoming steeper with r increasing. This radial variation of the mass function reveals mass segregation for both old globular clusters and young SSC or MYC. On the other hand, it is found that stars of different masses in a cluster show the pronounced, systematic variations of the core radius, which is another observational effect of mass segregation. Mass segregation mainly affects the innermost region of clusters, while dynamical interaction with the Galaxy acts predominantly their outermost regions inducing stellar evaporation and stripping.

Further evidence of mass segregation in a globular cluster comes from the detection of color gradients whereby the color indices such as $(U - B)$ or $(B - V)$ get bluer towards the cluster center. A possible explanation for such color gradients is mass segregation of main sequence (MS) stars, since stars near the MS turnoff, with higher and bluer color, are expected to be more centrally concentrated than the fainter, redder, and lower mass stars. A core concentration of blue stars is likely due to binary-single star interaction or the central lack of low mass MS stars.

Mass segregation cannot be observed directly via star counts for young compact clusters in which individual stars are unresolved. However, a mass-segregated cluster should appear smaller in the UV and IR, where the radiation is dominated by red supergiants, than in the optical, where the radiation is dominated by intermediate mass MS stars. The negative correlation between cluster size and observed wavelength suggests that the massive red evolved stars are more centrally concentrated than the intermediate mass MS stars. The other effect of mass segregation for SSC is that core radii of stars with high mass stars and with lower mass ones are different in the sense that core radii decrease with star's mass becoming higher.

There are two possible and distinct origins for the effect of mass segregation: dynamical and primordial. The dynamical mass segregation is caused by the dynamical evolution of the cluster led by two-body relaxation, where the cluster member stars trend to reach the kinetic energy equipartition due to stellar encounters, in the course of which the high mass stars decrease their velocities, sinking towards the cluster center, and meanwhile the low mass ones speed up and spread out to the periphery of the cluster.

It is indicated from numerical stimulation that dynamical evolution from initially unsegregated systems cannot account for the degree of mass segregation observed in some young clusters. Therefore, the obvious explanation is that these clusters were born mass segregated. Recent observational and theoretical studies do indeed suggest that high mass stars form preferentially in the centers of star-forming regions, and the mechanism invoked to explain this primordial mass segregation relies mainly on the higher accretion rate for stars in the centers of young clusters.

Key words: astrophysics; star cluster; globular cluster; super star cluster; mass segregation; formation mechanism