

球状星团的形成与演化 (II) : 模型

林 清 赵君亮 宋国玄

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

简要介绍了若干关于球状星团形成与演化的代表性模型, 包括球状星团诞生于星系形成之前的模型、自增丰演化模型、原始云团的碰撞聚合模型、两阶段形成模型以及星系并合激发形成球状星团的模型和吸积模型等。

关键词 球状星团 — 形成与演化 — 银河系 — 星系演化 — 方法: 模型

分类号 P154.12

1 引 言

球状星团是宇宙中最为古老的天体之一, 通常认为它们与星系形成和演化的大背景有密切的联系。要了解球状星团的形成和演化历史, 首先需要了解一些有关银河系和星系的形成及演化的模型, 本文将对此作一简要回顾。

Ashman 和 Zepf(1998)^[1] 根据 Fall 和 Rees(1988)^[2] 的思路, 按照球状星团与母星系形成的时间先后关系将球状星团的演化模型区分为三大类, 即球状星团形成于星系形成之前、与星系同时形成以及形成于星系形成之后。本文将遵从这一分类方式逐一介绍, 并简要介绍由 Lin 等人 (2001)^[3] 发展起来的一种球状星团自增丰化学演化模型。

需要指出的是, 虽然目前还尚未有一个模型可以圆满地解释球状星团形成与演化的所有观测事实, 但它们都分别从各个侧面描述了球状星团的形成机制和演化过程。

2 银河系和星系的形成与演化

关于银河系的形成, 存在两类明显不同的模型, 一类称为“整体耗散坍缩”模型, 以 Eggen 等人 (1962)^[4] 的工作 (ELS 模型) 为基点。另一类可称为“碎片混沌并合”模型, 以 Searle 和 Zinn(1978)^[5] 的工作 (SZ 模型) 为代表。

国家自然科学基金 (10073016) 资助课题 973 项目 (G1999075406) 资助课题

特约稿 2001-05-30 收到

“整体耗散坍缩”模型以场星金属度与轨道性质的相关性为基础。ELS 模型注意到场星的金属度越低, 其偏心率越大。在此基础上, 他们认为银河系产生于一个原始尺度约 100 kpc 的气体云, 该气体云某一时刻在引力作用下摆脱了宇宙的整体膨胀而开始自由坍缩, 坍缩过程中气体云中密度较大的团块形成了球状星团和晕场星。由于那时气体云是贫金属的, 所以由它们产生的银晕恒星和球状星团也是贫金属的。又由于气体云向银心俯冲, 使它们的轨道呈极端椭圆型, 所以银晕恒星绕银心运行的轨道也表现为极大的偏心率。在坍缩期间, 有些大质量恒星爆发而给气体添加了金属含量。当气体云进一步坍缩时, 耗散碰撞使其损失部分动能, 而角动量守恒则使气体云逐渐形成一个旋转的盘。此后在这些气体中形成的恒星一方面具有较高的金属度, 另一方面也普遍具有较圆的轨道, 这就是盘族天体的特征 (与气体的频繁碰撞相反, 恒星和恒星之间的碰撞是十分稀少的, 所以早期无耗散状态下形成的那些恒星仍能保持原有的空间分布和较扁的椭圆轨道)。

自从 Toomre A 和 Toomre J (1972)^[6] 开创性地进行了星系相互作用的数值模拟以后, 越来越多的人相信星系开始时可能都是旋涡星系, 宇宙早期星系碰撞比较频繁, 两个旋涡星系碰撞并合后完全可能形成旋转较慢而以随机运动为主的椭圆星系。并且并合引起的冲击会导致大批恒星形成, 从而消耗掉大量的气体, 造成椭圆星系的气体含量较少。

ELS 模型曾经是银河系形成和演化研究中占主导地位的模型, 它要求银河系的坍缩过程是快速的, 应在 1Gyr 中就已完成。由于球状星团是古老的天体, 其年龄与银河系相当, 因此很自然可以认为球状星团就是在银河系的整体坍缩过程中诞生的, 不同球状星团间的年龄差异应小于 1Gyr。大多数球状星团的观测结果满足这一要求, 但进一步的研究却发现了许多例外。

Searle 和 Zinn(1978)^[5] 提出了两个重要的观测事实, 一是年龄可能是影响球状星团水平支形态的第二参数, 并由此出发认为球状星团的年龄跨度至少在 1Gyr 以上, 不可能在自由坍缩时标那么短的时间内同时形成; 二是他们的实际观测表明至少外晕球状星团的金属度不存在梯度, 这与当时广泛流行的认为 ELS 模型要求球状星团金属度存在梯度的观点不符。他们提出了与 ELS 模型完全不同的另一种形成模型——“碎片混沌并合”模型。该模型认为原星系物质中有许多大的气体“碎片”, 它们并不纯粹向星系中心作径向运动, 而是互相碰撞, 在碰撞中耗散能量并形成一些冷而致密的云团, 从中形成恒星或星团。这一过程大大延长了球状星团形成的时间, 使球状星团的年龄出现较大的跨度。另外, 由于各“碎片”独立演化, 所以也不会出现明显的金属度梯度分布。

ELS 模型中, 银晕产生于快速自由坍缩, 银盘则通过“耗散”过程而形成, 即气体云相互碰撞, 损耗能量并由角动量守恒而形成为一个旋转的盘, 其特点在于“一致的”、“径向运动”和“快速演化”, 引力在其中起主要作用。而 SZ 模型的根本特点则在于“碎片”、“混沌的碰撞”和“较缓慢的演化”, 碰撞的作用大于引力的作用。这一混沌图景看来至少在银河系的外晕区是合理的, 伴星系可能就是“碎片”的一类重要候选者 (Zinn 1993^[7]), 但银河系内晕区仍有可能发生 ELS 模型中的快速坍缩, 因为观测表明内晕球状星团倾向于具有相似的年龄 (林清等人 2001^[47])。

3 球状星团的第一类形成图景 — 诞生于星系形成之前

这一类模型的原型由 Peebles 和 Dicke (1968)^[8] 提出, 它指出宇宙退耦复合时期 ($T \approx 4000\text{K}$) 时的金斯质量约为 $10^5 \sim 10^6 M_{\odot}$, 正好就是球状星团的典型质量。因此认为球状星团尺度的原始气体云团即在此时 (星系尚未形成) 由引力不稳定性而产生, 球状星团则是这些原始云团继续收缩演化后的产物。

这一类模型最大的好处在于可以很自然地解释为什么不同星系之间的球状星团光度函数保持很好的一致性。但也面临很大的困难, 主要有以下几方面:

(1) 星系际球状星团很少见, 大多数球状星团都出现在星系内部。

(2) 不同星系中的球状星团有着不同的金属度分布、空间分布和比频等。Roserblatt 等人 (1988)^[9] 以及后来的 West (1993)^[10] 提出了“有偏”形成模式, 指出球状星团更倾向于在高密度的环境中产生, 星系团中心的亮星系比频较高可能即由此引起。但近来关于比频的仔细研究表明这一倾向并不显著 (Ashman 和 Zepf 1998^[1])。金属度的双峰分布更是这类形成图像所无法解释的。

(3) 在冷暗物质 (CDM) 为主的宇宙框架下, 第一类形成图景都要求球状星团存在暗物质晕 (Peebles 1984)^[11], 但球状星团的动力学研究则不支持暗晕的存在。

4 球状星团的第二类形成图景 — 与星系同时形成

这是当前最为流行的一类球状星团形成模型, 它认为球状星团形成于原星系气体云的引力坍缩过程中。

4.1 热不稳定性两相模型与球状星团的自增丰

Fall 和 Rees (1985)^[12] 提出一种热不稳定性形成球状星团的模型。他们认为, 在原星系气体云的坍缩过程中, 热不稳定性会激发产生一种两相结构, 即冷而致密的云团被周围热而稀薄的气体所包围, 两者之间保持压力平衡。其中热云温度 $T \approx 2 \times 10^6 \text{K}$, 而冷云的温度则为 10^4K 左右。该文讨论了电离平衡下各种可能的加热机制和冷却机制, 指出若金属度较低, 则云团在 10^4K 左右温度时, 冷却速度将足够小, 使得这些云团可以较长时间处于这一温度下, 这些冷云的金斯质量正好就是 $10^6 M_{\odot}$, Fall 和 Rees 认为它们就是球状星团的前身。

这一模型很关键的一点是要求原初云团能在较长时间内维持在 10^4K 的温度下, 否则不会出现与典型球状星团质量相当的金斯质量。Fall 和 Rees 指出只有当冷却时标长于自由下落时标时, 这一条件才能满足。其后一些更仔细的工作考虑了非平衡态辐射冷却, 则发现在金属度很低的环境下, 作为主要冷却剂的 H_2 的大量产生会显著缩短冷却时标 (Shapiro 和 Kang 1987^[13])。为克服这些可能破坏云团稳定于 10^4K 温度的困难, Kang 等人 (1990)^[14] 对这一模型作了发展, 指出如果在球状星团形成时存在足够的由大质量恒星或活动星系核 (AGN) 所产生的紫外 (UV) 或 X 射线辐射, 则这些辐射流会减缓冷却速率, 使得云团温度得以维持。但外部辐射源是否能够解决冷却速率过快的困难还是一个有争议的问题 (Ashman 1990^[15])。

Lin 和 Murray (1992)^[16] 以及 Murray 和 Lin (1992)^[17] 在 Fall-Rees 模型的基础上, 考虑了

气体的原初金属度用两相平衡结构建立起他们自己的模型。他们根据银河系中球状星团关于冷却时标和星团密度的一些观测事实指出, 原星团在恒星形成之前一定处于一个由外界热源所维持的热平衡之中, 同时还必须与周围介质保持流体静力学平衡。Murray-Lin(1992) 模型中的平衡温度为 10^3K 。为克服冷却时标短于动力学时标的问题, 也必须引入足够的外部加热源, 另外, 该模型与 Fall-Rees 模型一样, 都应有球状星团质量随银心距的增大而增大、球状星团质量随金属度的增加而减少等推论, 但这些并未得到观测事实的支持。

在 Fall-Rees 的框架下, Cayrel(1986)^[18] 及 Brown、Burkert 和 Truran(1991,1995)^[19,20] 等人提出了通过两代恒星形成球状星团的自增丰模型, 其要点为:

(1) 星团形成于原星系气体云中, 这些气体云本身温度大约为 10^4K , 周围被较热 ($T \approx 10^6\text{K}$) 的云间气体所包围。假设原云团的金属度为零, 云团主要靠热压力来抵抗引力, 这种云团在达到金斯质量 ($\approx 10^6 M_{\odot}$) 时出现引力不稳定性而坍缩形成星团。

(2) 引力坍缩在原始云团的核心首先形成第一代恒星, 其中包括了相对较多的大质量星, 这些大质量星晚期爆发后形成的超新星遗迹并合成一个向外膨胀的“超级壳层”, 这一壳层由于是超新星爆发的产物, 所以已被增丰到一定的金属度。

(3) 超新星爆发产生的激波在已增丰了的“超级壳层”中引发第二代恒星形成, 其恒星的形成效率比第一代高得多。由于整个系统的温度下降, 壳层中形成的第二代恒星向云团中心坍缩, 从而产生了今天看到的球状星团, 并具有一定的金属度。由于超级壳层具有混合金属度的能力, 所以球状星团内部的金属度十分均匀。

这一典型的自增丰模型可以用来解释观测到的银河系晕族球状星团的金属度。对这一模型的主要批评意见认为, 要解释观测到的球状星团金属度分布范围, 第一代恒星中应含有足够多的大质量星, 它们释放出的能量可能使刚形成的星团瓦解。然而, Parmentier 等人 (1999)^[21] 专门探讨了这一问题, 计算表明第一代恒星即使产生多达 200 颗以上的 II 型超新星爆发, 在较热的气体压力作用下, 星团也不至于瓦解, 而这一量级的 II 型超新星爆发已足够使得星团增丰到现在的观测值范围。

Parmentier 等人 (2000)^[22] 更进一步发展了上述晕族球状星团自增丰理论, 导出自增丰所能达到的金属度与外部气体压力有关; 压力越大, 最终生成的金属度越高。由于外部压力又随着银心距的增大而减小, 因此晕族球状星团金属度应表现随银心距向外递减的梯度。虽然将所有的银河系晕族球状星团金属度观测数据都放在一起考虑似乎并不支持这一推论, 但他们根据 Zinn(1993)^[7] 对“年轻”、“年老”晕族团的区分, 认为“年老”晕族团才是银河系真正的本体成员, 而“年老”的晕族团确实存在预期的金属度梯度。

4.2 超巨分子云的碰撞聚合模型

Larson 在其 1996、1993 年^[23,24] 以及更早的文献中提出了另一类完全不同的演化图景。根据他对银河系以及一些邻近星系中的恒星形成区的总结, 恒星形成过程具有这样一些特点:

(1) 年轻星团总是形成于巨分子云中最密的气体团块 (称为“核”) 中。

(2) 巨分子云中能够形成星团的那部分质量仅占巨分子云总质量的千分之一左右, 也就是说星团的形成需要一个庞大的气体库。

(3) 巨分子云中的场星似乎也倾向于以小星群的形式生成, 只是它们的引力束缚太弱而很快解体成为场星。

(4) 巨分子云越大, 其中形成的原星团也越大, 例如在 $\approx 10^5 M_{\odot}$ 的猎户巨分子云中已观测到有 $10^2 \sim 10^3 M_{\odot}$ 的星团正在形成; 在 $\approx 2 \times 10^6 M_{\odot}$ 的大麦云中 30 Dor 区域, 一个 $\approx 2 \times 10^4 M_{\odot}$ 的星团正在形成; 而在正处于碰撞并合状态中的“触角星系”中, 一个 $\approx 10^5 M_{\odot}$ 的年轻星团正从一个 $10^7 \sim 10^8 M_{\odot}$ 的被吸积的气体云块中诞生。

(5) 巨分子云中具有许多密集的气体团块和纤维结构, 其内部压力主要来自于湍动和磁场, 热压力的贡献甚小, 所以巨分子云的寿命比单纯辐射冷却所预期的寿命要长许多, 巨分子云一直要维持到内部磁场能逐渐泄漏完才会冷却并坍缩 (McKee 等人 1989^[25]), 除非有外部作用使其突然耗散和瓦解, 否则巨分子云可以有足够的时间使密集的气体“核”不断地通过碰撞聚合而增长并逐渐形成恒星。

(6) 巨分子云中的致密气体核可能正是球状星团的原型, 巨分子云中致密气体核的质量谱正好也符合 $dn/dM \propto M^{-\alpha}$ ($\alpha = 1.5 \sim 2.8$)。LMC 和其它相互作用星系中的年轻星团也具有类似的质量谱, 这与球状星团系统大质量端的质量谱是完全一致的。

以上这些事实都表明巨分子云中球状星团的形成机制可能与在一些富气体星系中观测到的星团形成机制是相同的。问题在于球状星团的质量范围为 $10^4 \sim 10^6 M_{\odot}$, 按照 10^{-3} 的形成效率, 需要有一个 $10^7 \sim 10^9 M_{\odot}$ 量级的超巨分子云 (SGMC) 存在, 这些超巨分子云比现在已知的任何一个巨分子云都大, 在星系形成早期, 它们是否真的存在呢?

球状星团可能确实更倾向于形成于宇宙的早期, 因为只有在那个时期有足够多的气体可以形成 SGMC, 而现在的宇宙中相当多的气体已经转化成恒星, 所以找到 SGMC 的概率就很低了, 但在星系碰撞这种剧烈的并合过程中仍有可能激发产生新的球状星团系统。

Harris 和 Pudritz(1994)^[26] 及 McLaughlin 和 Pudritz(1996)^[27] 发展了一套关于从 SGMC 中通过云团碰撞聚合形成原始球状星团的模型, 其物理图像为: 假设原始的 SGMC 中存在许多密集的气体团块单元, 其典型大小 $m_0 \approx 100 M_{\odot}$, 且具有较大的运动速度。当两个云团单元碰撞时, 相互粘而成一个更大的气体云团, 这种连续不断的并合使云团慢慢增大, 但增大到一定大小时, 会发生恒星形成过程, 从而阻止了云团的继续增大, 星团即从中诞生, 剩余的气体则返回参与新的云团增长过程, 这样一种动态的增长和瓦解过程最终会产生一个云团的质量谱 dn/dM 。

Field 和 Salsaw(1965)^[28] 最早尝试建立了简单的碰撞并合模型, 它没有考虑瓦解和冷却, 得到 $dn/dM \propto M^{-1.5}$ 。Kwan(1979)^[29] 对此做了发展, 考虑了云团的内部结构和云团速度的分布与质量的关系, 得到了一个指数范围为 $1.5 \sim 2.0$ 的质量谱。McLaughlin 和 Pudritz(1996)^[27] 则引入了恒星形成和瓦解机制, 对这一问题作了细致的分析, 得到的质量谱取决于两个关键参数: 一个是云团寿命与云团质量的幂律式关系中的幂指数 c ; 另一个是云团寿命与典型云团碰撞时标之比 β 。他们还指出是否存在气体云团的初始质量谱对结果的影响不大, 大量的碰撞将完全消除初始质量谱的影响。

球状星团质量谱明显表现为两段, $M > 10^5 M_{\odot}$ 的一段为 $\alpha = -1.8$ 的幂律谱, $M < 10^5 M_{\odot}$ 的一段则十分平缓。McLaughlin 和 Pudritz(1996)^[27] 模型很好地再现了 $M > 10^5 M_{\odot}$ 的质量谱, 而小质量端的球状星团数目稀少应是长期动力学演化的结果。

Elmegreen 和 Efremov(1997)^[30] 将这一形成模型扩展到其它星团, 认为巨分子云的碰撞聚合过程是各类星团形成的普适规律, 星团的形态差异是由于形成时的压力不同所致, 球状星

团形成于压力较高的区域, 疏散星团则可能形成于压力较低的区域。

4.3 两阶段形成模型

由于球状星团系统的金属度分布普遍呈双峰结构, 而金属的增丰则是随时间而增长的, 两个明显的金属度峰值意味着球状星团经历了两个不同的形成期。一般认为第一次球状星团形成是与原星系的坍缩同时开始的, 关于第二次球状星团形成, 许多研究工作将其归入星系并合过程, 但近来也有很多研究工作认为并合模型并不能解释球状星团系统的许多细节特征, 他们认为是星系本身产生了两次恒星形成过程。

Forbes 等人 (1997)^[31] 仔细讨论了两阶段恒星形成的演化模型, 认为第一次恒星形成与原星系的坍缩同时开始, 但这一阶段的恒星形成效率并不高, 只有一部分气体转化成了恒星, 且大部分以球状星团的形式出现。由于此时的气体金属含量低, 所以形成的全是贫金属的晕族球状星团, 其特点是分布范围广且近球形, 构成一个速度弥散大而几乎无自转的“热”运动学系统, 而且金属度不存在径向梯度。第一阶段的晚期, 由于超新星爆发产生强大的热“星系风”而阻止了恒星的进一步形成, 同时气体被超新星爆发的抛出物所增丰。经过一定的时间后, 某种未知的原因引发了第二次恒星形成过程, 这一阶段的恒星形成效率较高, 且主要以场星的形式出现, 同时形成的相对较少的球状星团则构成了富金属的盘族团, 其特点是分布范围局限在内晕且较为扁平, 构成一个有自转的“冷”运动学系统, 而且平均金属度与背景恒星的平均金属度十分一致。

各类星系中贫金属团和富金属团的平均金属度之差都为 1dex 左右 (Forbes 等人 1997^[31]), 这说明各种星系中的恒星形成有着共同的物理起因。Harris 等人 (1999)^[32] 通过对河外星系 NGC 5128 的 HST 观测, 得出其外晕的金属度分布, 并与该星系中球状星团的金属度比较, 也得出了类似 Forbes 等人 (1997)^[31] 的两阶段星系形成图像, 他们同时分析了“并合激发”和“吸积”的影响, 指出它们是该星系及其中的球状星团形成的次要因素。

这样一种两阶段形成模型必然要求盘族球状星团较晕族球状星团年轻。由于目前球状星团的年龄测定还存在较大的误差, 所以难以对此作出判断, 但金属度越高, 球状星团越年轻的趋势似乎是存在的 (Chaboyer 等人 1996^[33])。

两阶段恒星形成模型最大的困难在于目前尚难以给出一个合理的引发第二次恒星形成的物理机制。但很多研究表明这样一种形成过程确实是存在的 (例如 Smecker-Hane 等人 1996^[34])。另外, 现在也观测到许多孤立的星暴星系 (没有与周围星系的相互作用), 也就是说恒星形成的爆发过程是在没有外界“激发”的条件下发生的, 因而即使在没有发生星系相互作用的情况下出现两次恒星形成也是完全可能的。

5 球状星团的第三类形成图景 — 诞生于星系形成之后

银河系中盘族球状星团的存在表明至少有一部分球状星团应是在星系形成之后才产生的, 否则无法理解它们为什么会具有与厚盘星类似的性质, 且金属度明显高于另一类球状星团。在支持球状星团产生于星系形成之后的理论中, 最为流行的一种模式是星系的碰撞并合激发产生球状星团。近来在很多相互作用星系或星暴星系中发现了许多年轻的星团, 其性质类似于球状星团, 如果能够最后得以确证, 也就证实了至少有一部分球状星团是在星系形成

之后形成的,甚至至今仍在形成。

自从 Toomre A 和 Toomre J (1972)^[6] 令人信服地模拟了两个旋涡星系并合的过程之后,越来越多的证据表明并合过程在椭圆星系的形成过程中起着重要的作用,近来很多星系形成的理论模型中都引入了并合过程 (Cole 等人 1994^[35], Navarro、Frenk 和 White 1995^[36])。

5.1 星系并合激发星团形成 (Merger)

Ashman 和 Zepf(1992)^[37] 以及 Zepf 和 Ashman(1993)^[38] 讨论了如果椭圆星系是由两个旋涡星系碰撞并合而成,其中的球状星团系统应具有的最重要特点就是合成的椭圆星系中除原有的球状星团之外,还形成了一族新的球状星团系统。因此并合模型一定会有至少两类性质不同的球状星团,原星系中的球状星团构成一个年老的贫金属且空间分布较延展的系统,而并合新生成的球状星团则构成一个年轻的、富金属且空间分布向星系中心聚集的系统。观测到巨椭圆星系中球状星团系统的颜色分布有双峰结构,支持这一并合形成模型。

但并合模型也存在许多难以解释的问题,主要有:

(1) 按照并合模型的预言,高比频的椭圆星系应具有大量的富金属团,因为它们的比频之所以高是因为并合过程中激发产生了大量新的球状星团,而这些星团是在已增丰了的气体中生成的。要使得并合星系中的球状星团比频如观测那样高出一般星系 2~3 倍以上,并合星系中的富金属团在数量上应比贫金属团更多。但观测表明,很多高比频的星系(如 M87、M49, NGC 1399 等)仍是贫金属团占多数 (Geisler 等人 1996^[39], Rhode 和 Zepf 2000^[40])。为克服这一困难, Kauffman(1996)^[41] 用计算机模拟指出可能存在着更复杂的多重并合过程,但由于不同星系中贫金属球状星团的平均金属度不太可能完全一样,如果存在多重并合,则很难理解合成的贫金属球状星团的金属度分布会是一个理想的高斯型分布。

(2) 大多数椭圆星系中贫金属团的平均丰度(典型值为 $[Fe/H] = -1.2$),高于旋涡星系或矮星系中贫金属团的平均丰度(典型值为 $[Fe/H] = -1.6$),意味着两者之间可能并无传承关系。

(3) 在椭圆星系 NGC 3311 和 NGC 3923 中均没有找到贫金属团,如果椭圆星系是由旋涡星系并合而来,那么这两个星系中原属于旋涡星系的贫金属团都到哪儿去了呢?

(4) 如果说金属度的双峰分布一定是并合形成,则银河系和 M31 这样的旋涡星系中也有双峰分布则是很难想象的。

总而言之,碰撞并合模型虽然可以解释许多观测事实,但简单的并合模型也遇到了许多困难 (Forbes 等人 1997^[31]),需要引入更复杂的多重碰撞机制或动力学演化机制。

5.2 吸积矮伴星系

“吸积”(Accretion)可以理解为大星系对经过其附近的小星系的“吞并”,还包括因潮汐作用而将邻近星系的一部分物质(包括球状星团)剥离并吸引成为自己一部分的过程。前一种“吸积”过程可以看作是“并合”的一种特殊形式,但在此过程中不发生新球状星团的激发诞生,而只是简单地得到小星系中的球状星团和其它恒星。“吸积”正越来越多地被认为是球状星团形成的一种可能机制。

Cote 等人 (1998)^[42] 用蒙特卡罗方法对吸积过程怎样产生球状星团系统金属度的双峰分布作了模拟,他们引入了与传统看法不同的假设,认为盘族球状星团才是星系所固有的,而贫金属的晕族球状星团则是吸积而来。Forbes 等人 (1997)^[31] 的观测资料表明,巨椭圆星系中富金属星团的平均金属度与星系光度有很好的相关性,而贫金属团则没有相关性。Cote 等人

(1998)^[42] 从观测数据确定了富金属团与星系光度的相关关系, 并从给定的星系光度函数出发随机得到一些可能被俘获的星系, 它们被俘获后会使得母星系产生贫金属团。他们对巨椭圆星系 NGC 4474 的随机模拟表明吸积机制确实有相当大的可能会出现与观测相符的金属度双峰分布, 但要求被吸积的星系 (大多数为矮星系) 总数超过 600 个。星系形成的历史上是否真的发生过如此多的吸积过程还有待进一步的验证, 而且如果球状星团大部分是由吸积而来, 则星系外围应存在大量的球状星团, 但实际观测似乎并不支持这一推论 (Rhode 和 Zepf 2000)^[40]。

Zinnecker 等人 (1988)^[43] 以及 Freeman(1993)^[44] 等人提出了又一种有趣的形成假说, 认为球状星团的前身是带核的矮椭圆星系 (dE,N) 的核, 这些星系在其大部分外围物质被吸积而剥离后, 其中的核即表现为球状星团。这种假设的依据是观测到许多矮星系中“核”的性质与球状星团很类似。但这一假说也存在很多问题, 首先是很多矮星系中的核明显大于大多数球状星团的质量; 其次若所有星团都是这样形成的, 则被吸积的矮星系数量将大得不可思议; 再则许多矮星系本身也带有球状星团, 许多矮椭圆星系的球状星团比频甚至还相当高。

越来越多的观测事实表明银河系中至少有部分球状星团是从伴星系中吸积而来的。例如 Lin 和 Richer(1992)^[45] 即论证球状星团 Rup 106 和 Pal 12 是因银河系的潮汐作用从麦哲伦云中俘获而来。更有说服力的例子来自人马矮星系, 这一矮星系现在仍处于被银河系吸积的过程之中, 强大的潮汐作用正在使它慢慢地解体。Ibata 等人 (1997)^[46] 对银河系内该星系所在位置附近的 4 个球状星团 (M54、Arp2、Ter7、Ter8) 作了细致的运动学研究, 结果表明它们原应属于人马矮星系, 只是因其母星系被吸积解体而成为银河系的一部分。

6 考虑气体外流的自增丰化学演化模型

以上综合介绍了一些重要的球状星团形成与演化模型, 它们分别从球状星团的分布特征、运动学特征、数目多少、质量谱、金属度等不同的侧面揭示了球状星团形成与演化的过程和性质, 但对球状星团化学演化的研究则仍很薄弱, 特别是对球状星团金属度双峰分布的特征大多采取回避的态度。Lin 等人 (2001)^[3] 第一次将星系化学演化中的常用方程引入到球状星团系统中, 用以研究球状星团的化学演化, 特别是用以考察具有今天的金属度分布特征的银河系球状星团系统形成过程应有的性质。

Lin 等人 (2001)^[3] 的模型认为球状星团是在类似于 McLaughlin 和 Pudritz(1996)^[27] 的超巨分子云那样的云团中形成的。考虑到球状星团在形成过程中有可能存在外流, 比如伴随着大量的超新星爆发事件, 其强大的能量将促使原始云团中的气体向外流出, 由于球状星团的质量相对星系而言是较小的, 这一外流因素不可忽视 (与此不同, 在星系形成过程中气体流到星系晕之外的可能影响却通常可以忽略)。在这样一种球状星团自增丰演化模型中, 提出了银河系球状星团金属度分布出现双峰结构的新解释, 指出两类球状星团的差别是由于盘族球状星团形成于银盘处这一特殊环境 (并不要求银盘已经形成, 差别主要取决于银盘所在处的引力势阱与银晕不同) 下, 因为与银盘相互作用而造成气体外流程度和恒星形成效率方面的差异, 从而导致增丰程度的不同。这一模型较好地解释了球状星团金属度的双峰分布。

这一模型将两类球状星团的性质差别归结于其形成过程中所处环境的不同, 而对两类球状星团是否同时都诞生于星系形成之初并不给出约束。

毫无疑问,河外旋涡星系中球状星团的形成过程应该是与银河系十分类似的。M31中的球状星团系统在光度函数、金属度分布、比频等方面与银河系相似就是有力的证明。

巨椭圆星系通常被认为由旋涡星系并合而成。如果旋涡星系中球状星团的形成过程都类似,其金属度分布也都差不多,则容易理解它们并合而成的巨椭圆星系的金属度分布也会有类似的双峰分布,观测事实证实了这一推论。也就是说,椭圆星系中的富金属族球状星团系统至少有相当一部分是其前身旋涡星系所固有的(并不排斥并合过程也可能会激发新的球状星团形成)。另一方面,由于巨椭圆星系的球状星团系统是并合来的,而且可能混杂有新生的球状星团,所以也不难理解为什么椭圆星系中金属度分布相当弥散,而且有时似乎有多峰存在的可能。矮椭圆星系不太可能由旋涡星系并合而成,而其自身又不提供类似银盘那样特殊的结构,所以矮椭圆星系中便只有晕族球状星团的存在,观测事实与此相符。

按照这一模型,可以认为球状星团有着普适的形成机制,球状星团系统金属度的双峰分布是在星系的坍缩形成过程中自然产生的。

7 总 结

球状星团是一种古老的天体集团,它的形成与演化和星系本身的形成与演化息息相关。本文基于林清等人(2001)^[47]对球状星团有关观测特征的概括总结,介绍了现代一些关于球状星团形成和演化的代表性模型。由于观测条件所限,长期以来人们对球状星团的了解仅止于银河系,20世纪80年代后期开始陆续积累起河外星系中球状星团系统的资料,但仍存在观测精度较差和观测样本不足的问题,而且长期的动力学演化使球状星团的观测特征与其形成时的特征也有很大的不同。所以人们对球状星团形成与演化还处于比较初步的探索阶段。不同的形成模型可分别从各个侧面解释一定的观测事实,但也经常出现与其它观测事实的矛盾。

各种不同类型的星系中,球状星团系统既有普适的观测特征(例如光度函数),也存在许多与星系性质有关的特性(例如比频和金属度分布等)。只有更多地积累银河系和河外星系中球状星团的观测资料,配合球状星团化学演化和动力学演化的研究,才能进一步揭示出球状星团形成与演化的固有规律。

致谢 本文写作过程中得到束成钢研究员、陈力研究员的帮助,进行了有益的讨论,特此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Ashman K M, Zepf S E. *Globular Cluster Systems*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998
- 2 Fall S M, Rees M J. In: Grindlay J E, Philip A G D eds. *Globular Cluster Systems*, Dordrecht: Reidel, 1988: 323
- 3 Lin Q, Shu C G, Chang R X et al. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, 18: 1536
- 4 Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. *Ap. J.*, 1962, 136: 748
- 5 Searle L, Zinn R. *Ap. J.*, 1978, 225: 357
- 6 Toomre A, Toomre J. *Ap. J.*, 1972, 178: 623
- 7 Zinn R. In: Smith G H, Brodie J P eds. *The Globular Cluster-Galaxy Connection*, San Francisco: ASP, ASP Conf. Ser., 1993, 48: 38

- 8 Peebles P J E, Dicke R H. *Ap. J.*, 1968, 154: 891
- 9 Rosenblatt E I, Faber S M, Blumenthal G R. *Ap. J.*, 1988, 330: 191
- 10 West M J. *M.N.R.A.S.*, 1993, 265: 755
- 11 Peebles P J E. *Ap. J.*, 1984, 277: 470
- 12 Fall S M, Rees M J. *Ap. J.*, 1985, 293: 18
- 13 Shapiro P R, Kang H. *Ap. J.*, 1987, 318: 32
- 14 Kang H, Shapiro P R *et al.* *Ap. J.*, 1990, 363: 488
- 15 Ashman K M. *M.N.R.A.S.*, 1990, 247: 662
- 16 Lin D N C, Murray S D. *Ap. J.*, 1992, 394: 523
- 17 Murray S D, Lin D N C. *Ap. J.*, 1992, 400: 265
- 18 Cayrel R. *Astron. Astrophys.*, 1986, 168: 81
- 19 Brown J H, Burkert A, Truran J W. *Ap. J.*, 1991, 376: 115
- 20 Brown J H, Burkert A, Truran J W. *Ap. J.*, 1995, 440: 666
- 21 Parmentier G, Jehin E *et al.* *Astron. Astrophys.*, 1999, 352: 138
- 22 Parmentier G, Jehin E *et al.* 2000, astro-ph/0009477
- 23 Larson R B. In: Morrison H, Sarajedini A eds. *Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out*, San Francisco: ASP, ASP Conf. Ser., 1996, 92: 241
- 24 Larson R B. In Smith G H, Brodie J P eds. *The Globular Cluster-Galaxy Connection*, San Francisco: ASP, ASP Conf. Ser., 1993, 48: 675
- 25 McKee C F. *Ap. J.*, 1989, 345: 782
- 26 Harris W E, Pudritz R E. *Ap. J.*, 1994, 429: 177
- 27 McLaughlin D E, Pudritz R E. *Ap. J.*, 1996, 457: 578
- 28 Field G B, Saslaw W C. *Ap. J.*, 1965, 142: 568
- 29 Kwan J. *Ap. J.*, 1979, 229: 567
- 30 Elmegreen B G, Efremov Y N. *Ap. J.*, 1997, 480: 235
- 31 Forbes D A, Brodie J P, Grillmair C J. *A. J.*, 1997, 113: 1652
- 32 Harris G L H, Harris W E, Poole G B. *A. J.*, 1999, 117: 855
- 33 Chaboyer B, Demarque P *et al.* *Science*, 1996, 271: 957
- 34 Smecker-Hane T A, Stetson P B *et al.* In: Leitherer C, Fritze-von Alvensleben U *et al.* eds. *Formation of the Galactic Halo ... Inside and Out*, San Francisco: ASP, ASP Conf. Ser., 1996, 98: 328
- 35 Cole S, Aragin-Salamanca A *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1994, 271: 781
- 36 Navarro J F, Frenk C S, White S D M. *Ap. J.*, 1995, 440: 344
- 37 Ashman K M, Zepf S E. *Ap. J.*, 1992, 384: 50
- 38 Zepf S E, Ashman K M. *M.N.R.A.S.*, 1993, 264: 611
- 39 Geisler D, Lee M G, Kim E. *A. J.*, 1996, 111: 1529
- 40 Rhode K L, Zepf S. 2000, astro-ph/0010065
- 41 Kauffmann G. *M.N.R.A.S.*, 1996, 281: 487
- 42 Cote P, Marzke R O, West M J. *Ap. J.*, 1998, 501: 554
- 43 Zinnecker H, Keable C J *et al.* In: Grindlay J E, Philip A G D eds. *Globular Cluster Systems in Galaxies*, IAU Symp. 126, Dordrecht: Reidel, 1988: 603
- 44 Freeman K C. In: Smith G H, Brodie J P eds. *The Globular Cluster-Galaxy Connection*, San Francisco: ASP, ASP Conf. Ser., 1993, 48: 48
- 45 Lin D N C, Richer H B. *Ap. J.*, 1992, 388: L57
- 46 Ibata R A, Wyse F G A *et al.* *A. J.*, 1997, 113: 634
- 47 林清, 赵君亮, 宋国玄. 《天文学进展》, 2001, 19(4): 477

Formation and Evolution of Globular Clusters (II): Models

Lin Qing Zhao Junliang Song Guoxuan

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

Abstract

In this paper many interesting and important models about the formation and evolution of globular cluster are reviewed and compared with each other. A newly developed model about the self-enrichment for globular clusters proposed by the authors is also briefly discussed.

Key words globular cluser—formation and evolution—Galaxy—evolution of galaxies—methods: model