

文章编号: 1000-8349(2006)02-0129-13

蓝离散星研究现状 (I) : 形成机制

新 宇^{1,2}, 邓李才¹, 梁艳春¹

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012 2. 中国科学院 国家天文台 / 云南天文台, 昆明 650011)

摘要: 大量研究表明, 蓝离散星的形成可能有多种机制, 目前比较流行的形成机制可以概括为以下几类: 密近双星系统的质量传输及双星并合、密集星场的恒星碰撞, 以及包含双星系统的恒星间(双星-单星、双星-双星)相互作用导致的恒星并合。与此同时, 蓝离散星在各类恒星系统中的普遍存在, 也使得研究这类恒星的形成及演化成为追踪恒星系统动力学演化、化学演化及积分光谱性质变化的有效指针。

关键词: 天体物理学; 蓝离散星; 综述; 形成机制; 密近双星; 恒星碰撞

中图分类号: P145.4 **文献标识码:** A

1 引 言

自 Sandage^[1] 1953 年在球状星团 M3 中首次发现蓝离散星以来, 人们已经在疏散星团、球状星团、矮星系等各类恒星系统中(可分辨星族成分)观测到蓝离散星的身影^[2]。在颜色-星等图(CMD)上, 蓝离散星存在的典型区域位于主序拐点(turnoff point)上方, 它比拐点区域的恒星具有更高的光度和有效温度, 似乎迷失在同等质量恒星的正常演化轨迹之外, 因此得名“蓝离散星”。蓝离散星在各类恒星系统中的普遍存在不仅与其自身的形成途径及演化过程有关, 也与宿主系统的动力学演化和化学演化直接相关, 研究蓝离散星的形成及演化特性也因此成为研究恒星演化(包括双星演化)及恒星系统诸多演化特性的重要指针^[3]。近半个多世纪以来, 天文学家做了大量尝试来解释这类特殊天体的形成^[2,4], 包括单星模型、双星间的物质交流、恒星碰撞等。但到目前为止, 没有哪一种模型可独立解释蓝离散星的所有观测特性。越来越多的研究工作表明, 蓝离散星的形成可能有多种机制, 即使是在同一个恒星系统中, 蓝离散星也可能来源于不同形成途径^[2]。

单星演化模型认为蓝离散星可能是近期恒星形成活动的产物^[5], 它可能是经历了某些非正常演化途径的恒星, 也可能是由某种特殊机制导致演化变慢, 主序寿命延长的恒星^[6,7]。

收稿日期: 2005-08-12; **修回日期:** 2006-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10173013、1033360、10403006、10433010); 科技部资助项目(G19990754)

但 50 年的研究发现, 观测和理论结果都不能支持该模型^[8,9], 因为观测上很难发现星团中新恒星形成活动; 理论上也没有找到足够有效的机制触发恒星内部物质的重新混合, 从而延长主序寿命。曾经被推荐的机制(如高速旋转、强磁场、潮汐力作用等)都被一一否定。

观测分析表明, 蓝离散星的质量普遍高于主序拐点区域的正常恒星, 它应该是恒星间相互作用的产物, 或是双星系统、甚至多重星系统中的亮蓝成员^[10~12]。其形成机制可以归纳为目前流行的以下几种: 密近双星间物质交流导致的质量传输或双星并合^[9,13]、密集星场中的恒星碰撞^[14]、双星-双星、双星-单星系统相互作用导致的碰撞并合^[15]。若蓝离散星是双星相互作用的产物, 它就是研究双星系统内部相互作用过程的最佳探测器, 也是研究双星演化对整个恒星系统演化影响的重要指针^[16]; 若蓝离散星起源于恒星碰撞, 高频率的恒星碰撞发生在恒星密集区域^[17], 对这种环境下的蓝离散星进行研究, 可以提供恒星碰撞截面、潮汐捕获截面、密集星场中恒星相互作用产物等多个问题的参考答案^[18,19]。区分系统中并合机制与碰撞机制产生的蓝离散星的比率, 也是研究系统动力学演化的有效方法。

只要恒星间存在相互作用, 蓝离散星所在的恒星系统的许多性质都会受到影响。通常, 蓝离散星的质量大于主序拐点恒星, 它会由于引力沉降作用沉向整个系统的中心区域。观测表明, 大多数恒星系统中蓝离散星的分布都表现出明显朝向系统中心聚集的趋势。这种引力作用导致的中心聚集现象自然为研究整个系统的动力学演化提供了良好的检验工具, 人们研究双星系统的两体迟豫问题、核坍缩率、引力系统的质量分层(mass segregation)现象及小质量恒星的引力蒸发等诸多问题, 都可由此找到切入点。

与此同时, 蓝离散星在各类不同年龄、不同类型系统中的普遍存在, 为各系统贡献了一个不容忽视的亮蓝成分^[20], 使系统颜色变蓝, 积分光谱能量分布(integrated spectral energy distribution, ISED)在紫外及蓝端的强度明显增加^[21], 这种 ISED 的变化也对目前的演化星族合成(evolutionary population synthesis)方法提出了挑战^[22]。

本文主要介绍两种比较流行的蓝离散星形成机制模型: 密近双星系统中物质交流导致的质量传输或双星并合机制(第二节)^[9,13]; 密集星场中恒星碰撞机制^[10,23,24], 包括双星-双星、双星-单星碰撞(第三节)^[15], 并给出总结和展望(第四节)。

需要指出的是, 蓝离散星在恒星系统中的定义只是相对于主序拐点, 是它在 CMD 上的位置, 而并非某种演化行为导致的必然结果。这里讨论的形成机制, 只是这些机制的作用结果与系统演化状态的某种组合, 组合方式多种多样, 且与许多因素(如系统的演化状态、恒星密度、恒星碰撞概率、双星质量比、双星轨道半径等)直接相关。

2 双星演化 —— 质量传输和双星并合

双星间的质量传输及双星并合多发生在密近双星系统中。密近双星系统是指两颗子星距离很近、引力相互作用很强, 能使子星发生畸变和物质交流的双星系统。其中物质交流过程是指演化较快的一颗子星充满洛希瓣, 并将物质经内拉格朗日点流向另一颗子星; 或两颗子星共同充满洛希瓣形成公共包层并最终并合。由原初双星系统主导蓝离散星形成的区域(如银河系的晕^[25,26]、疏散星团^[8])恒星密度一般较低。以下首先简单给出双星演化模型及双星系统分类, 以帮助理解双星演化形成蓝离散星的机制。

2.1 双星演化模型

选取与两子星同步旋转的共转坐标系讨论双星系统的动力学问题。在这个坐标系中, 两子星相对静止。假设子星在圆轨道上运动, 子星周围等势面的法线方向均指向子星中心, 则子星可近似作为质点来处理。对于这种最简化的模型, 洛希首先计算了双星周围有效重力恒定的曲面, 即等势面。等势面有无数个, 每一个等势面都对应于等势函数的某一常数值。等势面从两子星附近向外排列, 会在某点相接, 这个接点称为内拉格朗日点, 相接处的等势面称为临界, 也称洛希面, 它所包围的两个区域称为洛希瓣。目前通用的洛希瓣半径计算公式出自 Eggleton^[27]:

$$r_L(q) = \frac{R_L}{a} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})},$$

式中 R_L 是洛希瓣半径, a 是两子星之间的距离, $q = m_1/m_2$ 是两子星质量比。

按照恒星演化理论, 主序恒星中心发生的核聚变反应是 H 不断地被烧成 He, 中心 He 核积累到一定程度时, 恒星中心就会变得不稳定, He 核收缩, 包层膨胀, 恒星最终离开主序朝向红巨星阶段演化。双星系统中的子星也是一样, 当某一子星演化至充满洛希瓣(临界等势面), 膨胀无法继续进行时, 双星间就开始进行物质交流。

密近双星系统间的物质交流形式多种多样, 具体取决于两颗子星的状态。对于稳定的传输过程, 一颗子星在演化过程中体积膨胀充满洛希瓣, 物质经内拉格朗日点转移到另一颗子星。由于主星的轨道运动和自转, 通过洛希瓣流向伴星的气体相对于伴星具有相当大的角动量, 可能导致气体无法径直向伴星下落, 形成绕伴星旋转的一个气体薄盘——吸积盘(能否形成很不确定), 然后再通过吸积盘相邻气体层之间的粘滞力作用逐渐消耗角动量, 最终沿螺旋形轨迹落向伴星。目前的观测表明, 密近双星系统中存在吸积盘, 蓝离散星周围也存在星周盘^[28]。即便两颗子星都没有充满洛希瓣, 若一颗子星(例如早型星、红巨星、亚巨星等)存在很强的星风物质损失($10^{-5} \sim 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$), 仍可有小部分物质到达伴星。如果主星质量传输速率很大, 伴星来不及马上吸收, 双星系统很容易形成公共包层。

1955 年, Kopal^[29] 以两子星是否充满洛希瓣为依据, 将密近双星分为 3 类: (1) 不相接双星: 两颗子星都没有充满洛希瓣; (2) 半相接双星: 一颗子星完全充满或几乎充满洛希瓣; (3) 相接双星: 两颗子星都完全或几乎充满各自的洛希瓣。

双星间质量传输(除去星风物质损失)的条件是至少有一颗子星充满洛希瓣, 这只能发生在(2)、(3)类密近双星系统内。双星的物质交流可导致轨道运动周期、视向速度曲线、光变曲线、子星的表面丰度等发生变化, 因此很好地理解双星间物质交流过程, 对人们通过观测资料分析蓝离散星形成机制至关重要。较详细的双星演化模型可以参阅 Pols 和 Marinus 1994 年的工作^[16]。

2.2 质量传输

密近双星间的质量传输是指双星中的一颗子星演化膨胀充满洛希瓣, 将物质通过内拉格朗日点转移到另一颗子星上。吸积物质的子星若还在主序, 由于吸积物质质量增加, 将在 CMD 上沿主序向上演化。物质交流过程会将富 H 物质带到子星核心区域, 导致子星在主序上停留的时间长于同等质量的普通主序恒星。McCrea^[13] 于 1964 年首先发表了主星是红巨星的密近双星间质量传输结果, 并计算出质量传输形成蓝离散星的质量上限: 约高于主序拐

点恒星 2.5 mag。目前大部分观测到的蓝离散星都符合这一特征，但也有例外，需要其他机制进行补充。

1984 年，Collier 和 Jenkins^[8] 用 Monte-Carlo 方法模拟了老年星族中双星系统的演化及可能形成蓝离散星的模型。模型初始假设包含 50% 的双星系统^[30,31]，双星质量比采用于 Trimble^[32] 1974 年发表的工作，且只考虑主星在红巨星阶段充满洛希瓣的质量传输。模拟结果强烈支持银盘上老年星团中的蓝离散星形成于双星质量传输的观点。模拟结果中蓝离散星具有的长轨道周期 (100~1000 d)、低视向速度弥散 (≤ 10 km/s)，也都与观测基本吻合^[33,34]。若假设银盘有持续的恒星形成过程，且银盘上 Algol (大陵型) 食双星 (eclipsing binary) 比例及光度函数采用太阳附近的经验值，则年龄老于 1000 Myr 的银盘星团中有 10%~15% 的蓝离散星仍处于半相接的质量传输状态，这一结果也在相当程度上与观测符合^[35]。Collier 和 Jenkins 还计算了蓝离散星对星团 u、b、v 波段积分光度的影响，结果与 M67、NGC 7789 的观测结果也很接近，而且蓝离散星可贡献椭圆星系近紫外区域 (2200~4000 Å) 相当部分的流量，可作为椭圆星系紫外超 (UV excesses) 来源之一。

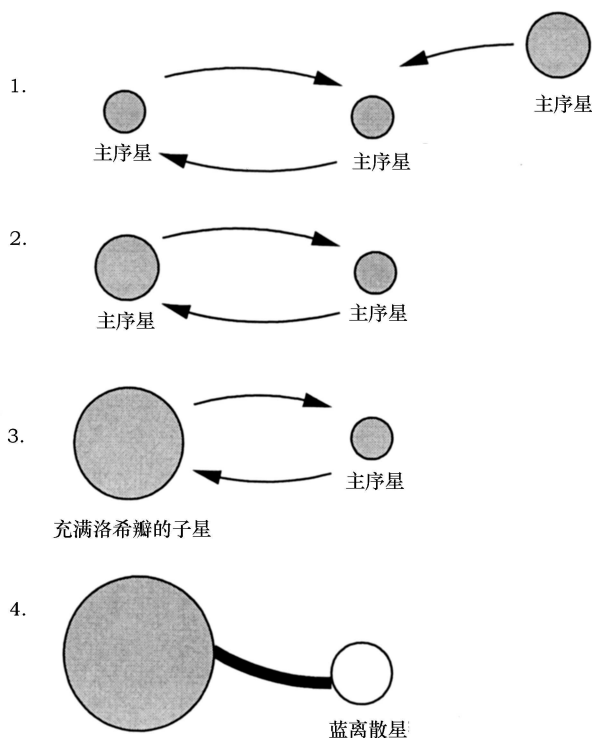


图 1 球状星团中长周期双星系统质量传输形成蓝离散星的演化途径^[36]

1994 年，Pols 和 Marinus^[16] 同样用 Monte-Carlo 方法，将研究目标对准了年轻疏散星团中的密近双星系统演化。这一工作覆盖了所有主星质量大于 $2 M_{\odot}$ 的密近双星系统，计算截止到两颗子星均演化到致密星状态。计算中仍将蓝离散星处理为双星间物质交流的产物，但考虑了 5 种不同类型的密近双星系统。前 4 种的质量传输发生在主星 (主序星) 与不同类型伴

星: He 星、白矮星、中子星以及裸核的 (stripped) 主序星之间, 第 5 种考虑的是两颗主序星之间的并合 (并合机制将在 2.3 节中介绍)。物质交流时标由 3 个不同参数控制: ζ_{ad} 、 ζ_{th} 、 ζ_{L} , 它们分别表示绝热情况、热力学平衡情况及物质交流情况下主星半径随质量的变化率, $\zeta = d \ln R / d \ln M$ 。Pols 和 Marinus 将计算结果与观测^[6]比较得到: 对年龄 < 300 Myr 星团中的蓝离散星, 其数目和基本特性 (高速旋转、低视向速度弥散) 都与观测吻合得很好; 但对中等年龄 (300~1500 Myr) 星团中的蓝离散星, 单一的质量传输机制无法解释其观测特性。

2004 年, Davies 等人^[36]在解释银河系球状星团中的蓝离散星时, 发展了双星系统质量传输形成蓝离散星的理论。他们认为, 球状星团的高碰撞概率环境会破坏原初的小质量双星系统, 其中的一颗子星被一颗质量较大的主序星取代, 这颗大质量主序星很快演化离开主序, 充满洛希瓣, 将物质转移到小质量伴星上, 使伴星长成一颗蓝离散星。如图 1 所示, 其中第 1、2 两图描述一颗大质量主序星侵入两颗小质量主序星构成的双星系统, 替换掉其中的一颗。替换发生后, 双星系统中主星的典型质量为 $1.5 \sim 3 M_{\odot}$ ^[37]; 第 3 图描述大质量子星演化到红巨星阶段, 充满洛希瓣, 开始发生物质交流; 第 4 图描述小质量子星获得物质, 并以相当于大质量恒星主序寿命的时标演化为蓝离散星。正是由于这种机制的存在, 极端密集环境中的蓝离散星数目甚至要少于低密度环境, 因为蓝离散星可在包含大质量主序星的双星系统中更早形成, 且已经演化离开主序。

2.3 双星并合

关于双星并合机制, 已有大量的理论工作表明 W UMa (大熊座 W 型双星) 系统会最终并合为一颗单星^[38~41]。该系统为相接双星, 两颗子星都充满各自的洛希瓣, 形成公共包层并最终并合。但是目前还没有恒星演化模型可以给出两颗子星从开始相接到最终并合的全部物理过程, 这种并合相当复杂。在完全相接的 W UMa 系统中, 物质由伴星流向主星, 直到伴星的物质被主星完全吸收或两者发生深相接 (deep contact), 即两子星以一个相当短的时标发生共振^[42]。这个过程发生的机理现在并不清楚, 它有可能只是浅相接 (shallow contact) 的一个加速相。浅相接过程可使小质量子星流出的物质均匀混合在最终并合产物的外包层上。另一种方式, 两颗子星的核心区域可以经历一种类似大质量恒星包层中双核演化的机制^[43], 最终相互绕转到一起。这种情况下, 小质量子星流出的物质可被保留在并合产物的内部。但是无论哪种情形, 大质量子星的物质最终都会保留在并合产物的中心区域, 无法将丰富的 He 元素传送到并合产物的表面^[44]。因此, 相接双星并合产物的表面 He 丰度要明显低于由 Benz 和 Hills^[45]于 1987 年给出的等质量 (小质量) 主序星碰撞的结果。

Benz 和 Hills^[45]的结果显示, 两颗等质量主序星的碰撞可导致碰撞产物的物质完全均匀混合, 碰撞产物可返回零龄主序重新开始演化。但后来的数值模拟工作^[14,19]基本否定了单星碰撞导致物质均匀混合的可能性, 而倾向于认为碰撞产物的 He 丰度轮廓更接近碰撞前主序星的 He 轮廓。也就是说, 这两种不同机制 (相接双星和恒星碰撞) 导致的恒星并合, 会使并合产物表面的化学丰度轮廓完全不同, 这就可以通过元素丰度分析来研究蓝离散星的可能形成机制。此外, 不同机制导致的并合也会影响并合产物在星团 CMD 上的位置, 例如表面 He 元素增丰会导致不透明度下降, 使恒星在 CMD 上的位置变蓝。

老年疏散星团中已知的相接双星几乎都是 W UMa 系统, 其周期 ≤ 1 d^[46~48]。Eggen 和 Iben^[5,49]的工作支持两颗主序星组成的 W UMa 系统可通过损失角动量最终并合形成蓝离散

星的机制,但这种机制只能存在于年龄超过 1.5 Gyr 的老年疏散星团,以求并合时标与星团年龄统一。

Mateo 等人^[9] 1990 年对贫金属球状星团 NGC 5466 中 9 颗短周期蓝离散星变星的研究工作有效检验了双星并合机制。其中 3 颗是周期很短 (0.298~0.511 d) 的食双星,另外 6 颗是脉动的 SX Phe (凤凰座 SX 型) 变星。3 颗食双星中,2 颗是 W UMa 相接双星,另外 1 颗是周期很短的 Algol 型半相接或不相接双星。通过调整系统中两种不同的时标 τ_{merge} (描述相接双星并合为单星) 和 τ_{BS} (表征蓝离散星的主序寿命), Mateo 等人拟合了 NGC 5466 中观测到的蓝离散星数目。比值 $\tau_{\text{merge}}/\tau_{\text{BS}}$ 近似等于正在或将要形成蓝离散星相接双星数目与已经形成蓝离散星相接双星数目之比 ($N_{\text{merge}}/N_{\text{BS}}$)。采用经验值 $\tau_{\text{merge}} \approx 5 \times 10^8 \text{ yr}$ ^[49,50] 和典型值 $\tau_{\text{BS}} \leq 7 \times 10^9 \text{ yr}$, Mateo 等人最终给出 NGC 5466 中 $\tau_{\text{merge}}/\tau_{\text{BS}} \geq 0.07$ 。与观测给出的真实值 $N_{\text{merge}}/N_{\text{BS}} \approx 0.084$ 比较可知,应该有 3%~15% 星族 II 的蓝离散星属于相接双星。质量大于 $2 M_{\odot}$ 的密近双星系统很难找到有效的机制来损失角动量以发生并合^[51],而且理论上很难给出初始周期小于 2 d 的双星系统,因此上述并合机制似乎只适用于老年或中等年龄的恒星星团。这与 Eggen 和 Iben^[49] 1989 年的结论一致。

其次, Mateo 等人^[9] 认为,刚刚并合形成的蓝离散星应是高速旋转体,最大自转速度 $v_{\text{rot,max}}$ 可约达 200 km/s,并有可能因旋转损失大量物质^[38]。但观测和理论研究表明,高速自转恒星的外包层会很快冷却下来^[52],对中 A 到晚 G 型恒星,其表面转速可在 $5 \times 10^7 \text{ yr}$ 里从 150~200 km/s 降至 $\leq 30 \text{ km/s}$;但对晚型的矮星及质量大于 $2 M_{\odot}$ 的恒星,其速度下降很慢^[51,53]。这一速度的冷却时标表明,像 NGC 5466 这样的系统大概只有 1% 的蓝离散星是高速旋转体,这一结论与观测基本吻合。da Costa 等人^[54] 1986 年观测的 $\omega \text{ Cen}$ 6 颗蓝离散星,就没有发现高速旋转体;Chaffee 和 Ables^[55] 1983 年观测的 M3 中的 5 颗蓝离散星中,也没有发现高速旋转体。但有观测表明, M67 中的许多蓝离散星都具有较高的自转速度^[56],尽管其中没有发现相接双星。

最后, Mateo 等人^[9] 还认为,高速自转的蓝离散星很可能具有某些色球活动特征,而且可能观测到紫外波段的发射线^[57], W UMa 双星具有同样的性质。在年轻的疏散星团中存在极热的蓝离散星,可以在紫外波段被观测到,双星并合机制无法解释这样的蓝离散星^[58]。老年疏散星团 NGC 7789 中也有 3 颗蓝离散星具有紫外发射线。

3 恒星碰撞

考虑碰撞机制形成蓝离散星的基础应是密集星场环境,例如后核坍缩 (post-core-collapse) 的球状星团,其恒星密度达 10^5 颗/pc^3 ^[59],恒星碰撞概率自然很高。另一个要考虑的是,碰撞对象的不同。Hills 和 Day^[17]、Benz 和 Hills^[45,60]、Lombardi 等人^[19,61]、Sills 等人^[14,62] 都将工作瞄准了两颗主序恒星之间的碰撞。1991 年,Leonard 和 Fahlman^[15] 在解释球状星团 NGC 5053 中蓝离散星的形成机制时,引入了双星-双星、双星-单星的碰撞机制。

3.1 单星 - 单星碰撞

单星 - 单星碰撞模型认为, 两颗小质量恒星相互靠近发生碰撞, 导致两颗恒星相互绕转并最终发生并合, 这一过程伴有物质喷流, 并合产物为一颗大质量的再生星, 它温度很高, 高速旋转, 在随后的膨胀过程中发展到红巨星阶段, 由磁滞效应降低其旋转速度, 最终收缩、升温, 出现在蓝离散星的位置。单星 - 单星碰撞模型由 Hills 和 Day^[17] 在 1976 年首次提出, 并在其后几十年的数值模拟工作中取得很大发展, 下面简单介绍几项有代表性的工作。

Benz 和 Hills^[45] 1987 年利用 1024 个粒子的 SPH (smooth particle hydrodynamics) 方法^[63] 计算了恒星结构, 并模拟了两颗等质量主序星之间的碰撞。他们不考虑恒星自转, 假设恒星在碰撞前具有相同的质量和密度分布, 用 $n = 1.5$ 的多方球模型模拟恒星内部结构, 因为 $n = 1.5$ 更适合描述小质量主序星, 而且球状星团和星系核的恒星成分都由小质量主序星主导。结果显示, 对心 (head-on) 碰撞产生的强烈激波可导致垂直于碰撞轴方向的高速物质喷流, 而且当碰撞速度从 0 增加到恒星表面逃逸速度的 2.3 倍时, 喷流造成的质量损失可从 0.1% 增加到 100%。随着碰撞参数的增加, 激波强度和喷流导致的质量损失都会下降。但是对低速碰撞, 当碰撞参数接近掠撞 (grazing collision) 时, 质量损失明显增强。碰撞参数 p 由下式定义:

$$\frac{p^2}{R_{\min}^2} = 1 + \frac{2G(M_1 + M_2)}{V^2 R_{\min}},$$

式中 R_{\min} 是两颗恒星作为质点碰撞前的最小距离, V 是恒星碰撞速度。两颗恒星第一次靠近时很可能因引力作用束缚为双星系统, 并在随后的某个近星点发生并合。掠撞可导致碰撞产物完全混合, 核时标被重置。当并合产物到达主序时, 它的化学成分是均匀的。核燃烧产生的 He 经混合到达恒星表面, 使恒星不透明度减小, 并合产物更亮, 更蓝。但以后的单星 - 单星碰撞模型几乎都否定碰撞产物完全均匀混合的结论。

1992 年 Benz 和 Hills^[60] 又对不等质量主序星的碰撞进行了模拟, 这次粒子数增加到 7000 个。结果显示, 碰撞能量的耗散速度 (V_d) 可由对心碰撞时的 1000 km/s 下降到掠撞时的 150 km/s。若小质量恒星被一个质点取代, V_d 可在对心碰撞时降至 600 km/s。两颗主序星碰撞时, 由于激波耗散作用的增强, V_d 会随碰撞速度 (V) 上升而上升。若碰撞发生在一颗主序星和一个质点之间, V_d 会随 V 上升而下降。当 $V > V_d$ 时, 小质量星可以穿过大质量星成功逃逸, 不会发生引力束缚。若两颗主序星由于碰撞发生并合, 小质量主序星会停留在大质量主序星的核心, 大质量星的物质被均匀混合, 产物仍为一颗富 He 的主序恒星, 核时标发生变化。但是, 这种碰撞导致的质量损失远小于等质量 (等密度) 主序星之间的碰撞^[45], 掠撞也不会带来大量的质量损失及碰撞产物周围吸积盘的出现。球状星团中, 两颗主序星只在相当靠近 (即两者质心之间的距离小于它们半径之和的 2 倍) 的情形下, 才会因潮汐力俘获形成双星系统; 当 $V > 150$ km/s 时, 潮汐力不再有效。因此, 球状星团中的恒星碰撞更容易导致恒星并合, 而且这种并合不会加速球状星团核心的动力学坍缩。

2002 年 Lombardi 等人^[19] 进行了 SPH 三维数值模拟。对小质量主序星, 他们采用 $n = 1.5$, $\Gamma = 5/3$ 的多方关系^[64]; 对主序拐点附近的恒星, 采用 $n = 3$, $\Gamma = 5/3$ ^[65]。他们引入熵变量 $A = P/\rho^\Gamma$, 并将恒星初始结构由内至外描述为熵变量 A 相同的若干层, 并在碰撞过程中追踪每个粒子的熵变, 将熵变量 A 相同的流体元仍置于同一层, 以此追踪并合产

物内部物质混合过程。由于球状星团恒星速度弥散的典型值约为 10 km/s ，远小于主序恒星表面的逃逸速度 (约 550 km/s)，且球状星团内的绝大多数主序星都不是高速旋转体，因此，Lombardi 等人将碰撞轨道设计为抛物线型轨迹，这也符合碰撞前身星的非旋转假设。另外，他们考虑质量损失在两颗前身星之间的分布需保证两颗恒星最外层的流体层仍具有相同的熵变量 A ，从而可以进行稳定的并合。最终，Lombardi 等人给出的结果是，抛物线轨道碰撞导致的质量损失不会超过系统总质量的 8% (双曲线轨道碰撞的质量损失可参考 Lai 等人 [64] 1994 年的工作)。尽管这一质量损失很小，但对追踪前身星化学元素在并合产物中的分布仍非常重要。Lombardi 等人 [66] 曾在 1995 年指出，单星碰撞产生的蓝离散星，其外包层没有明显的 He 元素增丰，核区也没有大量 H 燃料注入。他们认为 [19]，碰撞过程中的激波加热不仅可以影响并合产物的结构，还可以影响到并合产物演化过程中的对流区深度。以 $M_{\text{turnoff}} \approx 0.8 M_{\odot}$ 的球状星团为例，若两颗碰撞前身星的质量比大于 5，则基本不能形成蓝离散星，因为碰撞无法产生高于主序拐点质量的恒星。

同样 Sills 等人 [14] 于 2002 年进行了 10^6 个粒子的 SPH 数值模拟，以计算球状星团中两颗等质量主序星之间的碰撞。设恒星质量为 $0.6 M_{\odot}$ ，金属丰度 $Z = 0.001$ ，年龄为 15 Gyr，视向速度为 10 km/s ，Sills 等人计算得出，对心碰撞不会在碰撞产物表面产生超过 $0.004 M_{\odot}$ 的对流区。太阳的表面对流区为 $0.02 M_{\odot}$ [67]，小于 $0.01 M_{\odot}$ 的对流区无法有效改变任何化学元素的表面丰度。而且磁星风损失角动量机制 [68] 主要对具有极深对流区的恒星有效，因此这个极小的对流包层也预示着碰撞产物没有有效的磁星风机制来损失角动量。另外，计算显示，任何形式的非对心 (off-center) 碰撞都无法在碰撞产物周围形成星周盘。即便是低碰撞参数，碰撞产物仍在高转速情况下到达主序，没有有效的吸积盘锁定 (disk-locking) 机制来损失角动量。若高速旋转的恒星周围有一个 $0.01 M_{\odot}$ 的星周盘，而且恒星通过磁场和星周盘连接，那么角动量就可以被转移到盘上，并固定下来 [69]。

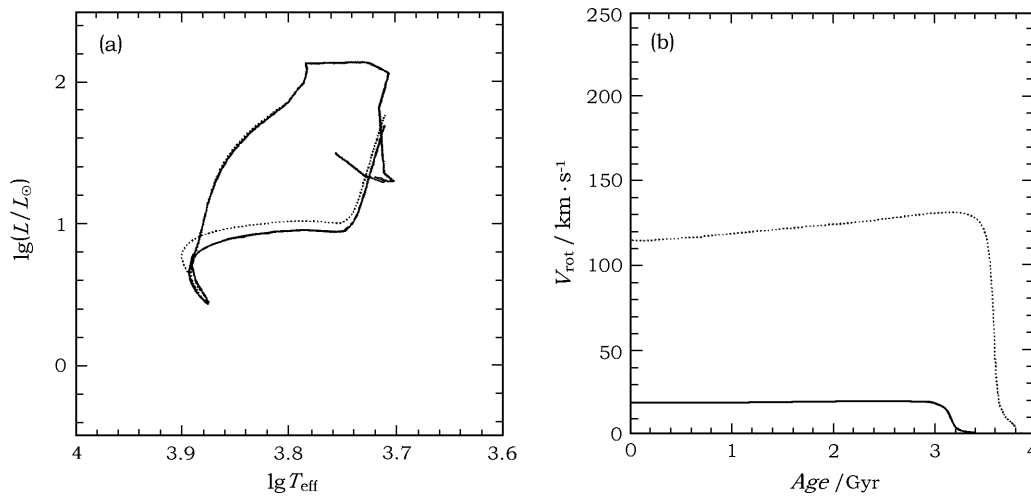


图 2 考察吸积盘锁定效应是否为有效的角动量损失机制 [59]

(a) 碰撞产物在赫罗图上的演化轨迹；(b) 碰撞产物表面转速的变化。

实线考虑了吸积盘锁定效应，虚线没有考虑吸积盘锁定效应。

2001 年, Sills 等人^[70]曾指出, 若没有有效丢失角动量的机制, 单星-单星碰撞模型的产物会在接近主序的过程中越转越快, 变得极不稳定并最终碎裂, 根本无法进行从主序开始的演化。但是, 早在 1986 年 Durisen 等人^[71]就指出, 一个高速旋转的多方球会将其外层的物质甩到一个盘上, 留下中心一个稳定的但非轴对称的天体。这一过程的条件是旋转动能和引力能的比率 $\beta \geq 0.3$ (Sills 等人^[14] 2002 年的结果是 $\beta \approx 0.045$), 如此高的 β 值很可能触发某些流体力学的旋转不稳定性。直到 2005 年, Sills 等人^[59]才对这一问题作出解释。这次他们的研究对象是球状星团中不等质量主序星之间的非对心碰撞 (因系统中发生真正对心碰撞的几率很小)。吸积盘或物质外向流 (outflow) 锁定效应能否有效地分流碰撞产物的角动量呢? 他们发现两种机制都可使碰撞产物丢失足够的角动量, 保证其平稳到达主序并开始演化。图 2 给出了 (a) 碰撞产物演化轨迹和 (b) 表面转速的变化。

3.2 双星-单星、双星-双星碰撞

1983 年, Hoffer^[72]首先提出双星-单星、双星-双星之间的强动力学相互作用很可能导致恒星间的近距离遭遇, 这种遭遇可能导致恒星碰撞。他认为这可能是星团中形成蓝离散星的一条有效途径, 尤其是低密度的球状星团, 因为其中存在大量的包含主序恒星的双星系统。

1988 年, Leonard 和 Duncan^[73]利用 N 体数值模拟计算了年轻星团里中等质量、等能量双星系统的演化。结果显示, 增加系统中的原初双星比例, 就可以增加从星团中高速逃逸的恒星的数目。这种高速逃逸的恒星主要由双星-双星系统相互作用产生, 而且逃逸恒星的速度可达到双星轨道速度的 2 倍。若双星-双星系统相互作用的产物没有发生逃逸, 就很可能形成蓝离散星。

次年, Leonard^[4]发表了球状星团中碰撞机制形成蓝离散星的研究结果, 正式将 Hoffer 1983 年的理论^[72]作为蓝离散星的可能形成途径之一, 并证明双星-双星碰撞机制在低密度的球状星团中更加有效。

由 Spitzer 和 Mathieu^[74] 1980 年的工作可知, 只要星团主序星中原初双星的比例占到 10%, 星团核心区域的双星系统比例就会很快上升到 50%~100%, 且双星-双星系统的碰撞截面是单星-单星碰撞截面的 100 倍^[75], 双星-双星系统间的强相互作用可导致恒星碰撞。所有这些都预言了双星-双星系统间相互作用可产生的结果, 即恒星间的近距离遭遇可导致恒星并合, 并产生蓝离散星。若并合产物获得足够的逃逸速度逃脱星团引力场, 就成为场中的蓝离散星。这应该是场中蓝离散星的来源之一。若星团主序星中原初双星比例为 10%, 碰撞频率就为 1 次/ 10^8 yr, 双星-双星碰撞产生的恒星的逃逸速度达到 100 km/s 量级, 则 10^8 yr 里就有一颗蓝离散星可以远离星团 10 kpc。

1991 年, Leonard 和 Fahlman^[15]研究了低密度球状星团 NGC 5053 中双星-单星、双星-双星系统间相互作用产生蓝离散星的可能机制。根据 NGC 5053 的引力势, 他们计算得出, 周期超过 100 d 的双星系统之间相互作用的并合产物最有可能留在 NGC 5053 中。双星-单星碰撞产生并合产物的效率要明显低于双星-双星系统。

若 NGC 5053 核区双星比例达到 100%, 那么星团中观测到的蓝离散星有 28%~50% 是由双星-双星系统碰撞贡献的; 若核区双星系统比例下降到 50%, 则双星-双星碰撞仍可贡献 9%~18% 的蓝离散星。这一统计包含潮汐俘获双星, 因为双星-双星、双星-单星之间的相互作用可导致球状星团中密近双星系统的形成, 这样的密近双星系统可演化成 W UMa 相接

双星，并最终并合形成蓝离散星。

1992 年，Leonard 和 Linnell^[76] 研究了疏散星团 M67 和 NGC 188 中蓝离散星可能的碰撞形成机制。他们的主要结论为，由主序星组成的双星 - 双星、双星 - 单星系统之间的碰撞无法解释星团中观测到的所有蓝离散星，只能解释约 10% 的蓝离散星。

理论上，蓝离散星的质量上限可以是主序拐点质量的 4 倍，但这需要双星 - 双星碰撞过程中 4 颗星完全并合，而且所有子星都具有主序拐点恒星质量，这是一种极小概率事件。双星 - 双星系统相互作用，最可能的过程是 4 颗恒星中的 1 颗被其余 3 颗踢出系统，带走它的结合能，使剩余 3 颗恒星中的 2 颗因碰撞作用发生并合，另 1 颗松散地束缚在并合产物周围，形成一个长周期双星。经由这种途径形成的蓝离散星，多数仍处于双星系统中，并具有长轨道周期，双星质量比的峰值 $q \approx 0.45$ ，且多数 $q > 0.45$ ，至少在初生时是高速旋转体^[15]。

星团蓝离散星之间不同的中心聚度也可用双星 - 双星碰撞机制进行解释。双星系统间动力学相互作用产生的并合星会因为一颗恒星脱离双星 - 双星系统而获得一个反弹速度^[15]。因此，短周期双星系统之间的碰撞可能因为巨大的反弹速度导致蓝离散星在系统中分布的弥散，但长周期双星系统之间碰撞产生的蓝离散星一般具有很高的中心聚度，因为这种系统碰撞产生的反弹速度通常很小。表 1、2 分别给出了蓝离散星观测特性与不同形成机制之间、相接双星形成机制与不同观测特性之间的关系，从中可以看出，双星 - 双星、双星 - 单星系统之间的相互作用的确是星团演化过程的重要组成部分，蓝离散星、W UMa 相接双星都可以通过这种机制形成。

表 1 蓝离散星形成机制与观测事实之间的关系^[76]

观测现象	近期星暴	双星质量传输	双星并和	内部混合	双星 - 双星碰撞
正常有效温度及表面重力	是	是	是	是	是
无明显磁场	是	是	是	可能	是
热的主序离散星	是	是	否	是	是
老年星团中无气体存在	否	是	是	是	是
Li 元素贫乏	否	是	是	可能	是
超过 2 倍拐点质量的离散星	是	否	否	是	是
高长周期双星比例	可能	可能	可能	可能	是
老年星团中缺少亮巨星	可能	可能	否	可能	是
不同的中心聚度	是	否	否	否	是
低短周期双星比例	否	否	是	否	是
转速低于正常恒星	否	否	否	可能	可能
反常化学丰度	否	否	否	否	可能
可解释现象的数目 ¹⁾	6.0	6.0	5.5	6.5	11.0

注：1) “是” 计为 1，“否” 计为 0；一个“可能” 计为 0.5，两个“可能” 计为 1。

表 2 相接双星的形成机制与观测事实之间的关系^[76]

观测现象	原初系统	角动量损失	近期星暴	双星 - 双星碰撞
老年星团中无气体存在	是	是	否	是
老年星团中零年龄密近双星	否	是	是	是
不同年龄老年星团中零年龄密近双星	否	是	否	是
老年星团中热密近双星	否	否	是	是
缺乏 0.5~1.5 d 的双星	是	否	否	可能
老年星团中缺少亮巨星	否	否	可能	是
可解释现象的数目	2.0	3.0	2.5	5.5

4 总结和展望

本文的描述重点为蓝离散星形成机制。目前关于蓝离散星形成机制的热点讨论主要集中在双星演化及恒星间相互作用过程: 密近双星系统间的质量传输或双星并合、密集星场的恒星碰撞, 包含双星系统的恒星间 (双星 - 双星、双星 - 单星) 相互作用导致的恒星并合等。无论哪种机制, 蓝离散星的形成过程往往伴随着恒星结构的调整、气体的释放、化学轮廓和物理参量的改变, 包括恒星的光度 (质量)、有效温度、自传速度、对流区深度、化学元素混合程度等, 都有可能因此发生程度不等的变化, 而且这种变化也会影响到蓝离散星所嵌入的恒星系统的诸多演化特性, 例如: 动力学演化、化学演化、积分光谱性质等。

正因如此, 讨论各类恒星系统中蓝离散星的形成机制及相应的演化特性, 除了恒星演化本身的问题外, 更有意义的是, 它所得到的结论在各类恒星系统 (包括星系) 中的应用不仅涉及恒星成分或星族特征方面的问题, 而且还可能涉及星系的气体循环, 从而与系统的恒星形成过程有关, 例如: 来自恒星间相互作用的蓝离散星形成活动能否贡献矮星系中观测到的气体能贡献多大比例? 这需要在不同动力学环境下对蓝离散星形成机制及相应演化特性的研究, 需要细致的动力学数值模拟的分析。

参考文献:

- [1] Sandage A R. *AJ*, 1953, 58: 61
- [2] Stryker L L. *PASP*, 1993, 105: 1081
- [3] 新宇. 博士论文, 北京: 中国科学院国家天文台, 2005
- [4] Leonard P J T. *AJ*, 1989, 98: 217
- [5] Eggen O J, Iben I Jr. *AJ*, 1988, 96: 635
- [6] Abt H A. *ApJ*, 1985, 294: 103
- [7] Beech M, Mitalas R. *A&A*, 1989, 213: 127
- [8] Collier A C, Jenkins C R. *MNRAS*, 1984, 211: 391
- [9] Mateo M, Harris H C, Nemeč J *et al.* *AJ*, 1990, 100: 469
- [10] Piotto G, Zoccali M, King I R *et al.* *AJ*, 1999, 117: 264
- [11] van den Berg M, Orosz J, Verbunt F *et al.* *A&A*, 2001, 375: 375

-
- [12] Ferraro F R, Paltrinieri B, Fusi Pecci F *et al.* A&A, 1997, 324: 915
- [13] McCrea W H. MNRAS, 1964, 128: 147
- [14] Sills A, Adams T, Davies M B *et al.* MNRAS, 2002, 332: 49
- [15] Leonard P J T, Fahlman G G. AJ, 1991, 102: 994
- [16] Pols O R, Marinus M. A&A, 1994, 288: 475
- [17] Hills J G, Day C A. ApJ, 1976, 17: 87
- [18] Bailyn C D. ARA&A, 1995, 33: 133
- [19] Lombardi J C Jr, Warren J S, Rasio F A *et al.* ApJ, 2002, 568: 939
- [20] Manteiga M, Martinez R C, Pickles A J. Ap&SS, 1989, 156: 169
- [21] Deng L, Chen R, Liu X S *et al.* ApJ, 1999, 524: 824
- [22] Xin Y, Deng L. ApJ, 2005, 619: 824
- [23] Bacon D, Sigurdsson S, Davies M B. MNRAS, 1996, 281: 830
- [24] Ferraro F R, Sills A, Rood R T *et al.* ApJ, 2003, 588: 464
- [25] Carney B W, Latham D W, Laird J B *et al.* AJ, 2001, 122: 3419
- [26] Carney B W, Latham D W, Laird J B. AJ, 2005, 129: 466
- [27] Eggleton P P. ApJ, 1983, 268: 368
- [28] de Marco O, Lanz T, Ouellette J A *et al.* ApJ, 2004, 606: 151
- [29] Kopal Z. AnAp, 1955, 18: 379
- [30] Jaschek C, Gómez A E. PASP, 1970, 82: 847
- [31] Abt H A. AJ, 1979, 84: 1591
- [32] Trimble V. AJ, 1974, 79: 967
- [33] Hintzen P, Scott J, Whelan J. ApJ, 1974, 194: 657
- [34] Stryker L L, Hrivnak B J. ApJ, 1984, 278: 215
- [35] Peterson R C, Carney B W, Latham D. ApJ, 1984, 279: 237
- [36] Davies M B, Piotto G, de Angeli F. MNRAS, 2004, 349: 129
- [37] Davies M B, Hansen B M S. MNRAS, 1998, 301: 15
- [38] Webbink R F. ApJ, 1976, 209: 829
- [39] Webbink R F. ApJS, 1976, 32: 583
- [40] Tutukov A, Iungelson L. In: Philip A G D, Hayes D S, Liebert J W eds. Proceedings (A89-17526 05-90), Schenectady, NY: Davis L Press, Inc., 1987: 435
- [41] Guinan E F, Bradstreet D H. In: Dupree A K, Lago M T V T. eds. NATO ASI Ser., Ser. C, 1988, 241: 345
- [42] Webbink R F. ApJ, 1979, 227: 178
- [43] Bodenheimer P, Taam R E. ApJ, 1984, 280: 771
- [44] Bailyn C D. ApJ, 1992, 392: 519
- [45] Benz W, Hills J G. ApJ, 1987, 323: 614
- [46] Zhang X B, Deng L, Xin Y *et al.* ChJAA, 2003, 3: 151
- [47] Zhang X B, Deng L, Zhou X *et al.* MNRAS, 2004, 355: 1369
- [48] Zhang X B, Zhang R X, Deng L. AJ, 2005, 129: 979
- [49] Eggen O J, Iben I Jr. AJ, 1989, 97: 431
- [50] Mochmacki S W. BAAS, 1981, 13: 513
- [51] Iben I Jr, Tutukov A V. ApJ, 1984, 284: 719
- [52] Skumanich A. ApJ, 1972, 171: 565
- [53] Stauffer J R, Hartmann L W, Latham D W. ApJ, 1987, 320: 51
- [54] da Costa G S, Norris J, Villumsen J V. ApJ, 1986, 308: 743
- [55] Chaffee F H Jr, Ables H D. PASP, 1983, 95: 835
- [56] Peterson R C, Carney B W, Latham D. ApJ, 1984, 279: 237
- [57] Rucinski S M. MNRAS, 1985, 215: 615

- [58] Gerbaldi M, Morales D C, Sabau G L *et al.* In: Philip A G D, Hayes D S, Liebert J W eds. Proceedings (A89-17526 05-90), Schenectady, NY: Davis L Press, Inc., 1987: 571
- [59] Sills A, Adams T, Davies M B. MNRAS, 2005, 358: 716
- [60] Benz W, Hills J G. ApJ, 1992, 389: 546
- [61] Lombardi J C Jr, Rasio F A, Shapiro S L. ApJ, 1996, 468: 797
- [62] Sills A, Lombardi J C Jr, Bailyn C D *et al.* ApJ, 1997, 487: 290
- [63] Lucy L B. AJ, 1977, 82: 1013
- [64] Lai D, Rasio F A, Shapiro S L. ApJ, 1994, 423: 344
- [65] Clayton D D. Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis, Chicago: Univ. of Chicago Press, 1983
- [66] Lombardi J C Jr, Rasio F A, Shapiro S L. ApJ, 1995, 445: 117
- [67] Guenther D B, Demarque P, Pinsonneault M H *et al.* ApJ, 1992, 392: 328
- [68] Kawaler S D. ApJ, 1988, 333: 236
- [69] Konigl A. ApJ, 1991, 370: 39
- [70] Sills A, Lombardi J C Jr, Rasio F A *et al.* ApJ, 2001, 548: 323
- [71] Durisen R H, Gingold R A, Tohline J E *et al.* ApJ, 1986, 305: 281
- [72] Hoffer J B. AJ, 1983, 88: 1420
- [73] Leonard P J T, Duncan M J. AJ, 1988, 96: 222
- [74] Spitzer L Jr, Mathieu R D. ApJ, 1980, 241: 618
- [75] Pryor C, McClure R D, Hesser J E *et al.* In: Merritt D ed. Dynamics of Dense Stellar Systems, Cambridge: Cambridge University, 1989: 175
- [76] Leonard P J T, Linnell A P. AJ, 1992, 103: 1928

The Status of Blue Straggler Studies(I): Formation Mechanisms

XIN Yu^{1,2}, DENG Li-cai¹, LIANG Yan-chun¹

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. Yunnan Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

Abstract: Observations and theoretical studies show that several different mechanisms should be responsible for the formation of Blue Stragglers (BSs). This is true even within a single composite system. Nowadays, some popular mechanisms for the formation of BSs are: mass transfer and coalescence in close binary systems; stellar interactions in dense environments; and stellar coalescence caused by stellar resonant interactions in binary-binary and binary-single star systems. Meanwhile, BSs could be found almost in all kinds of stellar systems. They play important role in the dynamical and chemical evolution of stellar systems, and have great influence on the integrated spectral properties of stellar systems. Blue stragglers are useful tracers for the study of binary populations, stellar content and stellar evolution in composite stellar systems.

Key words: astrophysics; blue straggler; review; formation; close binary system; stellar collision