

文章编号: 1000-8349(2006)03-0223-21

蓝离散星研究现状 (II) : 观测特性

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: 不同恒星系统 (银河系晕、疏散星团、球状星团、矮星系) 中蓝离散星所表现出的观测特性各不相同, 这与恒星系统动力学环境及相应的蓝离散星主导形成机制直接相关。因此, 分析研究蓝离散星的不同观测特性, 也就成为研究蓝离散星形成机制、恒星及双星系统演化以及恒星系统动力学演化的有效方法。

关键词: 天体物理学; 蓝离散星; 综述; 密近双星; 观测特性

中图分类号: P145.4

文献标识码: A

1 引 言

蓝离散星在各类恒星系统中的普遍存在已是不争的事实^[1,2]。作为理论工作的基础及唯一验证标准, 观测事实所描绘的蓝离散星基本特性, 不仅与蓝离散星形成途径相关, 而且是蓝离散星所嵌入的恒星系统动力学环境及星族特性的真实指针。从 Sandage (1953)^[3] 开始, 大量的观测工作通过不同方式、不同波段寻找不同恒星系统中的蓝离散星; Dieball 等人^[4] 2005 年对球状星团 NGC 2808 远紫外观测特性的研究, Carney 等人^[5] 2005 年对银河系场中蓝离散星观测特性及形成机制的研究, Piotto 等人^[6] 2004 年对银河系球状星团 HST 观测数据的统计分析, Fan 等人^[7] 1996 年对银河系疏散星团 M 67 多色测光数据的研究, Lee 等人^[8] 2003 年对矮星系中蓝离散星的观测研究等, 这些研究发现了不同环境下的蓝离散星在空间分布、视向速度、金属丰度、自转、双星比例以及双星系统轨道周期、轨道离心率等方面都存在较大差别。

作为蓝离散星研究现状简介的第二部分, 本文将描述不同区域里蓝离散星的基本观测特征, 这些区域分别是银河系场 (晕)(第二节)、疏散星团 (第三节)、球状星团 (第四节) 及矮星系 (第五节) 等; 文中还将进一步分别探讨在不同环境下蓝离散星的可能形成机制, 最后给出总结和展望 (第六节)。

收稿日期: 2005-08-12; **修回日期:** 2006-1-25

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)

2 银河系场中的蓝离散星

可以想象,在银河系场中寻找蓝离散星要比在星团中困难得多。因为脱离了简单星族也就脱离了一个可供对比的参照系。目前对场中蓝离散星样本的选取多在银河系晕里进行。晕是银河系的老年结构,恒星密度较低,晕族恒星多为贫金属星,与盘族恒星的金属丰度存在明显差别,因此寻找场中的蓝离散星是从寻找银河系晕中星族 II 的蓝离散星开始的。

Carney 等人^[9]1994 年给出了寻找场中蓝离散星候选体的判据:恒星的经红化改正之后的 $(B - V)_0$ 颜色要蓝于相似金属丰度的球状星团主序拐点 (turnoff point) 的颜色。星团主序拐点颜色由下式给出:

$$(B - V)_{0,\text{turnoff}} = 0.615 + 0.209[m/H] + 0.046[m/H]^2$$

以下我们将通过对观测事实的直接描述,给出场中蓝离散星的基本观测特性及可能的形成途径。

2.1 双星系统

1971 年, Bond 和 MacConnell^[10] 利用 *ubvy* 四色测光系统发现两颗 F 型贫金属矮星 (BD +25 1981 和 BD-12 2669) 在 $c_1 - (b - y)$ 和 $m_1 - (b - y)$ 双色图上均位于主序延长线上,很容易与其他恒星分离开来,定义它们为场中的蓝离散星,并指出它们具有主序星的质量和表面重力。Carney 和 Peterson^[11] 1981 年的工作进一步肯定了 Bond 和 MacConnell^[10] 发现的两颗贫金属矮星为场中的蓝离散星,并给出它们的高分辨率光谱观测及光谱分析:它们的 CNO 元素, Al, Mg, Sr, Ba, 以及 Fe 峰元素的丰度都非常类似于球状星团主序拐点区域的恒星。BD+25 1981 和 BD-12 2669 的自转速度分别为 (9 ± 2) km/s 和 (31 ± 2) km/s, 与星族 I 中具有相同有效温度的主序星基本一致。

Preston、Snedden^[12] 2000 年的工作将研究目标锁定为银河系场中 62 颗蓝贫金属星,发现其中有 34~42 颗属于双星系统,其比例 $\geq 60\%$, 多由 F 型、G 型类太阳星构成。对这些双星系统的解轨表明它们普遍轨道周期长,偏心率小,且多为单谱双星 (single-lined binary)。他们由此推断至少有一半的蓝贫金属双星为蓝离散星,源自 McCrea (1964)^[13] 的双星间质量传输机制。

Carney 等人^[14] 2001 年研究了 10 颗贫金属场星的视向速度。样本星的 $(B - V)$ 比相似金属丰度的球状星团主序拐点区域的恒星亮 0.01 到 0.13 星等。10 颗样本星中有 2 颗蓝离散星候选体 (BD+72 94 和 BD+40 1166) 没有观测到视向速度变化; 1 颗 (HD 84937) 观测到很微弱的变化,似乎是长周期双星; 另有 6 颗 (BD-12 2669, HD 97916, HD 106516, BD+15 1817, G66-30 和 G202-65) 为单谱双星,轨道周期 167~844 d, 轨道偏心率 $e < 0.30$, $\langle e \rangle = 0.11$ 。Carney 等人^[14] 将这 6 颗单谱双星与 Preston 和 Sneden^[12] 的 10 颗单谱双星放到一起,分析这类双星系统的轨道周期和偏心率变化范围,结果发现:除去 Preston 和 Sneden^[12] 的 3 颗周期小于 20 d 的双星 (轨道参数很可能被潮汐力改变,与质量传输无关), 13 个双星系统中的 10 个 $e < 0.15$, $\langle e \rangle = 0.062 \pm 0.011$; 对所有 13 个系统,有 $e < 0.29$, $\langle e \rangle = 0.106 \pm 0.025$, 轨道周期范围 167~1600 d。轨道偏心率是形成机制的重要检验参数,普通主序星构成的单谱

双星 $e \approx 0.37$ ，远高于场中的双星系统，且与金属丰度无关^[15,16]，由此可见质量传输应该是产生这种小轨道参数的最好机制^[17]。

Carney 等人^[5] 2005 年的观测样本为 5 颗贫金属蓝离散星 (场星)，其中 4 颗是单谱双星，轨道周期 302~840 d，小轨道偏心率。这些结果与 Preston 和 Sneden^[12] 2000 年、Carney 等人^[14] 2001 年得到的场中蓝离散星候选体的性质十分相似。观测显示处于双星系统中的蓝离散星的 ${}^7\text{Li}$ 元素都贫乏，其自转速度 $v_{\text{rot}} \sin i$ 要高于温度大致相同的主序星。

目前的观测事实倾向于场中蓝离散星的主要形成机制是密近双星间的质量传输。一颗子星演化到红巨星 (red giant branch, RGB) 阶段充满洛希瓣，将物质转移到另一颗子星上。对轨道周期较长的双星系统，大量子星即使平稳演化通过了红巨星阶段，也会在随后的渐进巨星支 (asymptotic giant branch, AGB) 阶段充满洛希瓣，从而产生出慢中子俘获过程元素增丰的恒星^[18]。观测到的蓝离散星多为单谱双星，由此推断伴星应该是 $M \approx 0.55 M_{\odot}$ 的白矮星。

2.2 自转速度

Ryan 等人^[19] 2002 年研究了 Carney 等人^[14] 2001 年工作样本中 3 颗蓝离散星：BD+51 1817, G66-30 和 G202-65 的自转，其 $v_{\text{rot}} \sin i$ 分别为 7.6 ± 0.3 , 5.5 ± 0.6 , 8.3 ± 0.4 km/s，均大于具有正常 Li 丰度的贫金属主序星。Ryan 等人^[19] 认为这样的自转速度是双星间质量传输的结果。

Preston 和 Sneden^[12] 的样本中有 14 颗贫金属星 ($[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.5$) 具有恒定的自转速度 (恒星表面)： $v_{\text{rot}} \sin i \leq 12$ km/s， $\langle v_{\text{rot}} \sin i \rangle = 10.1$ km/s ($\sigma = 1.7$ km/s)。其中 7 对周期大于 20 d 的双星系统，自转速度的最小值都要明显高于主序恒星自转速度的最大值，有 $\langle v_{\text{rot}} \sin i \rangle = 17.3$ km/s ($\sigma = 3.5$ km/s)。综合 Carney 等人^[5,14] 的数据，4 颗自转恒定的普通恒星 (BD+72 94, BD+40 1166, HD 84937 和 HD 142575) 有 $\langle v_{\text{rot}} \sin i \rangle = 7.8$ km/s ($\sigma = 3.8$ km/s)，而另外 10 颗双星系统的自转 $\langle v_{\text{rot}} \sin i \rangle = 18.7$ km/s ($\sigma = 10.0$ km/s)。

银河系晕双星系统中的蓝离散星候选体的自转速度似乎都要明显高于速度恒定的单星，这是因为双星间的质量传输大大加速了恒星表面物质的运动速度。质量传输模型认为在大量子星物质流向小量子星的过程中，双星轨道周期持续变短，直到小量子星长成成大质量成分。此时，双星开始分离，但质量传输过程已经将轨道角动量转化为旋转角动量，潮汐相互作用或其他机制会减小轨道偏心率。

2.3 元素丰度

2.3.1 Li 丰度

${}^7\text{Li}$ 是一种非常“脆弱”的元素， ${}^7\text{Li}(p, \alpha){}^4\text{He}$ 反应会在温度高于 2.5×10^6 K 时破坏掉 ${}^7\text{Li}$ ，这种反应一般发生在晚型主序星对流包层底部^[20]。 ${}^7\text{Li}$ 丰度是对恒星对流理论 (包括对流区深度，物质混合程度等) 的有效诊断标准，同时也是对恒星间相互作用 (质量传输、双星并合、恒星碰撞) 的有效诊断标准，因为这些机制都可以改变作用产物表面的对流区深度。而所有这些机制又都与蓝离散星的形成相关，因此，分析恒星表面的 Li 元素丰度是研究蓝离散星形成机制的有效诊断方式之一。

贫金属主序星 (有效温度 $T_{\text{eff}} < 5400$ K) 中已经观测到 ${}^7\text{Li}$ 缺失，因为这类恒星足够深的对流区可以将表面的 ${}^7\text{Li}$ 元素带到恒星内部温度足够高的区域^[21]；同样的现象也存在于贫金属的亚巨星当中^[22]，贫金属恒星的表面 Li 元素缺失会在恒星演化到红巨星底部之前就开始

进行。然而, 热的主序矮星和亚巨星, 即便是贫金属恒星, ${}^7\text{Li}$ 丰度仍大致维持一个常数: $\log n(\text{Li})=2.2$ [23]。

Ryan 等人 [24] 2001 年详细研究了银河系晕中 ${}^7\text{Li}$ 极度贫乏的恒星, 4 颗样本星中的 3 颗有效温度约为 6300 K。结果表明: 质量传输机制的确可以导致恒星表面 Li 元素丰度下降, 观测也的确发现表面没有 Li 元素的蓝离散星候选体 [25,26], 因此, 晕中 ${}^7\text{Li}$ 丰度极低的恒星至少可以作为蓝离散星候选体, 拐点附近最热的 ${}^7\text{Li}$ 贫乏的恒星就是“正规的”蓝离散星。但与此同时, Ryan 等人 [24] 也发现了存在正常 Li 丰度的蓝离散星候选体, 这些恒星若不是来源于一种未知机制, 就应该是场中的年轻贫金属星。由此可见, Li 丰度并非区分场中年轻的贫金属星和蓝离散星的有效判据。Boesgaard 和 Budge [27] 1988 年在疏散星团 Hyades 中就发现了 ${}^7\text{Li}$ 丰度极度贫乏的主序恒星, 有效温度为 6400~6800 K。所谓的“Lithium gap”, 只是界定于正常贫金属主序星的演化, 很可能导致年轻的正常贫金属主序矮星和贫金属蓝离散星的混淆。

2.3.2 其他元素

Preston 和 Sneden [12] 工作样本的金属丰度范围为 $0.0 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq -2.5$ (银河系普通晕星的金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.5$)。他们采用的样本恒星普遍具有超丰的 α 元素丰度: $[\text{Mg}/\text{Fe}] \approx [\text{Ca}/\text{Fe}] \approx [\text{Ti}/\text{Fe}] \approx +0.30 \pm 0.20$; 对 Fe 峰元素, 有 $[\text{Sc}/\text{Fe}] \approx [\text{Cr}/\text{Fe}] \approx 0.00 \pm 0.25$; 对中子俘获过程元素, 当 $[\text{Fe}/\text{H}] > -2.0$ 时, 有 $[\text{Sr}/\text{Fe}] \approx [\text{Ba}/\text{Fe}] \approx 0.0$, 但是对更低的金属丰度, 不同样本星之间的 Fe 峰元素存在很大区别。

Sneden 等人 [18] 2003 年的工作样本包含 6 颗晕族蓝贫金属双星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2$), 其中 3 颗为双谱双星 (double-lined binary), 另 3 颗具有恒定的视向速度, 结果发现这两组恒星的金属丰度存在很大差别: 双谱双星普遍存在 C 元素和慢中子俘获过程元素的增丰, CS 29497-030 有 $[\text{Pb}/\text{Fe}] = +3.7$; 与视向速度恒定的样本星比较, 双谱双星的 O 元素也存在增丰现象, 这种增丰可由 AGB 阶段恒星的质量传输实现 [28]。但与此同时, Sneden 等人 [18] 没有在任何金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] > -2$ 的蓝贫金属双星中观测到类似的元素增丰现象。

3 银河系疏散星团中的蓝离散星

3.1 蓝离散星候选体

如何准确定义恒星系统中的蓝离散星, 应是我们研究蓝离散星问题的基础。Abt [29] 和 Mathys [30] 分别对不同年龄疏散星团中蓝离散星的光谱进行了研究, 发现蓝离散星的光谱在轮廓及金属丰度上均表现出各不相同的性质, 无法作为定义蓝离散星候选体的判据。

目前通用的选取蓝离散星候选体的方法是在星团颜色-星等图 (color-magnitude diagram, CMD) 上进行的。如图 1 所示的 CMD 中, 横坐标为 $B-V$ 色指数, 纵坐标为绝对 V 星等。图中右侧的实线是根据星团年龄和金属丰度给出的等龄线 (isochrone), 左侧实线是星团金属丰度的零龄主序 (zero age main sequence, ZAMS)。蓝离散星候选体存在的典型区域为图中标示的阴影部分: 左侧以星团的 ZAMS 为界, 右侧边界一般为星团主序拐点的颜色。这个阴影区域的下限与星团的主序还有相当距离, 可以区分。目前尚无明确的上限定义。

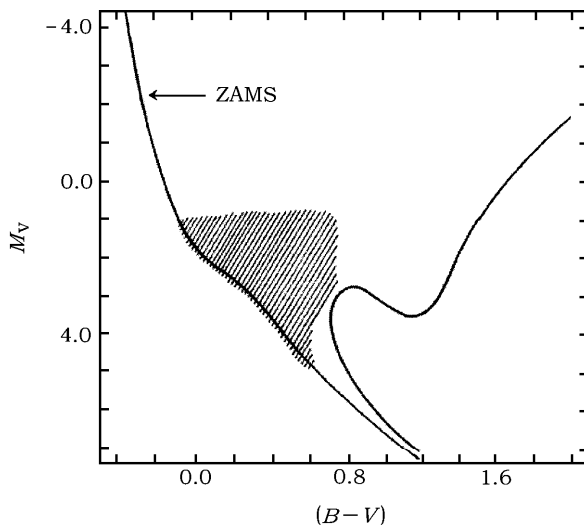


图 1 星团 CMD 上蓝离散星候选体的选择区域 (图中阴影部分)^[31]

高精度的测光数据加上成员星概率判定是准确定义星团中蓝离散星的前提和基础。若没有成员星概率判定，一般选取靠近星团中心区域的恒星测光资料构造 CMD。

实际观测中，大多数蓝离散星都位于 McCrea (1964)^[13] 给出的双星质量传输机制形成蓝离散星的上限 (约高于主序拐点 2.5 星等) 以下，但也不乏例外，如疏散星团 M 67 中的 F 81^[32]、疏散星团 NGC 2158 中的 “D1”^[33]，它们在星团 CMD 上的位置远超出主序拐点 2.5 星等，很可能需要双星 - 双星碰撞机制进行解释^[34]。

3.2 分布规律

Ahumada、Lapasset^[31](1995)(以下简称为 AL95) 基于大量测光观测数据，给出了银河

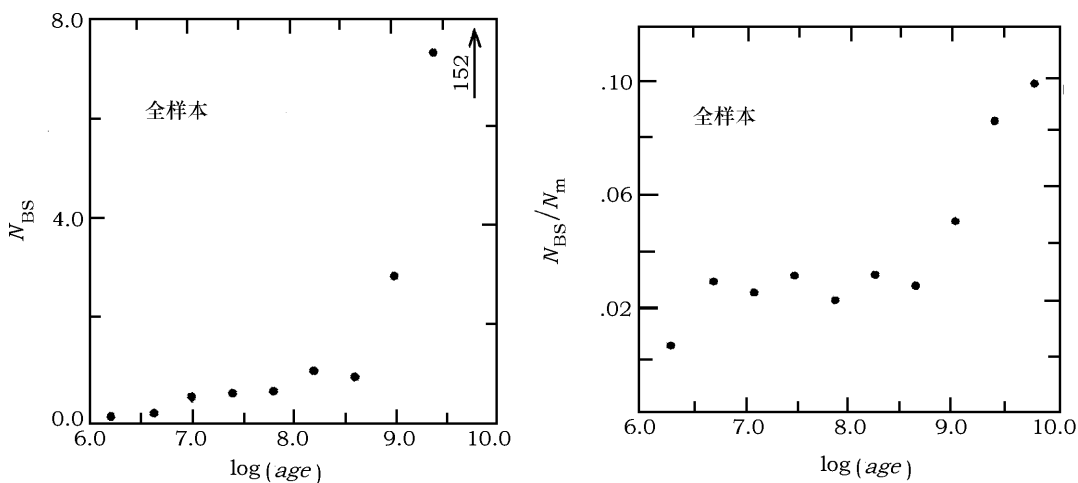


图 2 银河系疏散星团中蓝离散星数目随星团年龄及星团成员星数目的分布^[31]

左图：蓝离散星数目随星团年龄的变化趋势；右图：蓝离散星数目与星团主序星数目的比值随星团年龄的变化趋势。

N_{BS} 为疏散星团中蓝离散星的数目， N_m 为疏散星团中主序星数目。

系疏散星团中蓝离散星测光数据的统计列表, 包括 390 个疏散星团中的 959 颗蓝离散星。因并非所有的星团都具有很好的成员星概率判定(自行及(或)视向速度), 蓝离散星候选体的选择主要依赖于恒星在星团 CMD 上的位置。根据 AL95 的统计结果, 银河系疏散星团中蓝离散星数目的典型值为几颗到几十颗, 数目随星团年龄及星团成员星数目的增长而增长。对年轻(年龄 $< 10^{8.3}$ yr) 及中等年龄 ($10^{8.3}$ yr \leq 年龄 $< 10^9$ yr) 的疏散星团, 蓝离散星数目对星团年龄及星团主序恒星数目似乎并不十分敏感; 但是对老年(年龄 $\geq 10^9$ yr) 疏散星团, 蓝离散星数目及蓝离散星与主序恒星数目的比值随星团年龄增长呈陡峭的上升趋势。具体情况如图 2 所示: 左图为星团中蓝离散星的平均数目随星团年龄的变化, 右图为星团中蓝离散星数目与星团主序星数目比值的平均值随星团年龄的变化。

3.3 双星系统

González 和 Lapasset^[35~38] 对疏散星团拐点附近的主序恒星及密近双星进行了一系列的高分辨率光谱观测, 他们的观测样本包含了许多 AL95 中的蓝离散星候选体。

González 和 Lapasset^[35] 2000 年研究了疏散星团 NGC 2516 中的 36 颗亮星 ($V < 9.6$ mag) 的光栅光谱, 样本包括主序星、红巨星和蓝离散星候选体。22 颗成员星给出星团的平均视向速度为 (22.01 ± 0.24) km/s。大质量主序星中有高达 26% 的双星比例。他们判定 AL95 列出的星团蓝离散星候选体中, HD 66341 和 HD 66194 为蓝离散星: HD 66341 视向速度较低; HD 66194 是一颗高速自转的 Be 星, $v_{\text{rot}} \sin i = 270$ km/s, 光谱型 B2, 有视向速度变化, 为密近双星系统。另外 4 颗蓝离散星候选体 (HD 65663(Be), HD65950(Bp), HD 66066, HD 65987) 应该是主序拐点区域的恒星。NGC 2516 ($\alpha = 7^{\text{h}}58^{\text{m}}$, $\delta = -60^{\circ}44'$ [J2000.0]; $l = 274^{\circ}.0$, $b = -15^{\circ}.8$) 是南天最亮的疏散星团之一。色余 $E(B - V) = 0.12$ mag, 距离 $r = 430$ pc^[39], 年龄的对数 $\log \text{age} = 8.15$ ^[40]。

González 和 Lapasset^[36] 2001 年的工作对疏散星团 NGC 3114 中的 30 颗亮星进行了光栅光谱观测, 样本包括主序星、红巨星和蓝离散星候选体。根据星团成员星和场星之间的速度分布, 最终确定了 19 颗成员星和 10 颗非成员星, 剩余的一颗为分光双星。成员星中的 4 颗蓝离散星候选体都只是主序拐点区域恒星, 其中 2 颗在 CMD 上的位置略蓝于主序拐点, 这可用它们极低的自转速度进行解释。NGC 3114 表现出极不正常的低双星比例, 对 16 颗恒星的视向速度观测都没有探测到速度变化。NGC 3114 的年龄为 1.6×10^8 yr, 距离模数 $(V - M_v) = (9.8 \pm 0.2)$ mag, 色余 $E(B - V) = 0.07 \pm 0.01$ mag。

González 和 Lapasset^[37] 2002 年的观测样本有 3 颗疏散星团中的蓝离散星候选体, 均为双星系统。其中, NGC 2527-213 比主序拐点亮 1 个星等, 是一颗双谱双星, 周期 15.06 d, 双星质量比 0.51。两子星之间的距离表明, 这个系统的质量传输要待大质量子星演化离开主序之后开始。IC 4651-44 是一颗单谱双星, 视向速度变化周期 8.684 d, 轨道离心率 $e = 0.15 \pm 0.03$ 。NGC 3766-316 是一颗双谱双星, 位于星团主序拐点区域。视向速度曲线分析发现这是一颗半相接双星, 主星年龄要比星团年轻的多, 伴星已经充满洛希瓣。NGC 3766 是一个年轻的疏散星团, $\log \text{age} = 7.35$ 。NGC 2527 和 IC 166 均为老年疏散星团, 其 $\log \text{age}$ 分别为 9.00 和 9.20。

González 和 Lapasset^[38] 2003 年通过二维交叉证认研究了 2 颗 B 型双谱双星 (HD 66066A 和 HD 315031, 分别是疏散星团 NGC 2516 和 NGC 6530 中的蓝离散星候选体^[31]) 的轨道。

两颗双星均为圆轨道，轨道周期分别为 1.67 和 1.38 d；均由两颗主序星组成，会在 H 核燃烧结束（主星演化离开主序）之前开始质量传输（由双星洛希瓣模型计算得出），伴星获得质量演化为蓝离散星。HD 315031 更像是一个三体系统，高视向速度振幅 (amplitude) 显示第 3 颗成员的质量范围在 $6 \sim 25 M_{\odot}$ 之间。NGC 6530 是一个极年轻的疏散星团， $\log age = 6.3$ 。

Milone, Latham 及其同事对疏散星团 M 67 中蓝离散星的视向速度进行了长期观测研究^[41~44]。

Milone、Latham^[42] 1992 年研究了 M 67 中蓝离散星 F 190 ($V = 10.95 \text{ mag}$, $B - V = 0.22 \text{ mag}$) 的光谱，F 190 是一个短周期双星系统，轨道周期 $P = 4.2 \text{ d}$ 。它是双星间 B 型质量传输（开始在中心 H 燃烧结束之后到中心 He 燃烧开始之前）的产物，目前仍处在质量传输的后期，而且整个系统没有太多质量损失。但 Chen、Han^[45] 2004 年的模型显示 A 型质量传输（中心 H 燃烧阶段）比 B 型质量传输更适合 F 190 的形成。

Latham、Milone^[44] 1996 年对 M 67 中的 13 颗蓝离散星进行了视向速度观测。其中 3 颗因转速太高无法得到有效的视向速度观测数据，另 10 颗蓝离散星中的 5 颗可以解轨，发现它们均为长周期双星，周期范围为 $800 \sim 5000 \text{ d}$ 。5 颗长周期双星中的 3 颗 (S 752, S 997, S 1267) 具有较大的轨道偏心率，另外 2 颗 (S 975, S 1195) 的轨道近似为圆型。由此推断：圆轨道双星系统的蓝离散星很可能是 C 型质量传输（中心 He 燃烧开始之后到中心 C 燃烧开始之前）的产物；另外 3 颗长周期、大偏心率的双星系统可能是恒星碰撞或双星 - 双星系统间相互作用导致的潮汐俘获的结果^[46]。

Leonard^[47] 1996 年进一步研究了 M 67 中处于双星系统的蓝离散星的比例及其可能的形成机制，指出：A 型质量传输及双星并合不可能是 M 67 中双星系统蓝离散星的主要形成机制，因为这种机制作用下产生的并合体仍能束缚在星团中的概率远远低于星团中观测到蓝离散星的概率；B 型质量传输只能用来解释 F 190 的形成，因为它是一颗短周期双星；C 型质量传输可能是 M 67 中蓝离散星的来源之一，但绝非主导因素，因为这种机制很难产生偏心轨道；双星 - 双星、双星 - 单星系统相互作用导致的恒星碰撞很可能是 M 67 中蓝离散星的主要形成机制，至少这可以与观测到的蓝离散星轨道符合。

3.4 元素丰度

本节讨论 M 67 中蓝离散星元素丰度。作为一个经典的老年疏散星团，人们给予 M 67 太多的关注，正因如此，对 M 67 中蓝离散星的观测研究也是最全面、最具体的。

1991 年，Mathys^[30] 对 M 67 中的 11 颗蓝离散星进行了光谱观测，但是只对其中的 2 颗 (F 153 和 F 185) 进行了细致的丰度分析。图 3 给出了 F 153 和 F 185 各元素丰度与太阳丰度的比值，分别由空心、实心圆标明。从图中我们可以看到：这两颗蓝离散星的 Fe 族元素 (Na, Mg, Si, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni) 丰度都在 ± 2 倍太阳丰度范围内；Fe 丰度与太阳丰度相差无几，非常近似于 Garcia Lopez 等人^[48] 1988 年用 M 67 中 7 颗主序星得到的 Fe 丰度 ($[Fe/H] = 0.04$)；但 Si 丰度要明显高于 Garcia Lopez 等人^[48] 给出的丰度值 ($[Si/H] = -0.20$)；F 153 的 Ca、Sc 丰度偏低，因为它是 1 颗 Am 星^[49]；F 185 的 Sc 丰度偏低表明它很可能也是 Am 星，但 F 185 的 Ca 丰度近似为太阳丰度，基本与 Garcia Lopez 等人^[49] 给出的主序星 Ca 丰度一致 ($[Ca/H] = -0.10$)；2 颗蓝离散星的 O 丰度与 Am 星的十分类似，低于正常的 A 型矮星，高于相同有效温度的强磁场恒星 (magnetic stars)；它们的 C 丰度也低于 M 67 主序星；其他重

元素 (Zn, Sr, Y, Zr, Ba) 都超丰 0.5~1 dex。

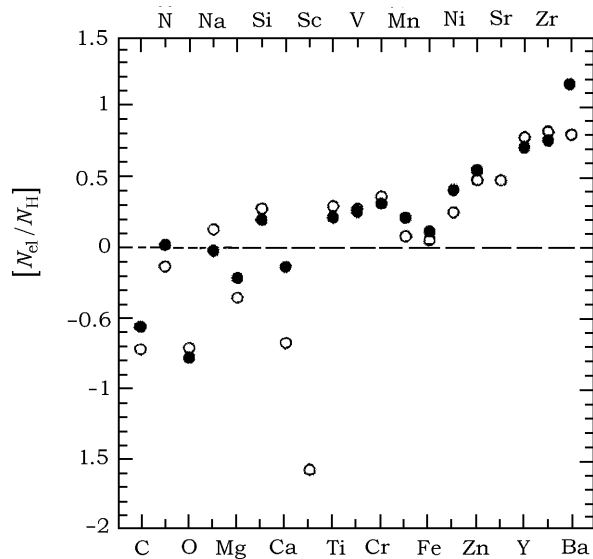


图 3 M 67 中 2 颗蓝离散星 F 153 和 F 185 各元素丰度与太阳丰度的比值^[30]

图中空心、实心圆圈分别代表 F 153 和 F 185 的各元素丰度。

表 1 中的两个表格摘自文献 [30] 中的表 5、6，分别给出 F 153 和 F 185 两颗蓝离散星各元素的丰度值 (Table 5)；作为参考，同时给出不同类型恒星的 CNO 元素丰度 (Table 6)。

Shetrone、Sandquist^[50] 2000 年的工作进一步给出了 M 67 中蓝离散星和主序拐点附近恒星的元素丰度分析结果，详细数据见表 2(摘自文献 [50] 中的表 4)。

除此之外，Hobbs、Mathieu^[25] 1991 年分析了 4 颗蓝离散星的高色散光谱，其中 2 颗是场中的蓝离散星 ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.4$)，另外 2 颗是 M 67 的成员星。结果发现 4 颗样本星的光谱中都无法探测到 Li I ($\lambda 6708$) 的谱线，且通过大气模型给出的 Li 丰度上限要明显低于蓝离散星所在星族的原始 Li 丰度。Pritchett、Glaspey^[51] 1991 年也发现 M 67 中的 7 颗蓝离散星都存在明显的 Li 元素贫乏，比场中普通的 A 型、F 型主序星少 30%。Pritchett 等人^[52] 1993 年进一步发现：Li 丰度偏高的蓝离散星，金属丰度也偏高；而 Li 元素贫乏的蓝离散星，恒星金属丰度存在相当大的弥散，其范围为： $-1.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < +0.4$ 。

表 1 F 153 和 F 185 两颗蓝离散星各元素的具体丰度值^[30]

Table 5. Elemental abundances in F 153 and F 185

Element	F 153			F 185		
	$[N_{\text{el}}/N_{\text{H}}]$	σ	n	$[N_{\text{el}}/N_{\text{H}}]$	σ	n
C	-0.72	0.17	5	-0.56	0.08	2
N	-0.13	0.14	2	0.02	-	1
O	-0.71	0.10	4	-0.78	0.03	2
Na	0.13	-	1	-0.02	-	1
Mg	-0.35	0.07	2	-0.21	0.00	2
Si	0.28	0.17	3	0.20	0.16	2
Ca	-0.67	0.08	3	-0.13	0.16	3
Sc	-1.57	-	1	-	-	-
Ti	0.30	0.13	20	0.22	0.24	10
V	0.28	0.1	2	0.26	-	1
Cr	0.37	0.17	16	0.32	0.14	8
Mn	0.07	0.13	2	0.20	0.13	2
Fe	0.03	0.16	85	0.09	0.19	54
Ni ^a	0.26	0.06	4	0.42	0.11	4
Zn	0.49	0.02	2	0.56	0.02	2*
Sr	0.49	-	1	-	-	-
Y	0.80	0.10	2	0.72	0.17	2
Zr	0.83	0.24	4	0.77	0.04	2
Ba	0.79	-	1	1.15	-	1

^a The lines of Ni II have not been used to derive this abundance (see text)

Table 6. CNO patterns in various types of stars

Star / Star group	$\log(\epsilon_{\text{C}}/\epsilon_{\text{N}})$	$\log(\epsilon_{\text{O}}/\epsilon_{\text{N}})$	$\log \epsilon_{\text{CNO}}$
F 153	-0.03	0.35	8.5
F 185	-0.02	0.13	8.5
M 67 subgiants	≥ 0.50	-	-
M 67 giants	-0.02	-	-
M 67 bright giants	-0.05	0.35	9.0
Normal A stars	0.26-0.81	0.58-0.95	8.9-9.1
Am stars	-0.11-1.04	0.67-1.04	8.3-9.0
Ap stars	-0.55-1.40	-0.66-1.18	8.3-9.0
Sun	0.56	0.93	9.1

表 2 M 67 中蓝离散星和主序拐点附近恒星的元素丰度分析结果^[50]

TABLE 4							
PROGRAM—STAR ABUNDANCES							
Star	T_{eff}	g	[Fe/H]	Li	[C/Fe]	[N/Fe]	[Na/Fe]
Blue Stragglers							
Our data, probably minimal or no contamination by companions:							
S984	6170	3.9	0.08 ± 0.03	2.20:	-0.14 ± 0.08	0.10 ± 0.2	-0.13 ± 0.06
S2204	6650	4.6	-0.05 ± 0.06	<2.00	0.05 ± 0.06	<0.0	-0.05 ± 0.06
Our data, unknown contamination by companion:							
S975	6820	4.4	0.02 ± 0.06	<2.50	-0.09 ± 0.09	<0.05	-0.6:
S997	6675	4.4	-0.06 ± 0.03	<1.60	-0.03 ± 0.08	-0.15 ± 0.2	-0.02 ± 0.11
Our data, sure or probable contamination by companion:							
S1082	7050	4.5	-0.25 ± 0.05	<1.80	-0.01 ± 0.05	<0.0	0.23 ± 0.20
Mathys 1991 data:							
S968	8560	4.1	0.03 ± 0.16		-0.75 ± 0.23	-0.16 ± 0.21	0.10
S1263	8290	4.1	0.09 ± 0.19		-0.64 ± 0.21	-0.07	-0.11
Turnoff Stars							
S815	6275	4.2	-0.05 ± 0.04	<1.90	-0.05 ± 0.04	<0.15	0.01 ± 0.07
S1183	6250	4.2	-0.04 ± 0.08	<2.00	0.05 ± 0.05	0.15 ± 0.2	-0.10 ± 0.08
S1271	6360	4.3	-0.07 ± 0.03	<1.90	0.10 ± 0.04	<0.05	-0.07 ± 0.10
S821	6190	4.0	-0.04 ± 0.04	<2.00	-0.12 ± 0.10	0.20 ± 0.2	-0.05 ± 0.06
Star	T_{eff}	g	[Mg/Fe]	[Ca/Fe]	[Ni/Fe]	[Ba/Fe]	Notes
Blue Stragglers							
Our data, probably minimal or no contamination by companions:							
S984	6170	3.9	-0.09 ± 0.06	-0.05 ± 0.03	-0.01 ± 0.09	0.25 ± 0.06	
S2204	6650	4.6	-0.26 ± 0.06	-0.17 ± 0.05	0.17 ± 0.14	0.12 ± 0.05	
Our data, unknown contamination by companion:							
S975	6820	4.4	-0.13 ± 0.07	0.19 ± 0.05	-0.25 ± 0.20	0.23 ± 0.21	cb
S997	6675	4.4	-0.04 ± 0.13	-0.04 ± 0.03	0.10 ± 0.09	0.22 ± 0.11	eb
Our data, sure or probable contamination by companion:							
S1082	7050	4.5	-0.41 ± 0.18	-0.12 ± 0.07	0.23 ± 0.10	-0.02 ± 0.05	acc?
Mathys 1991 data:							
S968	8560	4.1	-0.38 ± 0.17	-0.70 ± 0.18	0.23 ± 0.17	1.06	Am
S1263	8290	4.1	-0.30 ± 0.19	-0.22 ± 0.25	0.33 ± 0.22	0.76	
Turnoff Stars							
S815	6275	4.2	-0.05 ± 0.07	-0.03 ± 0.04	0.10 ± 0.12	0.11 ± 0.07	
S1183	6250	4.2	-0.23 ± 0.22	-0.04 ± 0.06	0.00 ± 0.05	0.43 ± 0.16	
S1271	6360	4.3	-0.08 ± 0.07	0.02 ± 0.03	0.06 ± 0.10	0.32 ± 0.06	
S821	6190	4.0	-0.08 ± 0.08	-0.01 ± 0.03	-0.02 ± 0.09	-0.02 ± 0.06	eb

NOTES.—(eb) eccentric binary; (cb) circularized binary; (acc?) accretion occurring in binary?; (Am) known Am star.

3.5 蓝离散星对星团积分光谱性质的影响

蓝离散星在星团 CMD 上存在的典型区域 (亮于、蓝于星团主序拐点) 表明: 蓝离散星的存在可以为恒星系统的积分光谱贡献一个亮蓝成分^[53], 对老年恒星系统尤其明显。本小节我们仍以 M 67 为例讨论蓝离散星对系统积分光谱性质的影响。

Deng 等人^[32] 1999 年以 M 67 为样本, 最早进行了蓝离散星对星团能谱分布 (spectral

energy distribution, SED) 影响的研究, 综合 BATC (Beijing - Arizona - Taipei - Connecticut) 测光数据和 Girard 等人^[54] 1989 年的成员星概率研究结果, 定义了 M 67 中的 24 颗蓝离散星, 见图 4 星团 CMD 左侧方框中的实心数据点。

用 Kurucz 模型拟合观测得到的蓝离散星 SED, 给出蓝离散星基本参数和理论光谱, 用简单恒星星族 (simple stellar population (SSP)) 理论模型构造星团中除蓝离散星之外其他成员星的 SED, 图 5 描述了蓝离散星对星团积分光谱的可能影响: 考虑了蓝离散星贡献的星团积分光谱 (细实线) 与 SSP 理论模型给出的光谱 (粗实线) 有很大差别, 这种差别尤其表现在紫外、蓝端波长范围, 蓝离散星使星团 SED 明显增强。图 6 给出的是 Schiavon

等人^[55] 2004 年的工作结果, 仍以 M 67 为样本, 由图中我们可以看到, 蓝离散星对星团积分光谱影响很大, 考虑了蓝离散星的星团光谱 (虚线) 明显变蓝, Balmer 线强度增加, 而且可见一些微弱的金属谱线。

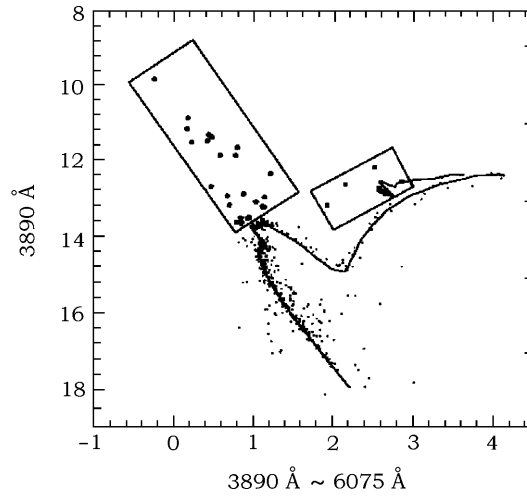


图 4 疏散星团 M 67 的 CMD^[32]

图中的点即星团成员星, 实线是根据星团年龄和金属丰度给出的等龄线, 左侧方框内为星团中的蓝离散星, 右侧方框内包含星团团簇星和一颗 AGB 星。

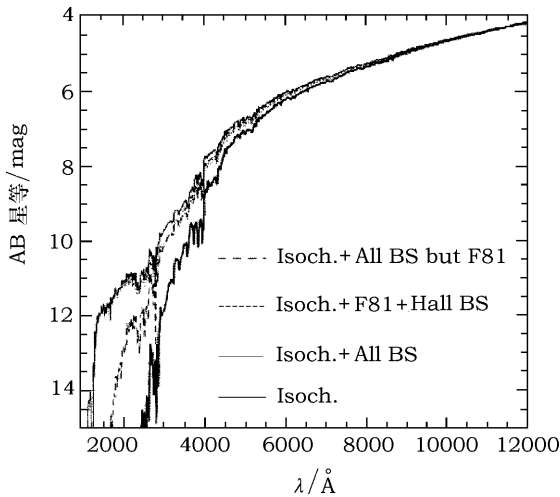


图 5 Deng 等人 1999 年给出的疏散星团 M 67 积分光谱^[32]

横坐标波长, 纵坐标为 AB 星等。不同类型曲线表述的不同成分如图中所示。

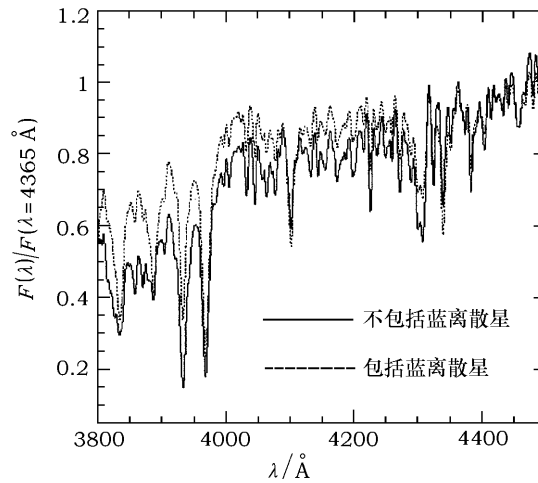


图 6 Schiavon 等人 2004 年给出的疏散星团 M 67 积分光谱^[55]

图中实线表示没有蓝离散星贡献的光谱, 虚线表示考虑蓝离散星贡献之后的星团积分光谱。

4 银河系球状星团中的蓝离散星

银河系球状星团的金属丰度要普遍低于疏散星团。极低的金属丰度使大气不透明度降低, 赫罗图上的直接表现之一就是星团出现延展的水平分支。以图 7 为例, 在球状星团的 CMD 上水平分支可以一直延伸到蓝离散星存在的区域, 且光度高于蓝离散星。这种情况下, 蓝离散星对整个恒星系统 SED 的影响并不明显, 但仍是星团动力学演化的重要指针。

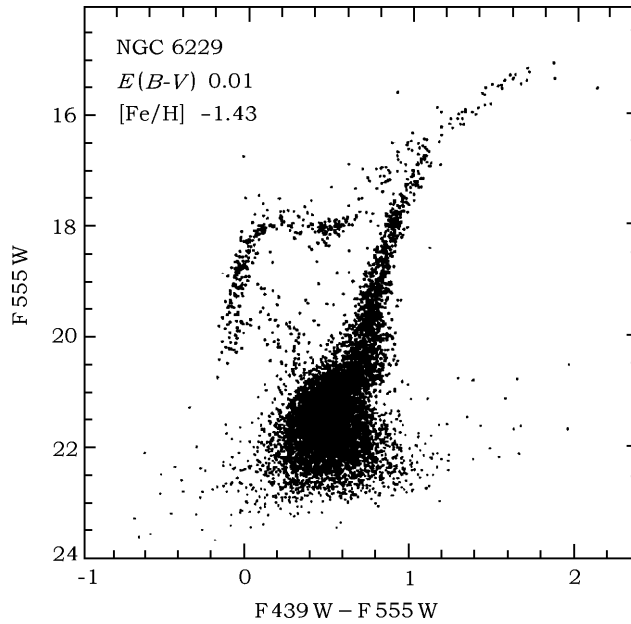


图 7 球状星团 NGC 6229 的 CMD ^[56]

4.1 测光观测

哈勃空间望远镜 (HST) 的使用让人们可以更加清晰地分辨球状星团中心区域的恒星成分。Piotto 等人 2004 年利用 HST-WFPC2 成像观测得到 56 个球状星团中近 3000 颗蓝离散星的测光数据 ^[6], 单个星团中蓝离散星数目在 40~400 颗之间 ^[57]。Piotto 等人 ^[6] 2004 年的工作通过星团中蓝离散星数目与水平分支恒星数目的比值 ($F_{BS} \equiv N_{BS}/N_{HB}$, 定义为星团蓝离散星的相对频率) 和蓝离散星空间分布密度分析了蓝离散星数目与星团其他物理参量之间的关系。图 8 展示了球状星团中蓝离散星的相对频率 F_{BS} 与星团总光度 M_V (上图)、核心密度 ρ_0 (中图) 及碰撞概率 Γ_* (下图) 之间的关系, 结果表明, 球状星团中的 F_{BS} 要明显低于场中的值, 与恒星的碰撞概率基本无关, 且反比于星团总光度 (恒星总质量)。

基于 Piotto 等人 ^[6] 的数据, Davies 等人 ^[57] 2004 年重新讨论了球状星团中蓝离散星的形成机制, 认为它应该是恒星碰撞和双星演化共同作用的结果。对高密度球状星团, 原初双星系统的自然演化在恒星彼此间遭遇频繁的环境下将面临很大冲击。若一颗较大质量主序星在与小质量双星系统的遭遇中替换掉其中一颗小质量子星, 并与另外一颗小质量子星重新构

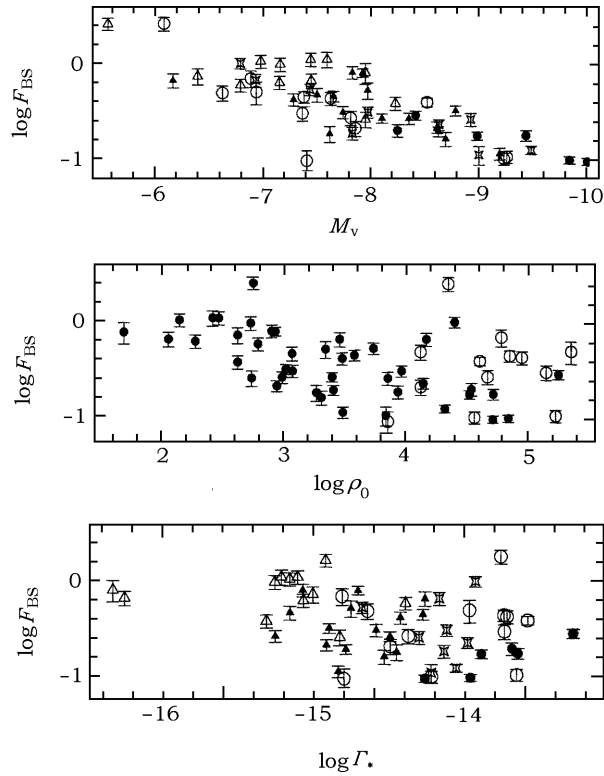


图 8 球状星团中蓝离散星的相对频率 (F_{BS}) 与星团总光度 M_V (上)、核心密度 ρ_0 (中)、碰撞概率 Γ_* (下) 之间的关系^[6]

不同图标代表不同的核心密度。空心三角： $\log \rho_0 < 2.8$ ；实心三角： $2.8 < \log \rho_0 < 3.6$ ；十字型： $3.6 < \log \rho_0 < 4.4$ ；实心圆： $\log \rho_0 > 4.4$ ；空心圆环代表后核坍缩 (post-core-collapse) 星团。

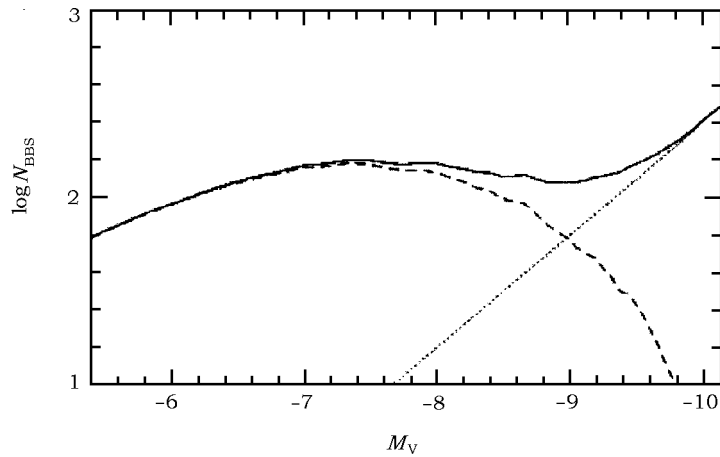


图 9 最近 1 Gyr 中不同机制形成蓝离散星的数目与星团总光度 M_V 之间的关系^[57]
点线为碰撞形成，短划线为双星演化形成，实线是两种机制的总和。

成双星系统, 就可以缩短双星开始质量传输的时标, 使小质量子星更快演化成为蓝离散星。图 9 表示理论模型计算的结果: 横坐标为系统总光度 (总质量), 纵坐标是蓝离散星数目。碰撞机制形成蓝离散星用点线表示, 双星系统演化形成蓝离散星用短划线表示, 实线表示两种机制的外包络。图中两种机制的交叉点大致对应星团总光度 $M_V = -8.8 \text{ mag}$, Piotta 等人^[6] 依据这一星等 ($M_V = -8.8 \text{ mag}$) 将球状星团中的蓝离散星分成两组, 分别描述它们的光度函数, 结果发现两个不同星等区间内的蓝离散星具有完全不同的光度函数轮廓 (图 10)。

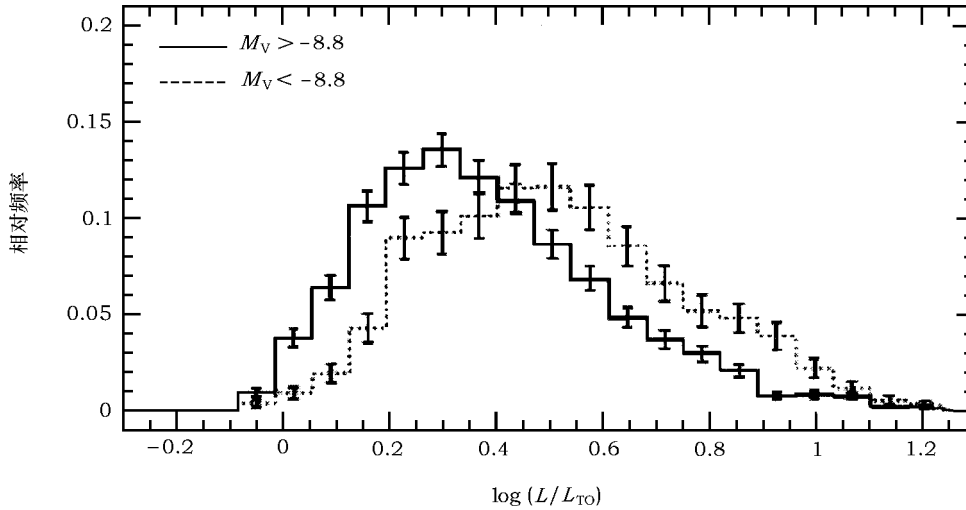


图 10 不同星等 (M_V) 区间内蓝离散星的光度函数轮廓^[6]

4.2 双星系统

密集星场 (如球状星团) 中的双星系统在整个恒星系统的动力学演化过程中扮演着相当重要的角色, 它可以阻止球状星团的核坍缩过程甚至产生逆过程^[58,59]。球状星团中的双星演化可产生大量“特殊”天体, 如小质量 X 射线双星、毫秒脉冲星、B 型亚矮星, 当然也包括蓝离散星。目前探测球状星团中双星系统的途径主要有三种: (1) 视向速度变化^[60]; (2) 寻找食双星^[61]; (3) 寻找 CMD 上平行于主序的第二主序 (测光双星支); 前两种方法对观测的要求很高^[58], 相比之下, 第 3 种方法不需重复观测, 只是基于简单事实: 遥远球状星团中的双星系统若只能作为单星分辨, 其光度就是两颗单星的光度之和。因此, CMD 上双星序列的外包络可简单理解为单星主序上两颗等质量单星的光度之和, 即比单星主序约高 0.752 星等。

Rubenstein 和 Bailyn^[62] 1997 年利用第 3 种方法分析了球状星团 NGC 6752 中心区域的双星比例。观测数据来自 HST-WFPC2。利用 Monte-Carlo 方法模拟星团 CMD 上的双星比例, 考虑不同的双星质量比, 结果给出: 核半径区域内 ($r < 11''$) 的双星系统比例可达 15%~38%, 但对外围区域这一比例不会高于 16%。

Bellazzini 等人^[63] 2002 年利用 HST-WFPC2 的观测数据, 采用 Rubenstein、Bailyn^[62] 1997 年的方法分析了低密度球状星团 NGC 288 中的双星比例, 发现星团中双星系统的径向分布受质量分层 (mass segregation) 效应影响很大 (低密度球状星团的 King model 中心聚度 (concentration parameter) $c \approx 1$, 高密度星团有 $c \geq 2$, M 3 有 $c=1.85$ ^[64])。

在星团中心区域 ($r < r_h$, $r_h \approx 1.6 r_c$ 是光度达到星团总光度一半处的半径), 若不考虑双星质量比, 双星比例 f_b 变化范围为 0.08~0.38。若选取合适的双星质量比, f_b 的最可能范围在 0.10~0.20 之间。但是在星团外围区域 ($r \geq r_h$), 即便不考虑双星质量比, f_b 仍小于 0.10, 最可能的值为 0.00, 不相接双星由原初双星系统主导。

NGC 288 中的蓝离散星比例很高, 由此可以证明: 若在这种低密度环境下原初双星系统可以自由演化, 则双星演化形成蓝离散星的机制将变得十分有效。

4.3 星周盘

目前的观测和理论工作表明, 蓝离散星的形成途径可大致分为两类: 质量传输^[63] 和恒星碰撞^[65]。两种途径都可导致作用产物的高速旋转, 若没有有效的机制丢掉角动量, 理论模型给出的新生恒星会在到达主序之前彻底瓦解, 根本无法演化形成蓝离散星^[66]。Sills 等人^[67] 2005 年的工作针对这一问题提出了一条可能的解决途径: 蓝离散星周围的吸积盘或物质外向流 (outflow) 对恒星角动量的分流作用。

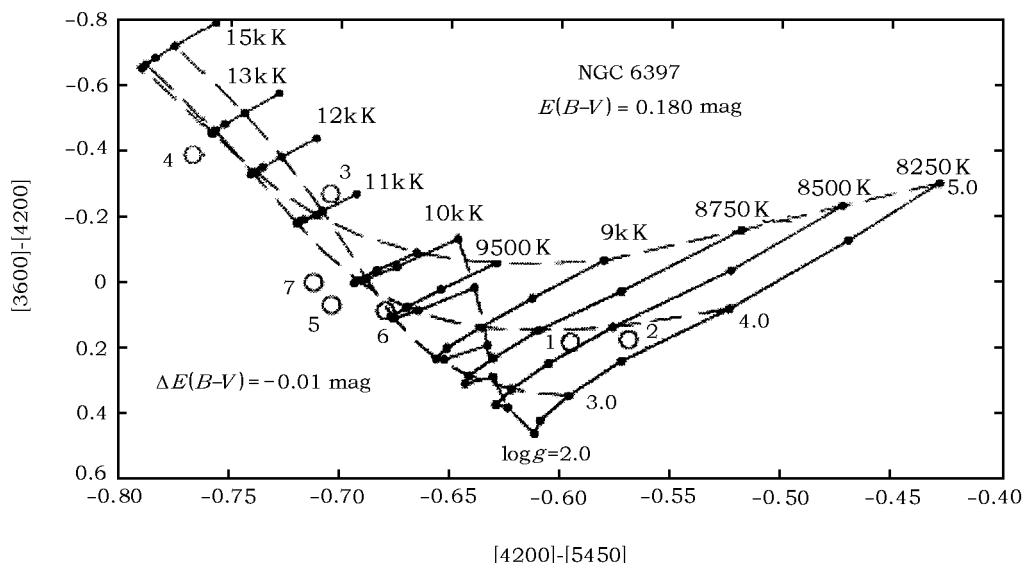


图 11 颜色 - 颜色图^[68]

比较球状星团 NGC 6397 中观测数据 (空心圆环) 与 Kurucz 理论模型 (实心圆点) 之间的区别,

实线表示有效温度相同的模型, 虚线表示表面重力相同的模型。

De Marco 等人^[68] 2004 年基于 HST 对球状星团 M 3、NGC 6752、NGC 6397 中 6 颗蓝离散星的分光光度测量, 利用 Balmer 跳变的反常强度预言了蓝离散星星周盘的存在。这 6 颗蓝离散星的光谱需要用非局部热动平衡 (non-LTE) 的恒星大气模型进行拟合。若用 Paschen 连续谱定出恒星有效温度, 则恒星的 Balmer 跳变相对于给定的有效温度显得过大, 且这种 Balmer 跳变的强度只能用“考虑了星周盘 Balmer 光子的额外吸收贡献”进行拟合。De Marco 等人^[68] 进一步预言蓝离散星星周盘的存在应该是一种普遍现象, 如图 11 的颜色 - 颜色图显示, 只有那些移出了网格覆盖区域的蓝离散星才会观测到带有星周盘。若星周盘对恒星颜色的贡献没有让恒星移出网格区域, 可以使用低有效温度 - 低表面重力的模型对这样的数据进

行交叉证认。因此,观测上寻找星周盘的方法可以通过低电离态 (low-ionization) 金属谱线的紫外光谱观测进行。

然而 Porter、Townsend^[69]2005 年利用高速旋转的蓝离散星的光谱来拟合观测得到的 Balmer 强度,发现这一强度完全可以用连续谱形成过程中的不同扁率 (oblateness) 及引力昏暗 (gravity darkening) 效应解释,并不需要星周盘的贡献。

有关蓝离散星星周盘存在与否,目前仍没有定论。在这一点上,观测证据更有说服力,因此需要更加关注观测方面的进展。

4.4 径向分布

大量的观测研究表明:绝大多数球状星团中的蓝离散星具有明显的向星团中心聚集的趋势^[70,71];星团中心的弛豫时间 (relaxation time) 要明显小于星团年龄,因此蓝离散星的这种中心聚集现象应是动力学质量分层效应作用的结果,这也说明蓝离散星的质量要大于大多数“普通”的星团成员星。

作为这一简单空间分布规律的一种变化,人们在综合 HST 对星团中心和地面设备对星团外围的观测数据时,发现蓝离散星在一些球状星团中沿径向的分布呈现明显的双峰 (bimodal) 结构。如 Ferraro 等人^[64,72]1993、1997 年对 M 3 的观测, Zaggia 等人^[73]1997 年对 M 55 的观测, Sabbi 等人^[74]2004 年对 NGC 6752 的观测, Ferraro 等人^[75]2004 年对 47 Tucana 的观测等,均发现蓝离散星相对频率 ($R_{BS} = (N_{BS}/N_{BS}^{tot})/(L^{sample}/L_{BS}^{sample})$) 在球状星团中心存在明显的峰值,在中等径向距离处迅速下降,但在更大径向距离处 (大于 20 倍核半径) 会再次上升,呈现第二个峰值 (图 12 所示即为一例)。

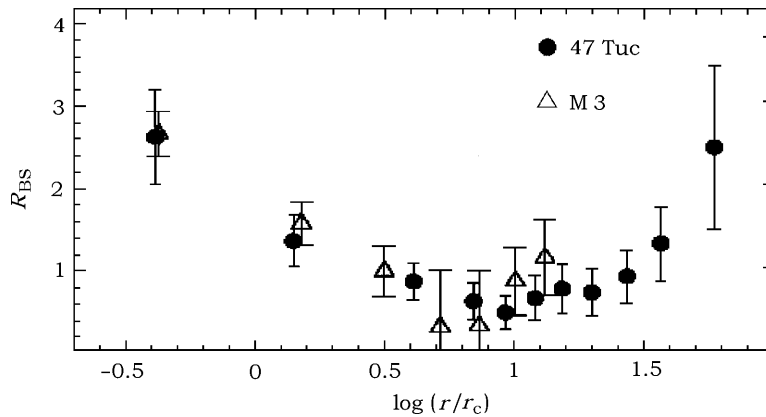


图 12 球状星团 47 Tuc(实心圆)和 M 3(空心三角)中蓝离散星相对频率 (R_{BS}) 沿星团径向的分布情况^[75]

对于双峰结构的存在,人们首先想到的是:这是否意味着星团中不同恒星密度的区域由不同机制 (外围区域的原初双星系统演化和内部区域的恒星碰撞^[72]) 主导蓝离散星的形成? Bailyn 和 Pinsonneault^[76]1995 年给出的蓝离散星理论光度函数也倾向于内外区域的不同形成机制。但是,若星团外围区域的蓝离散星来源于原初双星系统,它们 (蓝离散星) 应该早已沉降到星团中心,因为球状星团典型的弛豫时间要小于 1 Gyr^[77],这成为解释星团外围蓝离

散星形成机制的困难之一。

Sigurdsson 等人^[78] 1994 年提出了 M 3 中蓝离散星双峰分布的另一种解释：他们认为星团所有的蓝离散星都形成于星团中心，再由动力学相互作用产生的反弹力 (recoil) 发射到不同半径处。约几个核半径 (r_c) 区域内的蓝离散星由于质量分层效应会很快沉向星团中心，因此导致星团中心蓝离散星数目出现峰值。蓝离散星获得的反弹速度越大，会走得越远，也就需要越长的时间沉降，从而导致星团外围蓝离散星数目的另一个峰值。

Mapelli 等人^[79] 2004 年利用 King model 模拟 47 Tucana 中蓝离散星的动力学演化，发现只考虑核区的恒星并合无法满足观测到的蓝离散星的径向分布，仍需要外围双星系统的演化。最好的模拟结果为：47 Tucana 中观测到的蓝离散星有 25% 形成于外围区域 ($30\sim 60r_c$)，剩余 75% 形成于 $0.5 r_c$ 范围之内，受到反冲作用可扩散到约 1σ 的范围。

蓝离散星径向分布规律双峰结构的发现，无疑为研究球状星团中蓝离散星的形成机制开启了一个崭新的窗口。也许用不了多久，这种所谓的“特例”已经被证实为球状星团中蓝离散星分布的普遍情况。

5 矮星系中的蓝离散星

矮星系是宇宙大尺度结构的基本构造单元。矮球星系 (dwarf spheroidal galaxies) 是星系中最暗的成分^[80,81]，有些甚至与银河系中最亮的球状星团具有相近的光度，当然前者在尺度上要明显大于后者。本星系团中的矮星系都含有大样本的蓝离散星，其数量约为 $10^2 \sim 10^3$ 量级^[82,83]。Leonard^[84] 发现若假设初始双星比例为 50%，双星 - 双星系统的碰撞可以贡献这类系统中蓝离散星总数的 10%~20%。

Lee 等人^[8] 2003 年对矮球星系 Sextans 的 VI CCD 深度巡天发现了其中有约 230 颗蓝离散星，场星污染只有 3%。星系核区周围 $R = 100''$ 的范围内没有发现蓝离散星。Lee 等人^[8] 将 Sextans 中观测得到的蓝离散星样本按光度分成两组，研究它们的空间分布，结果发现亮蓝离散星 ($21.1 \text{ mag} < V < 22.3 \text{ mag}$) 比暗蓝离散星 ($22.3 \text{ mag} < V < 23.0 \text{ mag}$) 具有更高的中心聚度。图 13 显示了 Sextans 中蓝离散星的径向分布情况。横坐标为星系半径，纵坐标 $N(\text{BS})/N(\text{SGB})$ 表示蓝离散星数目和亚巨星数目的比值，星等范围 $21.1 \text{ mag} < V < 23.0 \text{ mag}$ 。可以发现蓝离散星完整样本 (实心圆点) 的 $N(\text{BS})/N(\text{SGB})$ 没有明显的径向变化趋势，蓝离散星的径向分布与亚巨星十分相似。这一结果表明 Sextans 中的蓝离散星成分与老年球状星团非常相似。另外，亮蓝离散星的 $N(\text{BS})/N(\text{SGB})$ 沿径向分布情况与暗蓝离散星有很大差别，亮蓝离散星的 $N(\text{BS})/N(\text{SGB})$ 随星系半径增加呈明显下降趋势 (高中心聚度)，在 $R > 1000''$ 的区域其 $N(\text{BS})/N(\text{SGB})$ 很可能变为常数。Lee 等人^[8] 还给出了 Sextans 星系中不同区域、不同星等范围蓝离散星的光度函数，结果发现内部区域 ($R < 11'$, $21.3 \text{ mag} < V < 22.9 \text{ mag}$) 的光度函数与外部区域 ($R > 11'$, $21.7 \text{ mag} < V < 22.9 \text{ mag}$) 有很大差别：内部区域的蓝离散星要比外部区域亮零点几星等，内部区域蓝离散星光度函数轮廓的斜率 (0.71 ± 0.11) 要小于外部区域的斜率 (1.05 ± 0.20)。

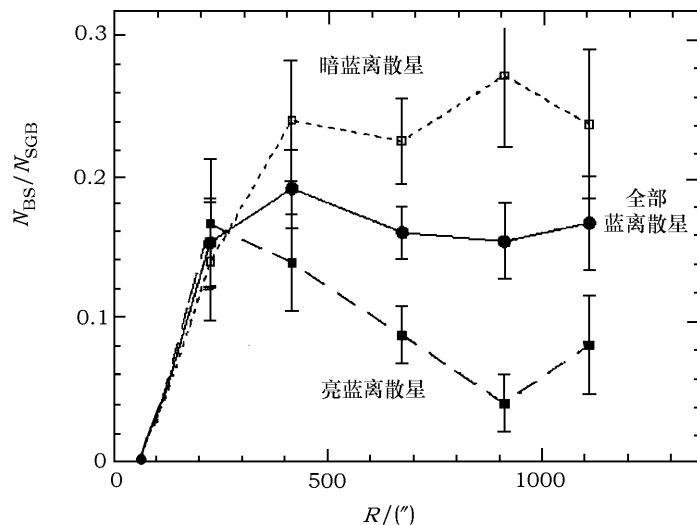


图 13 矮星系 Sextans 中蓝离散星的径向分布情况^[8]

横坐标为星系半径，纵坐标为蓝离散星数目和亚巨星数目的比值，星等范围 $21.1 \text{ mag} < V < 23.0 \text{ mag}$ 。

Lee 等人^[8] 在分析 Sextans 星系中蓝离散星的形成机制时指出：Sextans 中蓝离散星的光度函数与银河系球状星团蓝离散星光度函数的亮星部分具有一定的相似性；但 Sextans 中心区域的光度密度 ($0.002 L_{\odot}/\text{pc}^3$ ^[80]) 远低于球状星团中心区域 (M 3 的中心区域光度密度为 $3200 L_{\odot}/\text{pc}^3$ ^[85])，中心的恒星碰撞概率和系统的动力学演化也要远低于球状星团。因此，Sextans 蓝离散星的质量分层效应似乎不应该是星系中心动力学演化的结果。另外，银河系球状星团中蓝离散星相对频率沿星团径向的变化可以一直延伸到几倍星团核区半径 ($r_c = 25''$ ，参见 Ferraro 等人 1997 年文章^[72] 中的图 8)，这一变化趋势在 Sextans 中一倍核半径 ($r_c = 16'.6$) 处截止。Sextans 较大的核区半径及大样本的蓝离散星为我们研究核区蓝离散星的径向分布情况提供了便利，其情况要优于球状星团。

Carrera 等人^[86] 2002 年给出的矮星系 Ursa Minor 的测光分析中，利用核心附近 $18'$ 区域的观测数据得出蓝离散星和水平分支恒星数目的比值 $F_{\text{BS}}^{\text{HB}} = 1.8$ ，介于 Piotto 等人^[56] 2002 年给出的球状星团 $0.1 \leq F_{\text{BS}}^{\text{HB}} \leq 1.0$ 和 Preston 和 Sneden^[12] 2000 年给出的银河系晕 $F_{\text{BS}}^{\text{HB}} = 4.4$ 两者之间，可以作为探讨矮星系中蓝离散星形成机制的参考。

Monkiewicz 等人^[87] 1999 年对矮星系 Sculptor 的 HST-WFPC2 观测数据的研究也发现了大量蓝离散星的存在，但统计上很难给出具体数目。作者认为星团核心区域在 CMD 上 $V = 22 \text{ mag}$ 附近区域的蓝离散星应该来源于双星合并，而并非近期恒星形成的产物。

矮星系中蓝离散星的研究工作，还需要更细致的模型帮助我们更好地理解观测数据，同时分析蓝离散星的可能形成途径。

6 总结和展望

作为蓝离散星研究现状综述的第二部分，本文描述的重点为蓝离散星的观测特性，包括

空间分布、双星比例、金属丰度、视向速度、自转等。不同恒星系统 (银河系晕、疏散星团、球状星团、矮星系) 中的蓝离散星所表现出的具体观测特性与系统的动力学环境及相应的蓝离散星主导形成机制直接相关, 因此, 分析不同系统中蓝离散星的观测特性, 也是研究蓝离散星形成机制、恒星及双星系统演化、以及恒星系统动力学环境和星族环境的有效方法之一。

银河系晕里的蓝离散星多表现为长轨道周期、小轨道偏心率的贫金属单谱双星, 伴星是一颗白矮星。这种环境下的蓝离散星多形成于 RGB 阶段的密近双星系统质量传输。疏散星团和球状星团中蓝离散星的观测特性表现得比较弥散。疏散星团中有大量的蓝离散星仍处于双星系统, 具有不同的轨道周期、不同的轨道偏心率、不同的自转速度等。因此, 疏散星团中的蓝离散星应来源于多种不同机制, 包括密近双星系统的质量传输 (A、B、C 三类), 也包括双星-双星系统的碰撞并合。对年轻及中等年龄的疏散星团, 蓝离散星数目对星团年龄和成员星数目都不十分敏感 (图 2); 但是对老年系统, 蓝离散星数目随星团年龄和成员星数目增加呈陡峭的上升趋势。球状星团中的蓝离散星普遍具有很高的中心聚度, 但是综合 HST 对星团中心、地面设备对星团外围的观测数据, 蓝离散星沿球状星团径向的分布呈双峰结构 (图 12): 星团中心存在明显的峰值, 在中等径向距离处迅速下降, 但在更大径向距离处 ($> 20r_c$) 再次上升, 呈现第二个峰值。

蓝离散星在各类恒星系统中的普遍存在说明它们是恒星及恒星系统演化的某种必然产物。单星演化理论无法预言它们在星团 CMD 上的位置, 演化星族合成方法没有包含它们的贡献, 初始质量函数和质光关系说明它们对星族积分特性影响巨大……所有这些都表明, 关于蓝离散星, 我们需要和可以研究的还很多。基于本文所描述的蓝离散星分布函数 (图 2), 蓝离散星与星团总质量的关系 (图 8) 以及蓝离散星的光度函数 (图 10), 原则上我们可以粗略估计任何星族中蓝离散星的数目及星等分布, 分析蓝离散星的可能影响。

参考文献:

- [1] 新宇, 星团蓝离散星及星团积分光谱性质的研究, 2005, 博士学位论文, 北京: 中国科学院国家天文台
- [2] Stryker L L. *PASP*, 1993, 105: 1081
- [3] Sandage A R. *AJ*, 1953, 58: 61
- [4] Dieball A, Knigge C, Zurek D R *et al.* *ApJ*, 2005, 625: 156
- [5] Carney B W, Latham D W, Laird J B. *AJ*, 2005, 129: 466
- [6] Piotto G, De Angeli F, King I R *et al.* *ApJ*, 2004, 604: L109
- [7] Fan X, Burstein D, Chen J S *et al.* *AJ*, 1996, 112: 628
- [8] Lee M G, Park H S, Park J H *et al.* *AJ*, 2003, 126: 2840
- [9] Carney B W, Latham D W, Laird J B *et al.* *AJ*, 1994, 107: 2240
- [10] Bond H E, MacConnell D J. *ApJ*, 1971, 165: 51
- [11] Carney B W, Peterson R C. *ApJ*, 1981, 251: 190
- [12] Preston G W, Sneden C. *AJ*, 2000, 120: 1014
- [13] McCrea W H. *MNRAS*, 1964, 128: 147
- [14] Carney B W, Latham D W, Laird J B *et al.* *AJ*, 2001, 122: 3419
- [15] Duquennoy A, Mayor M. *A&A*, 1991, 248: 485
- [16] Latham D W, Stefanik R P, Torres G *et al.* *AJ*, 2002, 124: 1144
- [17] Webbink R F. *Highlights of Astronomy*, 1986, 7: 185
- [18] Sneden C, Preston G W, Cowan J J. *ApJ*, 2003, 592: 504

-
- [19] Ryan S G, Gregory S G, Kolb U *et al.* ApJ, 2002, 571: 501
- [20] Barrado y Navascues D, Stauffer J R. A&A, 1996, 310: 879
- [21] Thorburn J A. ApJ, 1994, 421: 318
- [22] Pilachowski C A, Sneden C, Booth J. ApJ, 1993, 407: 699
- [23] Spite F, Spite M. A&A, 1982, 115: 357
- [24] Ryan S G, Beers T C, Kajino T *et al.* ApJ, 2001, 547: 231
- [25] Hobbs L M, Mathieu R D. PASP, 1991, 103: 431
- [26] Glaspey J W, Pritchett C J, Stetson P B. AJ, 1994, 108: 271
- [27] Boesgaard A M, Budge K G. ApJ, 1988, 332: 410
- [28] Luck R E, Bond H E. ApJS, 1991, 77: 515
- [29] Abt H A. ApJ, 1985, 294: L103
- [30] Mathys G. A&A, 1991, 245: 467
- [31] Ahumada J, Lapasset E. A&AS, 1995, 109: 375
- [32] Deng L, Chen R, Liu X S *et al.* ApJ, 1999, 524: 824
- [33] Xin Y, Deng L. ApJ, 2005, 619: 824
- [34] Leonard P J T, Fahlman G G. AJ, 1991, 102: 994
- [35] González J F, Lapasset E. AJ, 2000, 119: 2296
- [36] González J F, Lapasset E. AJ, 2001, 121: 2657
- [37] González J F, Lapasset E. AJ, 2002, 123: 3318
- [38] González J F, Lapasset E. A&A, 2003, 404: 365
- [39] Dachs J, Kabus H. A&AS, 1989, 78: 25
- [40] Meynet G, Mermilliod J C, Maeder A. A&AS, 1993, 98: 477
- [41] Milone A A E, Latham D W, Kurucz R L *et al.* ASPC, 1991, 13: 424
- [42] Milone A A E, Latham D W. IAUS, 1992, 151: 475
- [43] Milone A A E, Latham D W. AJ, 1994, 108: 1828
- [44] Latham D W, Milone A A E. ASPC, 1996, 90: 385
- [45] Chen X F, Han Z W. MNRAS, 2004, 355: 1182
- [46] Leonard P J T, Linnell A P. AJ, 1992, 103: 1928
- [47] Leonard P J T. ApJ, 1996, 470: 521
- [48] Garcia Lopez R J, Rebolo R, Beckman J E. PASP, 1988, 100: 1489
- [49] Lester J B, Lane M C. ApJS, 1987, 65, 137
- [50] Shetrone M D, Sandquist E L. AJ, 2000, 120: 1913
- [51] Pritchett C J, Glaspey J W. ApJ, 1991, 373: 105
- [52] Pritchett C J, Glaspey J W, Stetson P B. ASPC, 1993, 53: 179
- [53] Gunn J E, Stryker L L, Tinsley B M. ApJ, 1981, 249: 48
- [54] Girard T M, Grundy W M, Lopez C E *et al.* AJ, 1989, 98: 227
- [55] Schiavon R P, Caldwell N, Rose J A. AJ, 2004, 127: 1513
- [56] Piotto G, King I R, Djorgovski S G *et al.* A&A, 2002, 391: 945
- [57] Davies M B, Piotto G, de Angeli F. MNRAS, 2004, 349: 129
- [58] Hut P, McMillan S, Goodman J *et al.* PASP, 1992, 104: 981
- [59] Meylan G, Heggie D C. A&ARv, 1997, 8: 1
- [60] Latham D W. ASPC, 1996, 90: 31
- [61] Mateo M. ASPC, 1996, 90: 21
- [62] Rubenstein E P, Bailyn C D. ApJ, 1997, 474: 701
- [63] Bellazzini M, Fusi Pecci F, Messineo M *et al.* AJ, 2002, 123: 1509
- [64] Ferraro F R, Fusi Pecci F, Cacciari C *et al.* AJ, 1993, 106: 2324
- [65] Sills A, Adams T, Davies M B *et al.* MNRAS, 2002, 332: 49
- [66] Sills A, Lombardi J C Jr, Rasio F A *et al.* ApJ, 2001, 548: 323

- [67] Sills A, Adams T, Davies M B. MNRAS, 2005, 358: 716
- [68] De Marco O, Lanz T, Ouellette J A *et al.* ApJ, 2004, 606: 151
- [69] Porter J M, Townsend R H D. ApJ, 2005, 623: L129
- [70] Fusi Pecci F, Ferraro F R, Corsi C E *et al.* AJ, 1992, 104: 1831
- [71] Baily C D. ARA&A, 1995, 33: 133
- [72] Ferraro F R, Paltrinieri B, Fusi Pecci F *et al.* A&A, 1997, 324: 915
- [73] Zaggia S R, Piotto G, Capaccioli M. A&A, 1997, 327: 1004
- [74] Sabbi E, Ferraro F R, Sills A *et al.* ApJ, 2004, 617: 1296
- [75] Ferraro F R, Beccari G, Rood R T *et al.* ApJ, 2004, 603: 127
- [76] Baily C D, Pinsonneault M H. ApJ, 1995, 439: 705
- [77] Djorgovski S, Piotto G, Capaccioli M. AJ, 1993, 105: 2148
- [78] Sigurdsson S, Davies M B, Bolte M. ApJ, 1994, 431: L115
- [79] Mapelli M, Sigurdsson S, Colpi M *et al.* ApJ, 2004, 605: L29
- [80] Mateo M. ARA&A, 1998, 36: 435
- [81] Grebel E K, Gallagher J S, Harbeck D. AJ, 2003, 125: 1926
- [82] Carney B W, Seitzer P. AJ, 1986, 92: 23
- [83] Mateo M, Nemeč J, Irwin M *et al.* AJ, 1991, 101: 892
- [84] Leonard P J T. ASPC, 1993, 53: 186
- [85] Harris W E. AJ, 1996, 112: 1487
- [86] Carrera R, Aparicio A, Martínez-Delgado D *et al.* AJ, 2002, 123: 3199
- [87] Monkiewicz J, Mould J R, Gallagher J S *et al.* PASP, 1999, 111: 1392

The Status of Blue Straggler Studies(II): Observational Properties

XIN Yu, DENG Li-cai, LIANG Yan-chun

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The observational features of blue stragglers (BSs) show great differences among the different stellar systems, such as Galactic halo, open clusters, globular clusters, and dwarf galaxies. These differences reveal the distinctive formation of BSs and the physical conditions of the systems and their stellar populations. Therefore, studying the observational properties of BSs could be an effective method for studying the formation mechanisms of BSs, the evolution of single stars and binary systems, and the dynamical evolution of stellar systems.

Key words: astrophysics; blue stragglers; review; close binary system; observational property