

疏散星团的近期研究进展(I): 基本性质与恒星演化

石火明 赵君亮
(中国科学院上海天文台)

提 要

疏散星团在天文学和天体物理学研究中有着多方面的重要性。近期有关疏散星团的观测工作和理论研究都取得了较显著的进展。本文试就疏散星团的若干基本性质和涉及团与团内恒星演化的几个重要问题的近期研究进展作一简要的介绍和评述。

一、疏散星团的基本性质

近些年来,随着天文观测手段的改进和精度的提高,对疏散星团的基本性质和参数进行了大量、细致的观测和讨论,为进一步的研究工作积累了更多、更好的基本数据和资料。疏散星团的观测工作包括测光、自行和视向速度的测定,以及分光、偏振和射电观测等。其中测光工作做得最多,并涉及多种测光系统,如UBV、红外、DDO以及uvbyH_δ测光等。CCD探测器非常适合于密集星场的星团测光,特别是其中的暗成员星,而暗星测光对于星团研究是至为重要的。另一方面,计算技术的发展及数据归算方法的改进,也为研究工作提供了较好的条件。因而,近些年来在疏散星团各种基本性质和参数的观测与研究上取得了较明显的进展。如星团成员的准确判定,星团年龄测定方法的改进,以及星团HR图、光度函数和质量函数等的细致研究。

1. 成员判别

确定星团成员是疏散星团全部研究工作的基础。从总体上来说,团星应具有区别于场星的近乎相同或有规律的物理学和运动学特征,这是判别星团成员的基本出发点。判定星团成员最常用的判据有两类,即恒星的多色测光资料和运动学数据(自行与视向速度)。

成员判别的测光方法是根据恒星在HR图(或两色图)上的位置来区分团星和场星^[1]。Baade^[2]通过对HR图上恒星分布进行统计改正进一步改进了这一方法。但是不同研究者对于用测光资料判别星团成员的看法很不一致。Vasilevskis^[3]和Sanders^[4]对此持否定态度,Mathieu^[5]则认为可用作成员确定的补充判据。考虑到测光方法易受双星存在的干扰,同时亦难对各别恒星给出定量的成员判别结果,该方法的可靠性是有限的。

利用恒星的自行和视向速度来判别星团成员要比测光方法可靠得多。因为对于恒星自行或视向速度的分布可以建立较严格的数学模型, 并且比较容易计算模型参数和各别恒星的成员概率。Vasilevskis 等^[6]和 Sanders^[4]的经典性工作为由恒星自行判别星团成员的方法奠定了较严格的数学基础, 称为 Vasilevskis-Sanders(VS)方法。其后, 一些研究者对该方法在实际应用中所存在的问题进行了讨论, 并提出了相应的改进途径。如赵君亮等^[7,8]按改进后的方法对 42 个疏散星团系统地进行了自行成员的判定, 并编制了星团成员表^[9]。

近年来对 VS 方法作出的较大改进表现在两个方面。一方面, 考虑到恒星自行的实际观测精度不会相等, 而 VS 方法当自行精度不等时理论上是不严格的, 赵君亮等^[10]和 Girard 等^[11]分别提出了当恒星自行精度不等时判定星团成员的改进方法, 理论上更加严格, 实际效果也是理想的。另一方面, 由于以下两个原因, 直接按 VS 方法计算自行成员概率其结果与实际情形是不严格符合的: 第一, VS 模型参数一般应是星等的函数, 直接按该模型所确定的参数则是对平均星等而言的。通常, 同一星场内团星数与场星数之比随星等的变暗而减小, 因而 VS 方法所得的暗星成员概率将偏大而亮星成员概率将偏小; 第二, 由于团星向中心聚集, 团星数密度随着远离中心而迅速下降, 按 VS 方法算得的成员概率, 对于中心附近恒星结果将偏小, 而对星团边缘处恒星结果将偏大。基于以上考虑, Jones 等^[12]和 Francic^[13]提出了一种更一般的自行分布模型: 在 VS 模型中增加了以负指数形式表示的反映团星数密度分布变化的因子, 同时将模型中参数表示为星等的函数(一般取线性形式)。由此计算出的自行成员概率理论上更为合理。我们认为, 尽可能考虑到各种因素的影响从理论角度看是更为严格了, 但同时给数学模型增加了更多的待定参数。在样本星数不大的时候, 从平差角度看这样做对最后结果可能反而不利。只有对星数较多、星等范围较广的星团, 采用较全面的自行分布模型来求成员概率才是合适的。

利用恒星视向速度判别星团成员的基本原理与 VS 方法一样, 只是这里为一维情形。考虑到视向速度的测定精度很高, 这对确定星团成员十分有利。不过与自行相比, 视向速度只利用了恒星运动的一维分量, 同时易受双星成员轨道运动的影响。加之疏散星团恒星视向速度资料甚少, 这一判据的应用便受到了限制。Griffin 等^[14]测定过毕星团天区 400 多颗恒星的视向速度并进行了成员判定, 其中大约半数恒星被确证为毕星团成员。Girard 等^[11]对疏散星团 M67 同时进行了自行成员与视向速度成员判定, 两种结果普遍地非常吻合。

除了上述工作外, 偏振观测资料作为确定星团成员的判据近年来亦开始应用^[15,16]。赵君亮等^[16]为偏振资料的应用建立了与 VS 模型类似的数学模型, 对疏散星团 NGC 7789 天区恒星进行了成员研究, 发现偏振成员结果与高精度自行成员结果符合得比较好。

值得提及的是, Cabrera-Canó 和 Alfaro^[17]最近就星团成员研究提出了一种全新的处理方法。他们指出, 在大多数情况下 VS 模型与实际情形可能不符(特别是对于场星), 为此他们采取了非参数模型的处理方法。这种方法只需认定存在有团星与场星两类不同特性的恒星, 而不需要对所涉及的分布参数的物理特性或统计特性作任何可能过于严格的假定, 同时还允许使用多种观测资料: 自行、视向速度、位置及多色星等等。非参数方法的不利之处是工作量较大。Cabrera-Canó 和 Alfaro^[17]利用 NGC 2420 天区 282 颗恒星的自行及位置的观测数据进行了成员研究, 由所确认的星团成员得到了非常清晰的 HR 图。

鉴于成员判别对于星团研究工作的重要性,采用尽可能合理的成员判别方法是十分必要的,另一方面,提高自行观测精度与增加视向速度观测资料仍是问题的关键。当然,在可能的条件下同时利用多种判据进行成员研究无疑是很有价值的。

2. 年龄测定

近些年来,测光技术的发展与精度的提高使得获取高质量的星团 HR 图成为可能。星团 HR 图对于疏散星团的研究至为重要,尤其是作为星团年龄的测定工具。利用 HR 图测定疏散星团的年龄,迄今已建立了多种不同的方法。

(1) 标龄参数法 该方法利用若干成员星在观测 HR 图上的特殊位置,并通过建立其与年龄之间的对应关系来估计星团年龄。这种方法的应用最为方便。不同研究者所用的标龄参数不尽相同。Sandage^[18,19]首次采用主序折向点作为标龄参数,Janes 和 Adler^[20]表列了 434 个疏散星团主序折向点的 $(B-V)_0$ 值,并用以估计星团的年龄。Harris^[21]提出 HR 图中最蓝的两颗星的平均色指数和平均光谱型作为星团的标龄参数。Mermilliod^[22]和 Flower^[23]建立了主序上最蓝点的色指数、红巨星支团块(red giant clump)的平均绝对星等与年龄间的对应关系,并用于星团年龄估计。Anthony-Twarog 和 Twarog^[24]则根据 HR 图中红巨星支与主序折向点的相对位置,提出了一个所谓“形态年龄比”MAR (Morphological Age Ratio)来估计星团年龄。对于老年和中等年龄的星团,由参数 MAR 确定的年龄基本上不受星团红化的影响,并且只与团的金属丰度有很弱的相关性^[24,25]。上述各种方法虽然应用上简单方便,但求得的年龄通常只能看作是近似的,并且一般地讲,尽管这些方法都利用了星团 HR 图的上端部分,但对同一星团由不同方法求得的年龄之间的差别可能很大^[26,27]。

(2) 复合 HR 图法 通过按不同年龄组所得到的疏散星团的复合 HR 图与星团的观测 HR 图比较,可以确定团的年龄^[22,23,28]。Mermilliod^[22]曾将比毕星团年轻的 75 个疏散星团划分为 14 个不同年龄组,得到了相应的复合 HR 图,并作为标准用于年轻疏散星团年龄的确定和研究^[22,29]。复合 HR 图法的主要缺陷是没有考虑到各别星团的特殊性。在进行 HR 图重迭时,只考虑了不同星团在年龄上的差异,而未顾及到其他因素对 HR 图的影响^[30]。目前这一方法已不常应用了。

(3) 等龄线法 通过星团的观测 HR 图与由恒星理论演化模型得到的等龄线的比较来确定疏散星团的年龄是一种更为准确的方法。目前等龄线法已成为确定星团年龄的标准方法而得到广泛的应用。这里,首先必须有精确的测光资料和可靠的成员判别,并考虑星团区域可能存在的较差消光的影响。此外还有其他一些因素会影响到年龄的准确测定。例如不可分辨双星的存在、化学组成的变化、恒星自转和内部磁场对恒星实际演化的影响等,都可能在一定程度上影响到观测 HR 图的表现形态,并最终影响到所确定的年龄。Piskunov^[31]对上述因素作了讨论,并指出不同星团化学组成上的差别是年龄估计的主要误差来源($\Delta t/t = 6\% - 60\%$)。另一方面,等龄线法所确定的年龄还依赖于建立理论等龄线时所采用的恒星演化模型。耶鲁等龄线^[32]是早期广泛采用的理论等龄线。其后,随着恒星演化模型的不断改进,理论等龄线也不断地得到更新。如 Vanden Berg 计算的等龄线^[33,34]。特别是考虑恒星核区对流过冲的恒星演化模型所推出的理论等龄线近年来被广泛采用^[35-37]。Bonifazi 等^[38]指出,是否考虑恒星核区对流过冲的影响,对等龄线法确定的年龄影响甚大。

(4) 演化迹线法 这一方法是利用恒星的理论演化迹线而不是等龄线来与观测 HR 图进行比较, 并进而确定星团年龄。该方法是由 Palouš 等^[39]提出的, 它利用理论恒星演化迹线通过 Muzyliev^[40]的内插方法可估计出每一星团成员的年龄和质量, 然后由所有成员的年龄分布函数求得星团的平均年龄及其误差。这一方法的基础是认为不同质量恒星在同一演化阶段其演化迹线具有几何上的相似性。Sagar^[27]指出, 如其他条件相同, 只要适当地选取样本恒星, 则演化迹线法较之等龄线法给出的星团年龄要更为可靠一些。不过由于应用上较不方便, 这一方法尚未广泛用于确定疏散星团的年龄。

近年来在疏散星团年龄确定上最引人注目的是关于老年星团 NGC 188 年龄的重新测定^[41-43]。多年来 NGC 188 一直被认为是银河系中最年老的疏散星团(年龄估计在 10^{10} yr 左右), 但是观测到很高的 Li 丰度对于如此老的星团又似乎是反常的^[44]。近年来很多研究者根据最新测定的红化、距离模数及金属丰度重新估计了 NGC 188 的年龄^[41-43], 结果表明年龄应在 6.5×10^9 yr 左右。考虑到这一年年龄大约只有银晕年龄的一半, 因而 NGC 188 具有较高的 Li 丰度就属正常了。

3. 光度函数、质量函数及累积测光参数

疏散星团的光度函数(LF)和质量函数(MF)的测定对于星团的研究是非常重要的。对团星与场星的 LF 和 MF 进行比较研究, 有助于对星团自身形成及演化性质的了解。星团内不同区域的局部 LF 和 MF 则提供了有关星团内部结构和动力学演化的重要信息, 例如星团的质量分层现象。因此, 这方面的研究工作是做得很多的^[13, 18, 45-51]。

在如何测定星团的 LF 和 MF 方面, Francic^[13]提出的方法避免了以往绝大多数工作所存在的片面性。他指出, 通常的恒星计数并没有包含全部团星, 主要是忽略了离团中心较远的未观测到的暗星。因此, 他在利用自行成员概率建立星团 LF 和 MF 时, 通过所求得的团星数密度分布对星团外围可能存在的团星作了改正, 从而使星团的恒星计数更趋完全, 由此确定的星团 LF 和 MF 更符合实际。

对于不同的恒星系统(如星团)及场星, 是否存在着一个普适的初始质量函数(IMF)关系到大范围内恒星形成的条件问题。很多研究者结合疏散星团对此作了仔细研究。IMF 一般表为幂函数形式

$$\xi = CM^\eta \quad (1)$$

其中指数 $\eta = d(\lg \xi)/d(\lg M)$ 也称为 IMF 的斜率。对于不同疏散星团是否存在某种普适的 IMF, 不同研究者所得结论并不一致。Burki^[48]确定了一组非常年轻的疏散星团的 MF, 发现 η 随星团范围的大小而变化; 线直径较小的星团具有较大的 η 值。Stecklum^[49]导出了 228 个疏散星团的 MF, 发现斜率 η 随着星团年龄及星团银心距的增大而变大。Francic^[13]对 8 个近距疏散星团 MF 的仔细分析也表明 η 与团的年龄有关, 但他指出这可能是老年星团中恒星逃逸影响的结果。Scalo^[50]认为, 虽然不能排除对于不同的星团 η 可以存在较大的变化, 但没有明显证据否定 IMF 的普适性。

很多研究者还对疏散星团和场星的 IMF 作了比较研究。关于场星 IMF 的经典工作是 Salpeter^[52]的研究, 他所得的场星 IMF 被称为 Salpeter 函数。Taff^[47]确定了 62 个疏散星团的复合 LF, 并转换出 MF, 他发现斜率 η 要比 Salpeter 函数中的值偏大。而 Francic^[13]

将 8 个近距疏散星团的复合 MF 与 Scalo^[50]得到的场星 IMF 进行的比较表明,对于所涉及的质量范围,在误差范围内两者完全一致。根据以上各不同研究者的研究,关于 IMF 的普适性问题迄今仍未有定论,理论和观测上的进一步研究是必要的。

疏散星团的累积测光参数(累积星等与累积色指数)是反映星团整体性质及其演化的重要物理参数。对于不能充分探测成员星的遥远疏散星团,特别是河外星云(如 LMC)中的星团,测定并研究其累积测光参数尤显重要。有关星团的累积星等与累积色指数之间、累积测光参数与星团年龄之间关系的研究,有助于对星团恒星演化过程的认识。许多人作过这方面的研究^[53-58]。他们由观测建立了大量疏散星团的累积测光参数之间以及累积参数与星团年龄之间的统计关系,并与恒星理论演化模型导出的相应结果进行了比较研究,其中 Pandey 等^[58]的研究是这方面的代表性工作。

二、疏散星团与恒星演化

疏散星团由于其成员星具有类似的特性,从而为恒星演化理论的观测检验提供了理想的场所。在疏散星团 HR 图上所发现的蓝离散星、主序空缺以及双重主序等现象,都涉及到恒星的演化,并对现有的演化理论提出了挑战。另一方面,利用恒星演化理论的最新成果来研究疏散星团中的演化问题,有助于对星团自身性质的更深入的了解。

1. 恒星演化模型的检验

近些年来,通过观测事实与理论恒星演化模型之间的比较研究,对恒星和恒星系统演化的认识取得了长足的进步。其中疏散星团的有关数据(HR 图与光度函数等)在这类研究中得到了广泛应用。

有关理论恒星演化模型及相应的恒星演化迹线和等龄线的工作,近年来经历了引人注目的改进^[33-37,59,60],包括采用新的恒星物理学数据,例如不透明度、核反应速率、大气模型和理论热改正,并考虑恒星风导致的质量损失,特别是关于恒星内部对流理论的进展。现在已逐渐认识到恒星核区对流过冲效应对于恒星的演化进程具有非常大的影响^[35-37,60],考虑对流过冲的演化模型得出的恒星演化迹线和等龄线,与由经典演化模型得到的结果有很大的不同,Chiosi 和 Bertelli 等^[36,37]的工作代表了这方面的最新成就。

把理论恒星演化迹线和等龄线,与疏散星团的观测 HR 图和光度函数等进行比较,可以推断出对流过冲效应到底是否在恒星演化过程中发挥重要作用。许多研究表明,考虑对流过冲的恒星演化模型能够更好地再现出观测 HR 图中的某些特性。Maeder 和 Mermilliod^[61]对落在昴星团和毕星团年龄范围内的 34 个疏散星团的 HR 图进行了分析,研究表明,对应恒星核区氢燃烧阶段,观测结果要比经典演化模型预期的范围延伸 0.6—0.8 mag,无论怎样改变氮丰度或金属丰度,都不能由经典模型对此加以解释。而这一点正是考虑了更大范围的恒星内部混合区的对流过冲演化模型所预期的结果。

中等年龄的疏散星团是检验对流过冲演化模型的极佳对象。Barbaro 和 Pigatto^[62,63]通过统计分析,发现中等年龄($1-1.5 \times 10^9$ yr)疏散星团的红巨星分布不具有经典模型预期的延伸结构,而具有团块结构,类似于更年轻疏散星团中的情况。这表明这些主序后星具有非同

并核,因而未曾经历氦闪。根据对流过冲演化模型能够对此作出很好的解释,由此把恒星具有非简并核并发生温和氦点火的下限质量由经典的 $2.25M_{\odot}$ 左右降至 $1.6M_{\odot}$ 左右。Mermilliod 和 Mayor^[64]对 5 个疏散星团中的红巨星所进行的专门研究,也揭示出它们的分布具有对流过冲演化模型所预期的团块结构,而不是经典模型所预期的长形的延伸结构。Mazzei 和 Pigatto^[65]对 8 个中等年龄疏散星团的观测结果,进一步确证了红巨星支的分布形态与对流过冲演化模型的结果一致。同时还发现,较之经典模型,由新演化模型所得到的等龄线与观测 HR 图的整体形状符合得更好。

但是,在研究年龄范围为几十亿年或主序折向点处质量范围为 $1.5-1.1M_{\odot}$ 的老年疏散星团时,现有的对流过冲演化模型却遇到了困难。Aparicio 等^[66]对老年星团 King2(年龄约 6×10^9 yr)的工作即是一例。Bertelli 等^[37]也从理论上指出现存的处理对流过冲的方法不能完全适用于该质量范围的恒星,并已着手建立相应的新模型。

2. 蓝离散星

蓝离散星是指在恒星系统 HR 图上位于主序延伸线附近、光度比主序折向点更亮(可达 $2.5-3$ mag)的一些恒星(图 1 显示了疏散星团 M67 中的蓝离散星)。这类恒星首先由 Sandage^[67]在球状星团 M3 中发现。嗣后,在其他恒星系统特别是许多疏散星团中都发现了不少蓝离散星,成为一种较为普遍的现象^[68,69]。说明蓝离散星的形成机制问题一直困扰着恒星物理学家,在过去的近四十年中人们陆续提出了许多种假设以解释蓝离散星的本质,如后期诞生说^[70,71]、双星说^[69,72-74]、重返主序说^[74]、及混合说^[75-77]等,但迄今未达成共识。鉴于这方面的内容甚为丰富和篇幅的限制,我们将另文予以评述。

3. 主序空缺

在星团 HR 图上经常可以发现某些区域会出现恒星分布的空缺现象,其解释通常与对某种恒星演化模型的肯定或否定相联系。其中年龄较老的疏散星团 HR 图主序折向点附近出现的恒星分布空缺现象,一直是各种恒星演化模型的难解之谜。这种主序空缺最早是在 M67 中发现的^[78];在主序折向点附近存在一个主要表现为星等分布上而不是颜色分布上的垂直向空缺,并且该空缺的上缘也明显高于理论所预期的高度。图 1 中标出了 M67 中主序空缺(引自参考文献 [79])。嗣后,在其他疏散星团中也发现了主序空缺,并就这种空缺现象提出了多种不同的解释^[38,60,65,80-85],概括起来主要有以下 6 种:(1)主序空缺只不过是星团恒星统计上的随机性波动而不包含任何天体物理信息;(2)主序空缺对应着恒星演化处于核心区氢耗尽阶段,其时恒星内部结构发生急剧变化;(3)主序空缺(甚至主序上端各种特性)与双星存在有关;

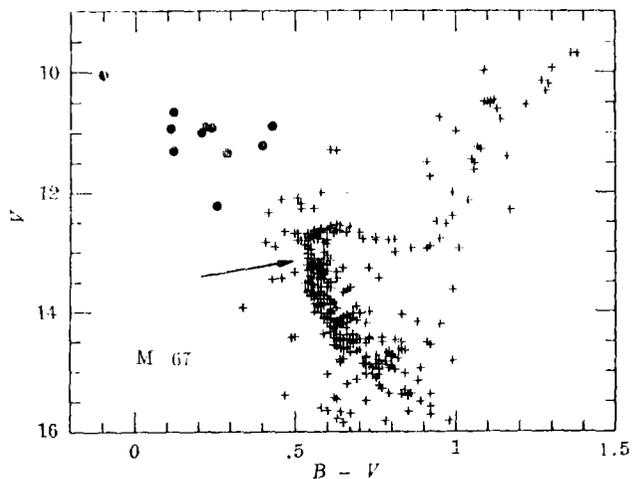


图 1 M67 中蓝离散星(圆点所示)和主序空缺(箭头所指区域)

(4) 星团中两次或更多次的恒星爆发式形成事件会大大改变主序星分布的表观形态; (5) 主序空缺可归因于恒星核区中化学非均匀性, 这种非均匀性可能是由恒星形成过程中尘埃沉积所引起的; (6) 主序空缺对应着 IMF 存在恒星分布的空区。

近年来对主序空缺的研究在不断深入。Mazzei 和 Pigatto^[69] 按照对流过冲演化模型计算了等龄线和理论 HR 图, 发现理论上并不预期这种主序空缺, 从而认为这种现象完全是由于恒星数目有限导致的统计随机波动, 并举出富团 NGC 7789 未表现主序空缺作为证据。他们同时也指出了双星存在的可能影响。Bonifazi 等^[80] 所作的类似研究的结果则有所不同。他们根据多种演化模型, 并计及双星存在和两次恒星爆发式形成事件的影响, 计算了理论 HR 图, 表明主序空缺的出现是普遍情形。他们对疏散星团 NGC 2243 的高精度 CCD 测光也证实了主序空缺的存在。但是, 无论是对流过冲模型还是经典模型都不能预期或严格再现观测到的主序空缺的实际情形。他们还指出, Scalo^[60] 对于 IMF 的深入研究并未发现任何星等上或质量上恒星分布空缺的必然存在, 因而认为主序空缺对应着 IMF 中恒星空缺区的说法是不可信的。

值得提及的是, 至少在两个疏散星团 NGC 2420 和 NGC 2506 中发现存在两个较明显的主序空缺^[86]。Lattanzio^[85,87] 在尘埃沉积 (grain sedimentation) 会导致原恒星核区重元素增多的假定下, 由恒星演化模型计算的等龄线能够较好地说明上述“双空缺”现象, 并指出只有年龄落在某一范围内的星团才会表现出这种“双空缺”现象。然而, Bonifazi 等^[88] 在处于这一年龄范围内的疏散星团 NGC 2243 中并未观测到两个主序空缺。

可以看出, 迄今关于主序空缺现象的解释还是不确定的, 而且也不能排除多种因素同时起作用的可能性。对这一问题的最终解决, 还有待于星团观测数据的积累和精度的提高, 特别是对于富团的测光研究。另外, 准确的星团成员判定也是很必要的。

4. 双重主序

Twarog^[88] 首次发现疏散星团 NGC 752 的主序分裂为两个平行的分支, Arribas 等^[89] 的红外测光进一步证实了 NGC 752 的主序双重性。Nissen^[90] 发现, 与 NGC 752 有相似年龄、化学组成和结构形态的疏散星团 NGC 3680 也具有明显的主序分支现象, 这也从 Anthony-Twarog 等^[91] 的 CCD 测光中得到确证。主序双重性同时表现在多种 HR 图上, 因而可以排除纯粹测光误差的影响。

对双重主序现象的解释主要集中在考虑双星存在的影响。Twarog^[88]、Arribas 等^[89] 及 Nissen^[90] 都认为双重主序中的红向分支可能是一个双星分支, 但双星假说不能够说明该分支中的亮星。对此, Twarog^[88] 考虑了恒星快速自转对其光度和颜色的影响, 认为红向分支中有些恒星 (如双星假设不能解释的恒星) 可能具有极高的自转速度。另外, Twarog^[88] 和 Nissen^[90] 还探讨了星团内恒星两次形成的可能性。实际观测到分属于两个子序的恒星在视场内的分布是混杂的, 而不是相对集中分布于星团的不同区域, 这点难以用恒星的两次形成来解释。

对双重主序起因研究的新近进展, 是采用了考虑对流过冲的恒星演化模型。Mazzei 和 Pigatto^[65] 以及 Anthony-Twarog 等^[91] 从对流过冲恒星演化模型出发, 探讨了双星子序存在对星团 HR 图主序表观形态的影响。结果表明, 如果同时考虑到对流过冲演化模型预言的

较尖锐的折向点和双星存在的影响，就可以较好地解释双重主序中的红向子序。

考虑到双星有较高的出现率(星团中双星出现率可能高达 50%–60%^[92,93]),如果以上解释是正确的,那么双重主序的存在就应该是疏散星团中的较普遍现象。随着测光精度的提高,应该能发现更多的疏散星团存在双重主序。Anthony-Twarog 等^[94]最近对疏散星团 NGC2420 的 CCD 测光研究,发现了主序右上方有一平行的次主序分布带(见图 2),他们

在对流过冲演化模型和双星假设基础上对此作了解释。但是需要指出的是,与 NGC 752 和 NGC 3680 年龄相似、化学组成接近的 IC 4651,即使是用了高精度的 CCD 测光资料,也未显示出任何双重主序迹象^[95],老年星团 M67 也未显示出主序双重性^[91]。当然,在这一问题上,不同疏散星团中不同的双星出现率、不同年龄阶段的双星演化,直至恒星的反常演化等,都可能对星团 HR 图的表现结构产生不同程度的影响。

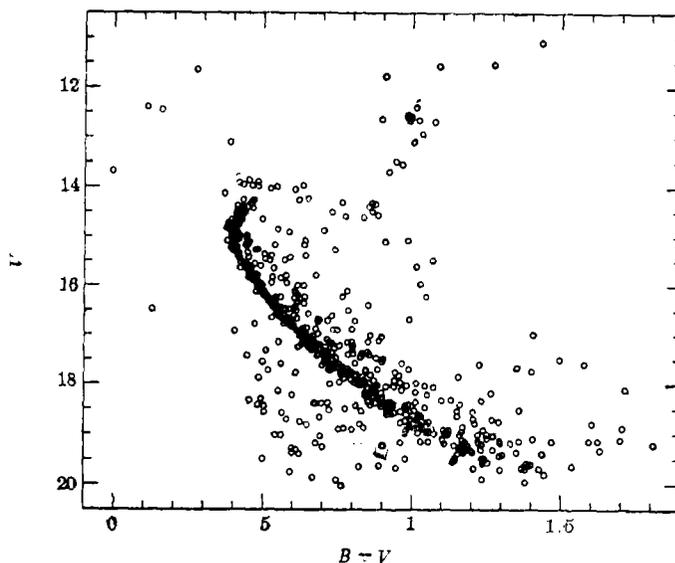


图 2 NGC2420 中主序双重性(在单星主序之上约 0.8mag 出现的恒星集中分布平行带为双星子序)

参 考 文 献

- [1] Becker, W., *Q. J. R. Astron. Soc.*, 13 (1972), 226.
- [2] Baade, D., *Astron. Astrophys.*, 51 (1983), 235.
- [3] Vasilevskis, S., *A. J.*, 67 (1962), 699.
- [4] Sanders, W. L., *Astron. Astrophys.*, 14 (1971), 226.
- [5] Mathieu, R. D., *Ap. J.*, 284 (1984), 463.
- [6] Vasilevskis, S., Klemola, A., and Preston, G., *A. J.*, 63 (1958), 387.
- [7] 赵君亮,田凯平,徐宗海,殷明官,天文学报,22 (1981),180.
- [8] 赵君亮,田凯平,上海天文台年刊,(1981),No. 3,146.
- [9] 赵君亮,田凯平,徐宗海,殷明官,42个疏散星团成员表,上海科学技术出版社(1985).
- [10] Zhao, J. L., and He Y. P., *Astron. Astrophys.*, 237 (1990), 54.
- [11] Girard, T. M., Grundy, W. M., Lopez, C. E., and van Altena, W. F., *A. J.*, 98 (1989), 227.
- [12] Jones, B. F., and Walker, M. F., *A. J.*, 95 (1988), 1755.
- [13] Francic, S. P., *A. J.*, 98 (1989), 888.
- [14] Griffin, R. F., Gunn, J. E., Zimmerman, B. A. and Griffin, R. E. M., *A. J.*, 96 (1988), 172.
- [15] Brager, M., *Ap. J.*, 263 (1982), 199.
- [16] 赵君亮,姜佩芳,天文学报,31 (1990), 252.
- [17] Cabrera-Canó, J. and Alfaro, E. J., *Astron. Astrophys.*, 235 (1990), 34.
- [18] Sandage, A., *Ap. J.*, 125 (1957), 422.
- [19] Sandage, A., *Ap. J.*, 138 (1963), 863.
- [20] Janes, K. and Adler, D., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 49 (1982), 425.
- [21] Harris, G. L. H., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 30 (1976), 451.
- [22] Mermilliod, J. C., *Astron. Astrophys.*, 97 (1981), 235.

- [23] Flower, P. J., in IAU Symp., No. 108, p. 31. (1984).
- [24] Anthony-Twarog, B. J., and Twarog, B. A., *Ap. J.*, 291 (1985), 595.
- [25] Kaluzny, J. and Richtler, T., *Acta Astronomica*, 39 (1989), 139.
- [26] Tosi, M., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 50 (1979), 245.
- [27] Sagar, R., *Astrophys. Space Sci.*, 113 (1985), 171.
- [28] Barbaro, G., Dallaporta, N. and Fabris, G., *Astrophys. Space Sci.*, 3 (1969), 123.
- [29] Janes, K. A., Tilley, C. and Lynga, G., *A. J.*, 95 (1988), 771.
- [30] Piskunov, A. E., *Nauch. Int. Astron. Counc. Acad. Sci. USSR*, 37 (1977), 47.
- [31] Piskunov, A. E., *Nauch. Int. Astron. Counc. Acad. Sci. USSR*, 37 (1977), 31.
- [32] Ciardullo, R. B. and Demarque, P., *Trans. Astron. Obs. Yale Univ.*, 33 (1977), 1.
- [33] Vanden Berg, D. A., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 51 (1983), 29.
- [34] Vanden Berg, D. A., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 58 (1985), 711.
- [35] Bertelli, G., Bressan, H. G., Chiosi, C. and Argerer, k., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 66 (1986), 191.
- [36] Choisi, C., Bertelli, G. and Bressan, A., *Astron. Astrophys.*, 196 (1988), 84.
- [37] Bertelli, G., Betto, R., Bressan, A., Chiosi, C., Nasi, E., and Vallenari, A., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 85 (1990), 845.
- [38] Bonifazi, A., Pecci, F. F., Romeo, G., and Tosi, M., *M. N. R. A. S.*, 245 (1990), 15.
- [39] Palouš, J., Ruprecht, J., Dlužnevska, O. B., and Piskunov, T., *Astron. Astrophys.*, 61 (1977), 27.
- [40] Muzyliev, V. V., *Nauch. Int. Astron. Counc. Acad. Sci. USSR*, 41 (1978), 94.
- [41] Twarog, T. A. and Anthony-Twarog, B. J., *A. J.*, 99 (1990), 261.
- [42] Caouto, F., Chieffi, A. and Castellani, V., *A. J.*, 100 (1990), 261.
- [43] Hobbs, L. M., Thorburn, J. A., and Rodríguez-Bell, T., *A. J.*, 100 (1990), 710.
- [44] Hobbs, L. M. and Pilachowski, C., *Ap. J.*, 334 (1988), 734.
- [45] Vanden Berg, S., *Ap. J.*, 125 (1957), 445.
- [46] Vanden Berg, S., *Ap. J.*, 134 (1961), 553.
- [47] Taff, L. G., *A. J.*, 79 (1974), 1280.
- [48] Burki, G., *Astron. Astrophys.*, 57 (1977), 135.
- [49] Stecklum, B., *Astron. Nachr.*, 306 (1985), 45.
- [50] Scalo, J. M., *Fund. Cosmic Phys.* 11 (1986), 1.
- [51] Hambly, N. C. and Jameson, R. F., *M. N. R. A. S.*, 249 (1991), 131.
- [52] Salpeter, E. E., *Ap. J.*, 121 (1955), 161.
- [53] Sagar, R., Joshi, U. C. and Sinval, S. D., *Bull. Astron. Soc. India.*, 11 (1983), 44.
- [54] Spassonova, N. M. and Baev, P. V., *Astrophys. Space Sci.*, 112 (1985), 111.
- [55] Dixon, M. E., Ford, V. L. and Robertson, J. W., *Ap. J.*, 174 (1972), 17.
- [56] Barbaro, G. and Bertelli, G., *Astron. Astrophys.*, 54 (1977), 243.
- [57] Chiosi, C., Bertelli, G. and Bressan, A., *Mem. Soc. Astron. Ital.*, 57 (1986), 507.
- [58] Pandey, A. K., Bhatt, B. C., Mahra, H. S. and Sagar, R., *M. N. R. A. S.*, 236 (1989), 263.
- [59] Vanden Berg, D. A. and Laskarides, P. G., *Ap. J. Suppl. Ser.*, 64 (1987), 103.
- [60] Maeder, A. and Meynet, G., *Astron. Astrophys.*, 21 (1989), 155.
- [61] Maeder, A. and Mermilliod, J. C., *Astron. Astrophys.*, 93 (1981), 136.
- [62] Barbaro, G. and Pigatto, L., *Astron. Astrophys.*, 136 (1984), 355.
- [63] Barbaro, G. and Pigatto, L., in IAU Symp. No. 105, p. 97. (1984).
- [64] Mermilliod, J. C. and Mayor, M., *Astron. Astrophys.*, 237 (1990), 61.
- [65] Mazzei, P. and Pigatto, L., *Astron. Astrophys.*, 193 (1988), 148.
- [66] Aparicio, A., Bertelli, G., Chiosi, C. A. and Garcia Pelayo, J. M., *Astrophys. Space Sci.*, 169 (1990), 37.
- [67] Sandage, A. R., *A. J.*, 58 (1953), 61.
- [68] Mermilliod, J. C., *Astron. Astrophys.*, 109 (1982), 37.
- [69] Mateo, M., Harris, A. C., Nemec, J. and Olszewski, e. w., *A. J.*, 100 (1990), 469.
- [70] Roberts, M. S., *A. J.*, 65 (1960), 457.
- [71] Eggen, O. J. and Iben, I. Jr., *A. J.*, 96 (1988), 635.
- [72] Mc Crea, W. H., *M. N. R. A. S.*, 28 (1964), 147.
- [73] Manteiga, M. and Roger, C. M., *Astrophys. Space Sci.*, 156 (1989), 169.
- [74] Zinn, R. and Searle, L., *Ap. J.*, 209 (1976), 734.
- [75] Wheeler, J. C., *Ap. J.*, 234 (1979), 569.
- [76] Abt, H. A., *Ap. J. Lett.*, 294 (1985), L103.

- [77] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **178** (1987), 159.
[78] Eggen, G. and Sandage, A., *Ap. J.*, **140** (1964), 130.
[79] Mathys, G., *Astron. Astrophys.*, **245** (1991), 467.
[80] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **32** (1974), 177.
[81] Prather, M. L. and Demarque, P., *Ap. J.*, **19** (1974), 109.
[82] Maeder, A., *Astron. Astrophys.*, **47** (1976), 389.
[83] Morgan, J. G. and Eggleton, P. P., *M. N. R. A. S.*, **182** (1978), 219.
[84] Cannon, R. D., in IAU SYmp. No. **105**, p. 123, (1984).
[85] Lattanzio, J. C., *M. N. R. A. S.*, **207** (1984), 309.
[86] Mc Clure, R. D., Twarog, B. A. and Forrester, W. T., *Ap. J.*, **243** (1981), 841.
[87] Lattanzio, J. C., in IAU Symp. No. **105**, p. 109, (1984).
[88] Twarog, B. A., *Ap. J.*, **267** (1983), 207.
[89] Arribas, S., Manteiga, M., Roger, C. M., Paze, E., Straniero, O. and Caputo, F., *Astrophys. Space Sci.*, **169** (1990), 49.
[90] Nissen, P. E., *Astron. Astrophys.*, **199** (1988), 146.
[91] Anthony-Twarog, B. J., Twarog, B. A. and Shodhan, S., *A. J.* **98** (1989), 1643.
[92] Mc Namara, B. J. and Sanders, W. L., *Astron. Astrophys.*, **62** (1978), 259.
[93] Mc Namara, B. J. and Sanders, W. L., *Astron. Astrophys.*, **54** (1977), 569.
[94] Anthony-Twarog, B. J., Kaluzny, J., Shara, M. M. and Twarog, B. A., *A. J.*, **99** (1990), 1504.
[95] Anthony-Twarog, B. J., Mukherjee, K., Caldwell, N and Twarog, B. A., *A. J.*, **95** (1988), 1453.

(责任编辑 刘金铭)

Recent Developments on Studies of Open Clusters(I): Basic Features and Stellar Evolution

Shi Huoming Zhao Junliang
(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

Abstract

Studies on open clusters are of great significance for astronomy and astrophysics, for which distinct developments have been made recently in both observational and theoretical respects. In this paper a number of basic features of open clusters and some important problems related to stellar evolution in open clusters are described and reviewed, including membership determination, age estimation, luminosity function and mass function, integrated photometric parameters, test of evolutionary models, blue stragglers, main-sequence gaps and bimodal main-sequences.