

文章编号: 1000-8349(2007)04-0338-08

# 疏散星团的质量分层

赵君亮

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 对疏散星团质量分层的有关问题做了简要的评述, 包括空间质量分层和速度质量分层的表现形式和探测途径, 质量分层形成机制的研究现状。最后概要介绍了 2MASS 测光资料对探讨疏散星团质量分层效应的作用。

**关键词:** 天体物理学; 星团; 疏散星团; 质量分层

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

疏散星团因其自身固有的一些特点, 在天体物理学, 特别是恒星动力学研究中有着重要的地位。包括疏散星团有比较宽的质量谱和年龄谱, 有利于探索恒星和恒星系统的演化, 特别是动力学演化; 它们位于银道面附近, 可用于研究银盘的大尺度运动和演化, 包括与星际云的相互作用; 这类星团离开太阳大多比较近, 可以分辨出其中的单颗成员星, 并进而通过详细的观测来讨论星团的内部结构和运动学状态等<sup>[1]</sup>。

成员星的质量分层效应是疏散星团研究的一个重要内容。所谓质量分层, 是指团内不同质量恒星在位置空间和速度空间中表现出不同的分布。具体说来就是存在质量-团心距关系和质量-速度弥散度关系, 前者通常称为空间质量分层 (spatial mass segregation), 而后者就是速度质量分层 (velocity mass segregation)。对于一个确定的星团来说, 可以认为团内恒星有着相同的距离, 于是成员星的视星等就反映了恒星光度的相对大小。另一方面, 如果认为疏散星团成员星大部分都是主序星, 或者只考虑其中的主序星, 那么恒星光度的大小即反映了恒星质量的大小。因此, 质量分层效应通常表现为成员星的光度分层。

一个星团是否存在质量分层, 这种分层效应的显著程度如何, 成员星是否同时表现出空间分层和速度分层, 不同年龄、不同富度、不同位置上星团的分层效应有何异同, 这类问题涉及到星团的形成过程和动力学演化、团内恒星的演化及其对星团整体演化的影响, 以及银河系力场和星际云对星团演化的作用等重要问题, 因而长期以来一直受到人们广泛的关注。

实际上, 关于分层效应的讨论并不限于疏散星团, 也不只是限于质量分层, 任何一类天体集团, 都可能存在某个观测量的空间或速度分层效应。例如球状星团的质量分层<sup>[2,3]</sup>、超星团

---

收稿日期: 2006-10-08; 修回日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (10333020)

的质量分层<sup>[4]</sup>, 以及星系团的光度分层<sup>[5,6]</sup>、形态分层 (morphological segregation)<sup>[7,8]</sup>、元素丰度分层 (abundance segregation)<sup>[9]</sup> 等。本文只讨论银河系内疏散星团的分层效应。

## 2 空间质量分层

人们早就发现一些疏散星团存在空间质量分层的事实, McNamara 和 Sekiguchi<sup>[10]</sup> 对此曾做过简要的介绍。一个星团如果存在空间质量分层, 那么大质量成员星和小质量成员星便表现为有不同的径向分布, 具体说来就是大质量恒星趋于向团中心集聚, 而小质量恒星相对来说会更多地分布在星团的外围部分。

检验上述效应可以有几种途径。一种是把星团内的恒星按质量 (光度, 即星等) 的大小分成若干组, 分组的方式有一定的随意性, 但必须保证每一质量组内有足够多的恒星, 使最后结果具有统计意义。然后, 确定不同质量成员星的径向面数密度轮廓, 或者它们的归一化累积径向面数密度分布函数, 并由此讨论该星团是否存在空间质量分层。在研究疏散星团 NGC 6530 的质量分层效应时, van Altena 和 Jones<sup>[11]</sup> 便采用了这种方法。

另一种方法是就不同质量范围的团星, 分别计算它们的半质量半径。如果成员星存在空间质量分层, 则恒星的质量越大, 相应的半质量半径就越小<sup>[10]</sup>。赵君亮等人<sup>[12]</sup> 在研究星团 NGC 6530 的质量分层效应时曾经采用了这种做法。这样做的一个好处是可以得到某种定量的数值结果。

分析不同团心距范围内成员星的质量函数形式, 同样可以用来讨论星团中的恒星是否存在空间质量分层。为了得到星团成员星的质量函数, 对于那些缺乏成员判定的星团来说, 首先要从实测资料得出星团天区恒星的观测光度函数, 然后设法扣除场星污染的影响, 导出成员星的内禀光度函数, 再利用质光关系和距离模数把光度函数转化为质量函数<sup>[13]</sup>。例如, Tadross<sup>[14]</sup> 为从恒星 J 波段的绝对星等  $M_J$  求得恒星的质量  $M$  (以太阳质量为单位), 曾给出以下形式的两个二阶多项式:

$$\begin{aligned} M &= 1.8 - 0.01M_J - 0.0025M_J^2 & (-5 \leq M_J < 1); \\ M &= 2.05 - 0.32M_J + 0.01M_J^2 & (1 \leq M_J < 9). \end{aligned} \quad (1)$$

质量函数通常可表成下列解析形式<sup>[15]</sup>:

$$\phi(m) = cm^{-(1+\chi)}. \quad (2)$$

式中,  $\chi$  称为质量函数的斜率。如果星团存在空间质量分层, 那么与外部区域相比, 或者与整个星团天区相比, 由于内部区域小质量恒星数目相对缺损, 相应的质量函数的斜率就较为平坦, 而且随着受检测天区团心距的减小, 这一效应会越来越明显<sup>[16-18]</sup>。

检验星团空间质量分层还有一种途径, 那就是比较团内不同区域巨星 (以及双星和聚星) 与主序星的数密度在分布上的差异。因为前者的质量显然要比后者大, 如果存在空间质量分层, 大质量天体应该趋于向团中心集聚。例如, 早期 Mathieu 等人 and Abt 的工作就说明了这一点<sup>[19,20]</sup>。最近, Bonatto 和 Bica<sup>[13]</sup> 发现, 在星团 NGC 2477 中, 核区巨星的数密度与整个星团天区巨星数密度之比高达 130 左右, 而主序星的这一比例仅为约 30, 前者约为后者的

4 倍。外围区域的情况恰好相反,主序星的相应比例约是巨星的 4 倍。由此他们同样得出星团 NGC 2477 存在空间质量分层的结论。

以上几种探讨星团空间质量分层效应的途径,本质上都是分析不同质量恒星在星团内空间分布上的差异,不同方法所得出的结论应该是一致的。不过,当团星数较少时,讨论不同团心距恒星的面数密度分布函数或质量函数就不易得出明确的结论。

### 3 速度质量分层

早期,人们认为上述空间质量分层效应是星团动力学演化所导致的团星间动能均分的必然结果。大质量恒星有较小的速度弥散度,并向团中心内落,小质量恒星则因有较大的速度弥散度而向星团外部区域扩散,甚至从星团中逸出,于是成员星便表现为空间质量分层。因此,在一个星团内,不同质量的恒星应有不同的速度弥散度,这就是星团的速度质量分层效应。

检验星团是否表现出速度质量分层效应远比探测空间质量分层来得困难,关键在于必须取得星团成员星的高精度速度观测资料。就目前来看,尽管恒星视向速度测定可以达到较高的精度(好于  $\pm 0.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[21]</sup>,但对疏散星团来说,已取得视向速度的成员星的个数并不很多。另外,在利用视向速度研究星团内部运动(包括速度质量分层效应)时,还可能会受到不可分辨双星轨道运动的影响<sup>[22]</sup>。

因此,目前实际上能用于讨论星团内部运动的观测资料就是成员星的高精度(相对)自行。早在 20 世纪 70 年代初, Jones 对昴星团和鬼星团的分析已说明了这一点<sup>[23,24]</sup>。Mathieu<sup>[22]</sup>曾指出,利用自行讨论星团内部运动的好处在于:自行所提供的速度资料是二维的,观测精度不受恒星光谱形的影响,而且当时间基线比较长时也不受双星轨道运动的影响。另外,一旦能测得星团天区恒星的自行,便可以有效地确定星团成员,取得几百颗成员星的自行观测资料,而且它们所涉及的星等范围也比较大。不过,在利用星团成员星的自行来探测它们的空间质量分层时,最大的制约因素是观测资料的精度,因为随着星团距离的增大,与自行观测精度相应的恒星切向速度的测定精度便迅速下降,从而影响到对最终结果的明晰判定。

应该强调的是,在讨论星团的速度质量分层效应时,必须取得不同质量成员星的内禀自行弥散度,而不能直接采用它们的观测自行弥散度。这里,所谓观测自行弥散度是指由团星自行观测值直接求得的弥散度,它应该包括两种成分,即成员星的内禀自行弥散度和自行的观测误差。说得更明确一些,如果假设团星的自行没有任何观测误差,那么由团星自行求得的便是内禀弥散度。内禀自行弥散度通常可以有两种方法来加以估算: 1) 在确定星团天区恒星的自行成员时,以自行的内禀弥散度而不是观测弥散度作为分布参数,从而直接解算出内禀自行弥散度及相应的精度<sup>[25]</sup>; 2) 从观测自行弥散度中扣除观测误差的影响,以得到自行的内禀弥散度<sup>[10,23]</sup>。

### 4 质量分层的形成机制

通常认为星团是从巨分子云中形成的,它们经历了一定时间的演化(包括动力学演化),最终成为我们今天所观测到的状态。星团的年龄越老,所经历的演化时间就越长。因此,目前

所观测到的星团是否会表现出某种质量分层效应, 以及这种效应的明显程度又如何, 必然取决于星团形成时的初始状态和此后的动力学演化。

在星团的动力学演化过程中, 由于星团内部运动引起的团星间的两体交会, 团星与团星之间会出现能量 (动能) 交换, 小质量恒星从大质量恒星获得动能, 结果是小质量恒星的运动速度逐渐增大, 大质量恒星的运动速度渐而减小, 如果有足够的演化时间, 星团最终会达到所谓能均分状态<sup>[26]</sup>。这一过程的可观测现象是大质量恒星的中心聚度比小质量恒星来得大, 成员星会表现出空间质量分层; 同时, 小质量恒星的速度弥散度比大质量恒星来得大, 成员星又表现为速度质量分层。

设星团的特征半径为  $R$ , 一颗恒星的典型运动速度为  $v$ , 则

$$t_c = R/v, \quad (3)$$

$t_c$  称为星团的穿越时标。如取疏散星团的特征半径为  $R = 1 \text{ pc}$ , 而团星的典型速度弥散度为  $v = 1 \text{ km/s}$  量级, 则星团的穿越时标通常不会超过约  $10^6$  年。另一方面, 使恒星运动速度发生同数量级变化所需要的穿越次数为

$$n_r \approx 0.1N/\ln N, \quad (4)$$

式中  $N$  为星团中的恒星个数。一般来说, 对疏散星团有  $N \leq 10^3$ , 所以有  $n_r < 20$ 。星团的弛豫时标  $t_r$  可定义为<sup>[27]</sup>

$$t_r = n_r \times t_c. \quad (5)$$

因此, 我们就得到:

$$t_r \propto N/\ln N. \quad (6)$$

上式给出了弛豫时标的粗略估算, 而比较精确的计算公式为

$$t_{rh} = 0.14N \sqrt{r_h^3/GM}/\ln(0.4N). \quad (7)$$

$t_{rh}$  称为中位弛豫时标, 其中  $G$  为引力常数,  $M$  是星团的质量, 而  $r_h$  是星团的中位半径, 即包含星团总光度一半的球的半径<sup>[27]</sup>。对于典型的疏散星团来说, 通常成员星个数  $N$  比较少, 弛豫时标仅为穿越时标的十几倍或更小, 因而能通过动力学演化过程较快地达到能均分状态, 尤其是那些老年 (年龄  $\approx 10^8$  年) 疏散星团。

另一方面, 对一些非常年轻的疏散星团, 比如 NGC 6530, 年龄只有  $1.5 \sim 2 \text{ Ma}$ <sup>[28-30]</sup>, 同样也观测到了成员星的空间质量分层效应, 而这很难用星团动力学演化的弛豫过程来解释<sup>[10,12]</sup>。不仅如此, 对疏散星团 NGC 6530 和 M 35 (年龄为  $10^8$  年) 都观测到了空间质量分层效应<sup>[31]</sup>, 但这两个星团并没有表现出相应的速度质量分层<sup>[10,12]</sup>。另外, 对一些中等年龄的疏散星团, 如昴星团、鬼星团和 M 11 等, 尽管除了空间质量分层外, 还发现它们的成员星存在某种质量 - 速度弥散度关系, 但远没有达到能均分状态下应有的程度, 即没有表现出  $\sigma^2 \propto M^{-1}$  这样的关系<sup>[23,32-34]</sup>。Sager 和 Bhatt 利用自行资料研究了年龄在  $10^7 \sim 10^8$  年范围内 8 个疏散星团的内部运动, 结果发现除了 IC 2391 外, 其余星团的内禀速度弥散度  $\sigma$  和恒星质量  $m$  之间没有任何关系, 而即使对 IC 2391 来说, 这种关系也并不满足  $\sigma^2 \propto M^{-1}$ <sup>[35]</sup>。

Larson<sup>[36]</sup> 在 1982 年就已明确指出,在不同的恒星形成区,恒星的质量谱是不一样的;在星团形成阶段,大质量恒星通过吸积(而不是碎裂)过程,在原星团的高密度中央核区形成。Sagar 等人<sup>[37]</sup> 发现,在他们所研究的 11 个年轻疏散星团中,有 7 个星团表现出质量分层,而其中的 6 个星团因为非常年轻,根本谈不上经历了多少动力学弛豫,它们的质量分层效应很可能就是在恒星形成时出现的,这就是原始质量分层(primordial mass segregation):大质量恒星倾向于在星团中心附近的局部区域中形成,而较低质量恒星可以在整个星团区域中形成。另一方面,对于一些中等年龄的星团,目前所观测到的质量分层,很可能是初始恒星形成条件和动力学弛豫过程两者的联合效应。

1998 年, Hillenbrand 和 Hartman<sup>[38]</sup> 在对猎户星云星团的结构和动力学的研究中进一步讨论了极年轻星团质量分层的形成机制。他们发现,尽管猎户星云星团是一个非常年轻的疏散星团,年龄小于 1 百万年,但确实存在比较明显的空间质量分层。他们认为,这种分层效应主要起因于形成星团时的初始条件,而不是动力学演化的结果。在这之前, Bonnell 和 Davies<sup>[39]</sup> 已经指出,在若干倍穿越时标内,星团就可以表现出某种程度的质量分层(但不是充分质量分层),而且这一效应与星团是否位力化、星团的外形和径向面密度轮廓没有什么关系。

实际上,关于恒星质量-速度弥散度关系,即速度质量分层的理论预期,会受到若干不确定因素的制约。星团与分子云的交会,星团的动力学演化,银河系潮汐力场的作用,以及星团初始形成条件等,都会影响到星团内恒星的速度分布。如银河系潮汐力场的作用会使速度弥散度大的小质量恒星脱离星团本体(蒸发),结果便使整个团的质量-速度弥散度关系变得比较平坦。因此,由能均分得出的简单理论关系  $\sigma^2 \propto M^{-1}$ , 往往不可能从观测上得以明确的验证。

## 5 2MASS 资料的应用

包含 J(1.25  $\mu\text{m}$ )、H(1.65  $\mu\text{m}$ ) 和 K<sub>s</sub>(2.17  $\mu\text{m}$ )3 个波段的 2MASS 测光资料,为研究疏散星团提供了一批非常好的观测样本。近期的一些工作表明,2MASS 测光资料可以用于详细分析各类疏散星团的质量分层效应<sup>[13,16-18,40]</sup>。

这里,首要的问题是如何合理挑选星团成员星,以尽可能消除场星混淆的影响。对于 2MASS 资料所涉及的疏散星团,通常不可能严格确定星团的自行成员。2MASS 给出的是测光资料,因而唯一可用于确定星团成员的观测判据是 CM 图,并利用所谓“颜色-星等过滤器(color-magnitude filter)”,来尽可能地剔除星团天区中的场星<sup>[13]</sup>。应该说,不仅对已确定星团成员的星团(如 M 67、NGC 188 和 M 11),而且对一些尚未研究过的疏散星团<sup>[13]</sup>,甚至受场星严重污染的星团(称为“低反差疏散星团”)<sup>[18]</sup>,都已取得了相当好的研究结果。

从结构上来看,大部分疏散星团都可以看成由两部分组成,即中心区致密的团核和外围松散的团晕。质量分层的结果是,大质量恒星(以及聚星系统)往往更多集中在团核区,而小质量恒星则广泛分布在大范围的团晕内。对于最年老(或者质量比较小)的一些星团,小质量恒星可能会从星团中蒸发而扩散出去<sup>[41]</sup>。在利用 2MASS 测光资料研究疏散星团的质量分层效应时,主要途径是比较团核和团晕(或者整个团)内恒星的质量函数,以探测星团中成员星的分布是否存在空间质量分层效应,并进而讨论其可能的形成机制。

Bonatto 和 Bica<sup>[13]</sup> 利用 2MASS 的 J、H 和 K<sub>s</sub> 三个波段的测光资料, 对 11 个疏散星团做了比较详细的研究。这些星团的年龄范围为 70 Ma(M 26)~7 Ga(NGC 188), 质量范围 360~5 300  $M_{\odot}$ , 银心距 6.6~8.9 kpc, 日心距 0.4~1.7 kpc。星团的两个结构参数是核半径  $r_{\text{core}}$  和极限半径  $r_{\text{lim}}$ ; 其中核半径取星团径向密度轮廓与 King 模型<sup>[42]</sup> 拟合的结果, 极限半径表征星团的外部边界, 取星团径向密度轮廓下降到与背景场星密度一致处的团心距, 或者说团心距为  $r_{\text{lim}}$  处的团星数密度为 0。根据上述定义, 他们发现聚度指数  $c^* = \lg(r_{\text{lim}}/r_{\text{core}})$  除了 1 个团为 0.8 外, 其余星团均为 0.9~1.0。这说明至少对他们所用的样本来讲, 团的极限半径比核半径约大 1 个数量级。

研究表明, 在上述 11 个星团中, 除了最年轻的 M26 外, 其他星团核区质量函数的斜率都比整个团的质量函数斜率明显来得小, 或者说核区质量函数的斜率相对整个团要平坦得多, 从而说明星团存在某种程度的空间质量分层效应。对于质量大于 1 000  $M_{\odot}$  的团来说, 质量函数斜率的分布范围比较窄, 核区斜率的平均值为  $\langle \chi_{\text{core}} \rangle = 0.5 \pm 0.5$ , 而整个团的平均斜率为  $\langle \chi \rangle = 1.5 \pm 0.2$ , 后者接近 Salpeter 给出的标准值 1.35<sup>[15]</sup>。另一方面, 对那些质量比较小的星团, 质量函数斜率的分布范围比较宽, 核区和整个团的平均斜率分别为  $\langle \chi_{\text{core}} \rangle = 0.9 \pm 1.1$  和  $\langle \chi \rangle = 0.7 \pm 0.7$ 。

为了探讨星团动力学演化对质量函数的可能影响, 需要进一步考虑弛豫时标和星团年龄与动力学演化之间存在的关系。为此, Bonatto 和 Bica<sup>[13]</sup> 引入了一个演化参数:

$$\tau = t_c/t_r, \quad (8)$$

式中,  $t_c$  为星团的年龄,  $t_r$  是所考察区域的弛豫时标。注意,  $\tau$  值越大星团的动力学弛豫越是充分, 而不单单是星团年龄越大弛豫越充分。由式 (7) 可知, 星团核区和整个星团的弛豫时标是不同的, 核区弛豫时标要比整个团的弛豫时标短得多。在他们所考察的 11 个星团中, 大质量星团的整体弛豫时标平均为核区弛豫时标的 120 倍, 而对小质量团来说两者约相差 80 倍。另一方面, 无论是大质量团还是小质量团, 整个团和核区的演化参数  $\tau$  的比值大体上正好相反。

实际上, 由于质量分层效应以及一些外部因素 (如银河系力场的潮汐剥离作用等) 的影响, 整个团的质量函数会随时间渐而变得平坦, 而这一过程自然与演化参数  $\tau$  的大小有关。当对整个团有  $\tau \geq 40$ , 以及对核区有  $\tau \geq 2\ 600$  时, 便足以产生大尺度质量分层及小质量恒星的蒸发, 其表现形式便是出现明显的质量函数平化效应, 而质量函数斜率  $\chi$  随演化参数  $\tau$  的变化可以表述为以下形式:

$$\chi(\tau) = \chi_0 - \chi_1 e^{(-\tau_0/\tau)}. \quad (9)$$

Bica 和 Bonatto<sup>[18]</sup> 利用 2MASS 测光资料, 对 5 个低反差疏散星团性质的研究表明, 这些星团同样存在空间质量分层效应, 核区质量函数的斜率明显比整个团平坦。值得注意的是, 上述 5 个星团所在天区的场星污染程度很厉害, 因而在已发表的文献中尚无有关的星团参数可用。这就进一步证明: 2MASS 测光资料对疏散星团结构和动力学演化研究确实可以发挥重要的作用。

关于疏散星团的空间和速度分层的研究, 已有比较长的历史。由于这一问题对星团形成和演化, 以及对团星演化等天体物理研究提供了重要的观测约束, 至今仍为人们所重视, 并随着星团观测资料的增多, 开展了许多深入的分析 and 讨论。目前关于这一问题的一些主要结论是:

1) 许多中老年疏散星团表现为有较明显的空间质量分层, 但其中有的并未出现速度质量分层,

或者即使呈现某种程度的速度质量分层, 也没有达到能均分状态。 2) 一些非常年轻的疏散星团也表现出有较为显著的空间质量分层, 但并没有同时呈现速度质量分层。 3) 对以上实测结果的一种理论解释是, 形成星团质量分层可能有两种机制, 即起因于形成星团时的初始条件, 以及后期的星团动力学演化, 而今天观测到的星团质量分层很可能是这两种过程的综合效应。

### 参考文献:

- [1] Mathieu R D. IAU Symp., 2001, 113: 427
- [2] Vesperini E, McMillan S, Zepf S. A&AS, 2005, 207: 9106
- [3] Miocchi P. MNRAS, 2006, 366: 227
- [4] McCrady N, Graham J R, Vacca W D. ApJ, 2005, 621: 278
- [5] Michael B P, Simon P D, Roberto De P, et al. MNRAS, 2005, 364: 1147
- [6] Mercurio A, Merluzzi P, Haines C P, et al. MNRAS, 2006, 368: 109
- [7] Springob C M, Haynes M P, Giovanelli R. ApJ, 2005, 621: 215
- [8] Park C, Choi Y Y. ApJ, 2005, 635: L29
- [9] Dors O L Jr, Copetti M V F. A&A, 2006, 452: 473
- [10] McNamara B J, Sekiguchi K. ApJ, 1986, 310: 613
- [11] van Altena W F, Jones B F. A&A, 1972, 20: 425
- [12] Zhao J L, Chen L, Wen W. ChJAA, 2006, 6: 435
- [13] Bonatto C, Bica E. A&A, 2005, 437: 483
- [14] Tadross A L. JKAS, 2005, 38: 357
- [15] Salpeter E. ApJ, 1955, 121: 161
- [16] Bonatto C, Bica E, Santos Jr. J F C. A&A, 2005, 433: 917
- [17] Santos Jr. J F C, Bonatto C, Bica E. A&A, 2005, 442: 201
- [18] Bica E, Bonatto C. A&A, 2005, 443: 465
- [19] Mathieu R D, Stefanik R P, Latham D W. Proceedings of IAU Colloquium, 1985, 88: 385
- [20] Abt H A. ApJ, 1980, 241: 275
- [21] Mathieu R D, Latham D W, Griffin R F, et al. AJ, 1986, 92: 1100
- [22] Mathieu R D. IAUS, 1985, 113: 427
- [23] Jones B J. AJ, 1970, 75: 563
- [24] Jones B J. AJ, 1971, 76: 470
- [25] Zhao J L, He Y P. A&A, 1990, 237: 54
- [26] Binney J, Merrifield M. Galactic Astronomy. Princeton: Princeton University Press, 1998
- [27] Binney J, Tremaine S. Galactic Dynamics. Princeton: Princeton University Press, 1987
- [28] Sung H, Chun M, Bessell M S. AJ, 2000, 120: 333
- [29] Sagar R, Joshi U C. MNRAS, 1978, 184: 467
- [30] van Altena W F, Jones B F. A&A, 1972, 20: 425
- [31] Cox A N. Allen's Astrophysical Quantities. New York: Springer-Verlag, 1999
- [32] McNamara B J, Sanders W L. A&A, 1977, 54: 569
- [33] Vandenberg D A. ApJS, 1985, 58: 711
- [34] Su C G, Zhao J L, Tian K P. A&AS, 1998, 128: 255
- [35] Sagar R, Bhatt H C. MNRAS, 1989, 236: 865
- [36] Larson R B. MNRAS, 1982, 200: 159
- [37] Sagar R, Myakutin V I, Dluzhnevskaya O B, et al. MNRAS, 1988, 234: 831
- [38] Hillenbrand L A, Hartman L W. ApJ, 1998, 492: 540
- [39] Bonnell I A, Davies M B. MNRAS, 1998, 295: 691
- [40] Bonatto C, Bica E. A&A, 2003, 405: 525
- [41] de la Fuente M R. A&A, 1998, 333: L27
- [42] King I. AJ, 1962, 67: 471

## Mass Segregation of Open Clusters

ZHAO Jun-liang

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

**Abstract:** The mass segregation effects of open clusters, including spatial mass segregation and velocity mass segregation, are of great importance for studies of formation and evolution of clusters. The mass segregation properties are tightly related not only to the evolution of member stars within clusters and its influence on cluster's global evolution, but also to the gravitational field of the Galaxy and the interstellar clouds where clusters form.

Observations show that, in an open cluster, the spatial distribution and radial number density profiles for high-mass member stars and low-mass members are different. High-mass stars are more concentrated in the core of the cluster while low-mass ones being transferred to the halo. In order to examine spatial mass segregation effect of a cluster, a number of different approaches have been developed, such as detecting the variation of the mass function slopes in different spatial regions of the cluster, and analyzing the surface number density profiles or the half-mass radii of member stars with different masses. Current data show that the spatial mass segregations have been found in many open clusters, both old and young.

On the other side, detecting velocity mass segregation of clusters is not as easy as spatial mass segregation, for which the only observational data can be used are proper motions with high accuracies of the cluster members. The observational facts to reflect velocity mass segregation of an open cluster are the intrinsic dispersions in proper motion components of high-mass members should be smaller than those of low-mass ones. Indeed, velocity mass segregation effects have been detected for some open clusters, while the dependence of the intrinsic dispersions in proper motion components on the masses of stars expected from energy equipartition is not found for these clusters.

Concerning the explanations of mass segregation of open clusters, two possible mechanisms have been suggested. Due to dynamical evolution of clusters, high-mass stars will lose part of their kinematical energy and tend to move toward the center of the clusters, and low-mass stars will get some kinematical energy from high-mass ones because of two-body relaxation and move to the periphery of the clusters. The other point of view is the so-called primordial mass segregation, which means initial formation processes of clusters can also leads to radial profiles of stars with different masses reflecting mass segregation effect. Therefore, the present observational effects of the mass segregation of open clusters could be from both dynamical evolution and initial formation processes of clusters.

Finally, the importance of the 2MASS photometry on analyzing the mass segregation of open clusters is also described briefly.

**Key words:** astrophysics; star cluster; open cluster; mass segregation