

文章编号: 1000-8349(2011)01-0031-15

红团簇巨星的绝对星等及其在天体测距方面的应用

高新华^{1,2}, 陈 力^{1,3}, 侯金良¹, 赵君亮¹

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 上海市星系与宇宙学半解析重点实验室, 上海 200234)

摘要: 红团簇巨星 (red clump giant) 是正处于中心氦燃烧阶段的小质量恒星, 它们在赫罗图上成团出现且光度弥散很小, 因此很容易被辨认出来。理论和观测研究均表明它们具有大致相同的光度, 某些波段的光度与金属丰度以及年龄的关系很微弱, 可以作为理想的“标准烛光”来测量天体的距离。依巴谷 (Hipparcos) 天体测量卫星的数据释放后, 红团簇巨星被广泛地用于研究银河系结构以及测定本星系群成员的距离。

关键词: 红团簇巨星; 绝对星等; 标准烛光;

中图分类号: P145.2 **文献标识码:** A

1 引 言

天体距离的精确测量是正确认识宇宙的基础。没有准确的天体距离测定, 就不能准确了解天体的空间分布, 也就无法知道宇宙在各种尺度上的真实结构。另外, 在对天体某些重要物理性质的研究中, 精确的天体距离更是必不可少的^[1]。具有“标准烛光”性质的天体一直是天文学家非常感兴趣的研究对象, 利用“标准烛光”法测量天体的距离也一直在天文学研究中扮演着重要角色。但是作为一种间接测量方法, 其面临的困难也是不容忽视的, 天文学家首先必须知道“标准烛光”到底有多标准, 即其平均绝对星等是多少以及弥散的大小。

早在 1970 年, Cannon^[2]通过分析几个年老疏散星团的颜色-星等图后发现, 部分红巨星在颜色-星等图上存在成团现象。他根据当时已有的理论试图给出合理的解释, 认为这些都是小质量的红巨星, 这些巨星内部都有一个正在燃烧的氦核心和燃烧着的氢壳层。他还发现这几个星团的这种成团巨星的绝对星等都很接近, 并认为这是小质量红巨星的核心发生了电子简并的证据。上述的结论被后来发展起来的恒星演化理论所证实。Cannon^[2]还指出这些绝

收稿日期: 2010-4-14; 修回日期: 2010-5-24

资助项目: 国家自然科学基金 (10773021, 10833005); 创新群体项目 (10821302); 科技部 973 项目 (2007CB815402/403)

对星等近似常数的成团红巨星可以用来估算星团的距离,他强调这种距离估算方法对于那些因距离太远而主序恒星无法被观测到的星团显得尤为重要。

现代恒星演化理论认为红团簇巨星的前身主序星质量介于 $0.5\sim 2.3 M_{\odot}$ 之间,这个质量范围内的恒星在中心氢燃烧结束后,燃烧着的氢壳层继续不断产生氦,逐渐使得中心的氦核质量累积到临界值 ($M_{\text{cr}} \approx 0.45 M_{\odot}$)。当氦核的质量达到临界质量时,氦核开始收缩使得中心温度达到 10^8 K ,引起氦燃烧(氦闪耀),电子简并态随即消失,氦热核反应趋于稳定。由于此时核心燃烧着相同质量的氦核,因此光度也相似。质量小于 $0.5 M_{\odot}$ 的恒星在中心氢燃烧结束后形成的简并氦核无法达到临界质量,因而当电子简并的氦核收缩时,不会使温度升高,所以不能引发中心氦核的燃烧,最终会演化成氦白矮星^[3]。

红团簇巨星最早是在疏散星团中被观测到^[2],这是因为这些红团簇巨星在星团的颜色-星等图上明显成团,且比主序星要亮,因此很容易被识别(见图 1)。从恒星演化的角度讲,红团簇巨星与星族 II 中的水平支(horizontal branch)巨星相当,与天文学家非常熟悉的球状星团的水平支巨星在物理本质上是同类的,都处于同一个演化阶段。两者在颜色-星等图上形态的不同,是由质量、年龄和金属丰度等不同造成的^[4]。后来的观测还发现一些年轻的富金属球状星团中也同样存在红团簇巨星(见图 2),Hipparcos 卫星^[6]的观测则表明场星中的红团簇巨星也非常普遍(见图 3),证实了 Cannon^[1]在 1970 年的猜测。

2 红团簇巨星的绝对星等

要利用红团簇巨星作“标准烛光”,首先必须知道它在某些波段的内禀光度,以及光度如何随年龄、金属丰度不同而变化。Hipparcos 星表^[6]数据释放后,对红团簇巨星绝对星等的研究有了很大的促进,因为利用 Hipparcos 天体测量卫星提供的高质量三角视差数据,使得对太阳附近一定范围内红团簇巨星绝对星等的直接测量成为可能。到目前为止,红团簇巨星在光学 I 波段和近红外 K 波段的绝对星等被研究得最多。

从图 3 中可以清楚地看到,右上方红巨星区域存在一团致密的红团簇巨星聚集区,还可以发现这个红团簇巨星区颜色弥散比较大(主要由红团簇巨星金属丰度和年龄的弥散引起),绝对星等的弥散却比较小。后来的一系列研究又表明红团簇巨星的 V 波段绝对星等与颜色、金属丰度以及年龄存在较强的相关性^[7-9],而 I 波段^[8,10,11,13]以及近红外 K 波段^[13,15,18,19]的绝对星等与颜色、金属丰度及年龄的依赖关系则比较微弱,因此 I 波段与 K 波段绝对星等更适合用来做“标准烛光”。

2.1 光学波段绝对星等

1998 年 Paczyński 和 Stanek^[10]选用三角视差相对误差小于 10% 的 Hipparcos 红团簇巨星(见图 4),先用统计方法给出太阳附近 600 颗红团簇巨星的 I 波段平均绝对星等 (-0.185 ± 0.016) mag,在考虑了样本的选择效应以及星际消光等因素后最终给出的结果是 (-0.279 ± 0.088) mag,弥散仅约为 0.2 mag,并且发现在 $0.8 < (V - I)_0 < 1.4$ 范围内,红团簇

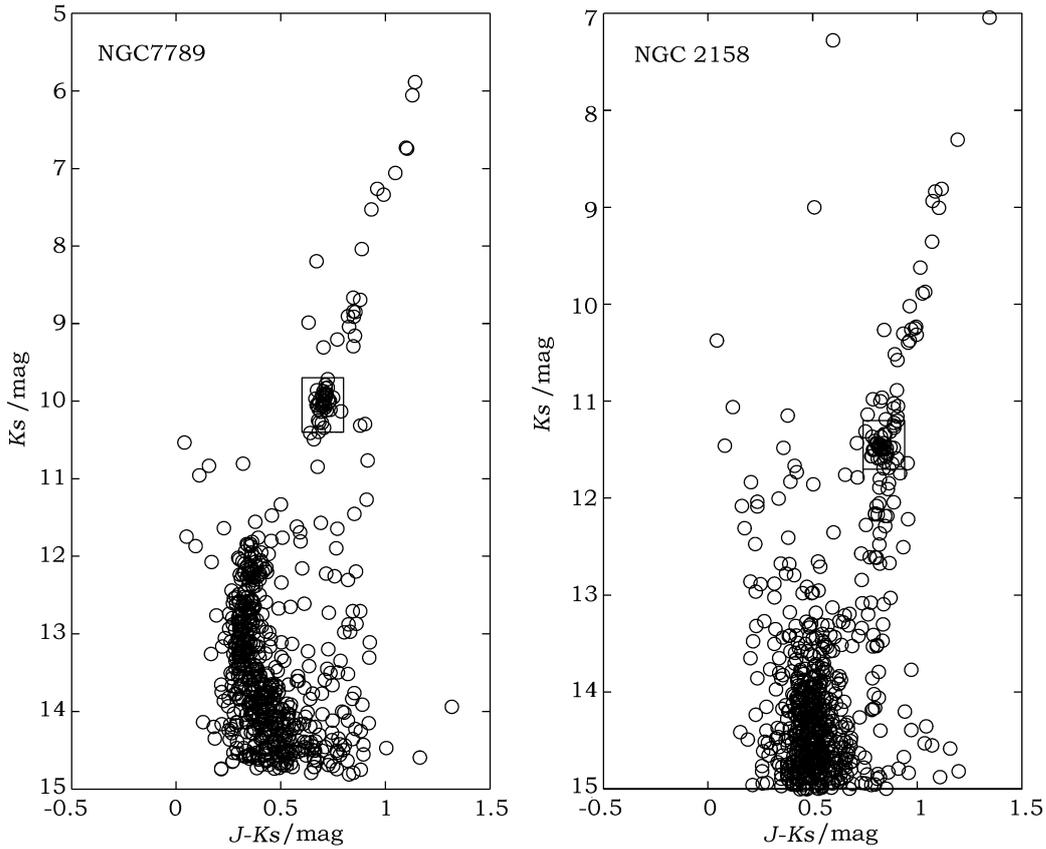


图 1 疏散星团 NGC 7789 与 NGC 2158 的颜色-星等图

绘图所用恒星均位于距星团中心 $5'$ 以内, 矩形小方框覆盖区域是红团簇巨星聚集区。所用数据取自 2MASS 点源星表^[5]。

巨星的绝对星等与颜色几乎不存在相关性。拟合图 4 中虚线矩形框内的恒星光度函数为:

$$n(I_0) = a + b(I_0 - I_{0,m}) + \frac{N_{RC}}{\sigma_{RC} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(I_0 - I_{0,m})^2}{2\sigma_{RC}^2} \right], \quad (1)$$

其中前两项对应背景巨星的分布, 高斯项描述红团簇巨星的分布。式 (1) 中 a 、 b 为拟合系数, $n(I_0)$ 为总的巨星数密度, N_{RC} 为红团簇巨星的数密度, I_0 、 $I_{0,m}$ 、 σ_{RC} 分别表示红团簇巨星的观测绝对星等、拟合平均绝对星等、绝对星等的弥散度。

1998 年 Stanek 和 Garnavich^[16] 用与 Paczyński 和 Stanek^[10] 几乎同样的方法, 只是认为消光影响可以忽略, 并且改进了拟合红团簇恒星光度函数的公式:

$$n(I_0) = a + b(I_0 - I_{0,m}) + c(I_0 - I_{0,m})^2 + \frac{N_{RC}}{\sigma_{RC} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(I_0 - I_{0,m})^2}{2\sigma_{RC}^2} \right], \quad (2)$$

前三项描述背景巨星分布, 高斯项描述红团簇巨星本身。式 (2) 中参数代表的意义与式 (1) 一样。最后他们得到了 I 波段平均绝对星等为 (-0.23 ± 0.03) mag, 弥散也是约为 0.2 mag。

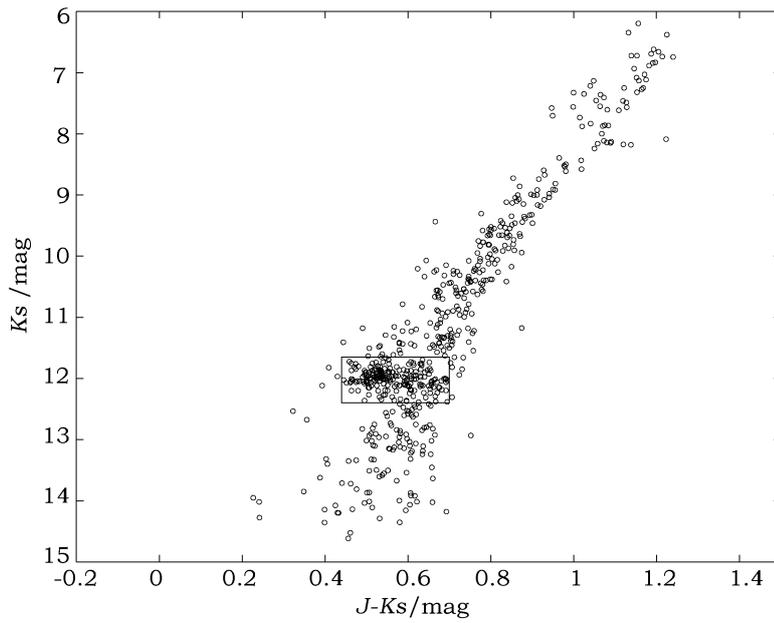


图2 球状星团 47 Tuc 的颜色-星等图

绘图所用恒星均位于距星团中心 $3'$ 以内, 矩形小方框覆盖范围内红团簇巨星密集成团。所用数据取自 2MASS 点源星表^[5]。

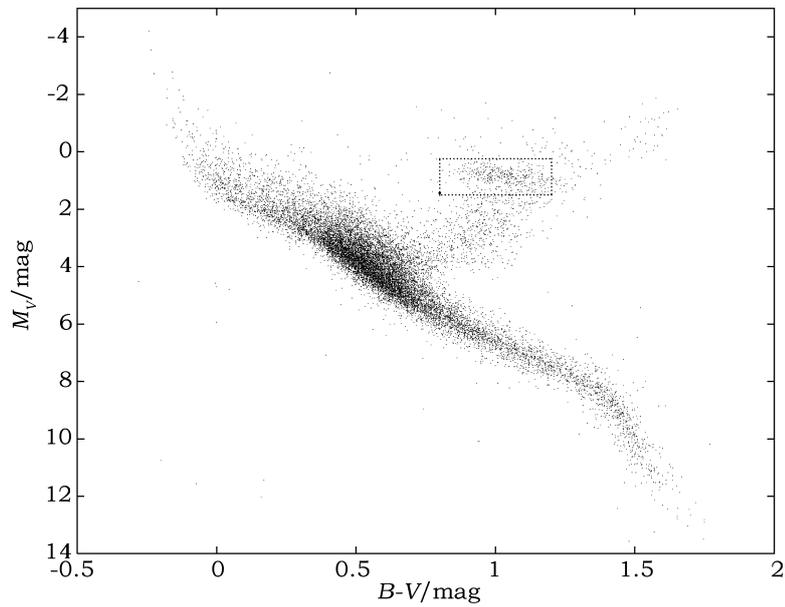


图3 根据依巴谷卫星观测数据绘制的“颜色-星等图”

横坐标是颜色“ $B-V$ ”, 纵坐标是绝对星等“ M_V ”。图中共有 15091 颗恒星, 三角视差精度满足相对误差 $\sigma_\pi/\pi < 10\%$, 颜色误差 $\sigma_{B-V} < 0.025$ mag, 且距离太阳 100 pc 以内。右上方虚线矩形框内为红团簇巨星区。

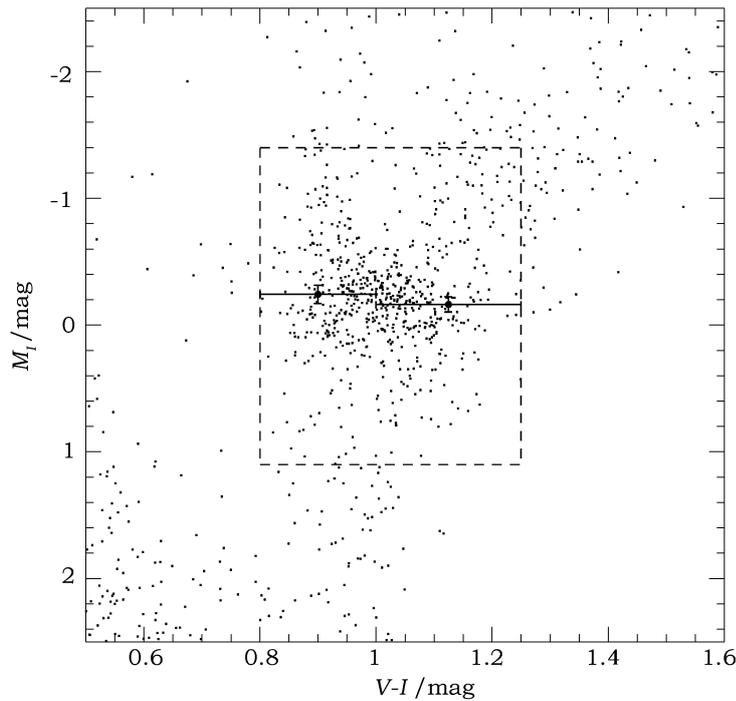


图4 三角视差相对误差小于 10% 的依巴谷巨星的颜色-星等图

虚线矩形框内为红团簇巨星聚集处, 被用来拟合得到红团簇巨星的 I 波段绝对星等, 水平粗实线位置是红团簇巨星最密集处, 分别对应两个人为划分的颜色区间, 每一个颜色区间内的恒星都用式 (1) 去拟合, 得到红团簇巨星平均绝对星等^[10]。

1998 年 Kaluzny 等人^[17]用与 Stanek 和 Garnavich^[16]同样的方法去处理球状星团 47 Tuc 中红团簇巨星, 他们发现如果 I 波段平均绝对星等取 Stanek 和 Garnavich^[16] 给的值 (-0.23 ± 0.03) mag, 则得到的 47 Tuc 的距离模数比别人得到的值偏小 $0.2 \sim 0.25$ mag。Kaluzny 等人^[17] 认为可能是 47 Tuc 中的红团簇巨星要比 Hipparcos 红团簇巨星更亮一些, 他们认为金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.7$ dex 的红团簇巨星的 I 波段平均绝对星等应该是 -0.48 mag。

1999 年 Sarajedini^[8]利用 10 个存在红团簇巨星的疏散星团样本计算其平均绝对星等, 这些疏散星团覆盖的金属丰度范围为 $-0.4 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$, 年龄范围为 $2 \sim 9$ Ga。这些星团的距离模数通过主序拟合的方法得到。对于每一个星团, 由红团簇巨星的平均视星等及主序拟合的距离模数计算该星团的 V 波段和 I 波段的平均绝对星等值。计算单个星团 V 波段红团簇巨星的平均绝对星等的公式为:

$$M_V = m_V - A_V - (m - M)_0, \quad (3)$$

其中 M_V 、 m_V 、 A_V 、 $(m - M)_0$ 分别是星团中红团簇巨星的 V 波段平均绝对星等、平均视星等、消光值及主序拟合法得到的真实距离模数。用式 (3) 计算 I 波段平均绝对星等时只需将 V 替换成 I 。

Sarajedini^[8]最后算出 10 个样本星团红团簇巨星 V 波段、 I 波段的平均绝对星等分别为

$M_V = 0.84$ mag, 弥散为 0.24 mag; $M_I = -0.19$ mag, 弥散为 0.16 mag。Sarajedini^[18]的研究结果还表明从观测上讲 M_V 比 M_I 对金属丰度要敏感得多, 这与理论预言大致符合。

2000 年 Udalski^[11] 研究 284 颗有高分辨率分光金属丰度以及较高精度的 Hipparcos 三角视差 ($\sigma_\pi/\pi < 10\%$) 的红团簇巨星样本, 得到了 I 波段绝对星等与金属丰度之间的关系: $M_I = (0.13 \pm 0.07)([\text{Fe}/\text{H}] + 0.25) + (-0.26 \pm 0.02)$, 样本金属丰度覆盖范围 $-0.6 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.2$ dex。不久, Zhao 等人^[12] 观测了 39 颗 Hipparcos 红团簇巨星样本, 获得了高分辨率、高信噪比的恒星光谱, 通过分析光谱得到了这 39 颗恒星大气的金属丰度。最终他们得到了和 Udalski^[11] 很接近的关系式 $M_I = (0.12 \pm 0.11)([\text{Fe}/\text{H}] + 0.25) + (-0.18 \pm 0.04)$ 。这些结果表明红团簇巨星的 I 波段绝对星等和金属丰度之间的关系很微弱。

2008 年 Groenewegen^[13] 利用 Hipparcos 红团簇巨星以及修正过的 Hipparcos 三角视差, 考虑了多种样本选择, 得到了 I 波段平均绝对星等 (-0.22 ± 0.03) mag, 弥散为 0.20 mag。并且证实样本 I 波段绝对星等与颜色 $(V - I)_0$ 不存在相关性, 与金属丰度之间仅存在微弱的相关性。

2.2 K 波段绝对星等

2000 年 Alves^[15] 首先研究红团簇巨星的 K 波段绝对星等, Alves^[15] 所选用的 238 颗 Hipparcos 红团簇巨星, 有较高精度的三角视差 ($\sigma_\pi/\pi < 10\%$, 平均值相对误差为 5%) 以及可靠的金属丰度值 (典型误差为 0.1 dex)。Alves 最终得到的 K 波段平均绝对星等为 (-1.61 ± 0.03) mag, 弥散为 (0.22 ± 0.03) mag, 绝对 K 星等与金属丰度的关系为: $M_K = (0.57 \pm 0.36)[\text{Fe}/\text{H}] - (1.64 \pm 0.07)$ 。

2002 年 Grocholski 等人^[18] 分析了 14 个中老年疏散星团中红团簇巨星的 K 波段绝对星等, 样本星团的距离模数都是通过主序拟合的方法得到, 绝对 K 星等的计算方法同样如式 (3) 所示。Grocholski 等人^[18] 给出的 14 个疏散星团的平均绝对星等值为 $M_K = (-1.62 \pm 0.06)$ mag, 弥散为 0.21 mag。他们的研究还表明, 比约 2 Ga 年轻的星团红团簇巨星的 K 波段绝对星等对金属丰度不敏感, 但对年龄敏感; 比约 2 Ga 老的则表现出相反的趋势。总的来说, 红团簇巨星 K 波段绝对星等对金属丰度及年龄的敏感程度不如 I 波段明显。

2007 年 Van Helshoecht 等人^[19] 将 Grocholski 等人^[18] 的 14 个星团样本扩大到 26 个, 其中包括 2 个富金属球状星团, 使用与 Grocholski 等人^[18] 同样的计算绝对星等的方法。他们的目的是借助星团的年龄、距离、金属丰度相对比较容易确定的优点, 考察红团簇巨星 K 波段绝对星等受年龄、金属丰度的影响程度。最终 Van Helshoecht 等人^[19] 得到 $M_K(\text{RC}) = (-1.57 \pm 0.05)$ mag, 弥散为 0.25 mag。他们这个值对于金属丰度在 $-0.5 \sim 0.4$ 之间, 年龄在 $10^{8.5} \sim 10^{9.9}$ a 之间的星团都是可信的。也就是说在这个范围内的红团簇巨星的绝对 K 星等受金属丰度、年龄的影响不明显。

2008 年 Groenewegen^[13] 利用 Hipparcos 红团簇巨星以及修正过的 Hipparcos 三角视差, 考虑了多种样本选择, 得到了 K 波段 (2MASS 测光系统) 平均绝对星等 (-1.54 ± 0.04) mag, 弥散为 0.22 mag。样本 K 波段绝对星等与颜色 $(V - K)_0$ 存在微弱相关性, 与金属丰度不存在相关性。

3 红团簇巨星在天体距离测量方面的应用

3.1 太阳到银河系中心的距离

太阳到银河系中心的距离 R_{\odot} 是银河系结构基本参数之一, 它的测定精度对银河系的尺度和结构研究非常重要。银河系内一些天体 (如银河系中心巨分子云) 的质量和光度的估值也与 R_{\odot} 的取值有关, 用以描述银河系较差自转的 Oort 常数的确定与 R_{\odot} 的大小密切相关, 其中常数 A 直接与 R_{\odot} 成正比。在大尺度上, 由于河外星系距离尺度的确立过程涉及对银河系天体某些参量的定标, 因此哈勃常数 H_0 与 R_{\odot} 也是相联系的^[20]。鉴于太阳银心距的重要性, 天文学家曾使用许多不同的方法进行测量, 测量精度也不断提高。由于测量太阳银心距的工作已经很多, 且涉及到多种方法, 本节主要介绍利用红团簇巨星测量太阳银心距方面的工作, 对其它方法感兴趣的读者可以阅读文献 [20]。

1998 年 Paczyński 和 Stanek^[10] 第一次利用 Hipparcos 红团簇巨星和 Baade 窗中的大量红团簇巨星计算了太阳的银心距。Paczyński 和 Stanek^[10] 所用方法的原理并不复杂, 即先挑选出三角视差较准确 (相对误差小于 10%) 的 Hipparcos 红团簇巨星样本, 利用统计方法并考虑星际介质消光得到这些红团簇巨星的 I 波段平均绝对星等, 然后与“光学引力透镜实验”计划 (OGLE) 观测到的 Baade 窗内的红团簇巨星的 I 波段平均视星等 (见图 5) 进行比较 (式 (4)), 得到太阳银心距的距离模数 $(m - M)_{GC} = (14.62 \pm 0.1) \text{ mag}$, 或表示成 $R_{\odot} = (8.4 \pm 0.4) \text{ kpc}$ 。值得一提的是, 由于两个红团簇巨星的样本数量都比较大, 其中 Hipparcos 红团簇巨星样本有大约 600 颗, Baade 窗红团簇巨星样本更大, 大约有 10 000 颗, 因此太阳银心距的距离模数的统计误差很小, 相对误差只有约 1%。Paczyński 和 Stanek^[10] 发展的这种利用红团簇巨星测量距离的方法有重要意义, 这是天文学家第一次得到红团簇巨星的光学波段的绝对星等, 并利用这个绝对星等测量远距离天体的距离, 后来的很多基于红团簇巨星测量距离的工作都是参考这种方法而开展的。公式 (4) 常被用于具体的距离计算:

$$(m - M)_0 = m_{\lambda} - M_{\lambda} - A_{\lambda} + \Delta M_{\lambda} \quad (4)$$

其中 $(m - M)_0$ 、 m_{λ} 、 M_{λ} 、 A_{λ} 、 ΔM_{λ} 分别对应真实距离模数、红团簇巨星某波段的平均视星等、红团簇巨星某波段的平均绝对星等、某波段的消光改正值、星族效应引起的红团簇巨星的平均绝对星等的改正值。

1998 年 Stanek 和 Garnavich^[16] 沿用了 Paczyński 和 Stanek^[10] 的方法但改正了处理 Hipparcos 红团簇巨星消光的方法, 得到太阳银心距的真实距离模数 $(14.57 \pm 0.04 \pm 0.04) \text{ mag}$ (随机误差+系统误差), 或表示成 $R_{\odot} = (8.2 \pm 0.15 \pm 0.15) \text{ kpc}$ 。

2000 年 Alves^[15] 利用 238 个 Hipparcos 红团簇巨星样本确定的 K 波段平均绝对星等 $(-1.61 \pm 0.03) \text{ mag}$ 作为标准烛光, 同时利用了 Tiede 等人^[21] 对 Baade 窗的 K 波段观测数据得到太阳银心距的真实距离模数为 $(14.58 \pm 0.11) \text{ mag}$, 或表示成 $R_{\odot} = (8.24 \pm 0.42) \text{ kpc}$ 。该工作还证实 238 颗样本红团簇巨星的平均金属丰度与 Baade 窗内观测到的红团簇巨星的平均金属丰度很接近。Alves^[15] 认为他得到的太阳银心距的主要误差来源是 Baade 窗中红团簇巨星数量较少。

2006 年 Nishiyama 等人^[22] 利用 IRSF 望远镜装备的 SIRIUS 照相机观测了银心附近

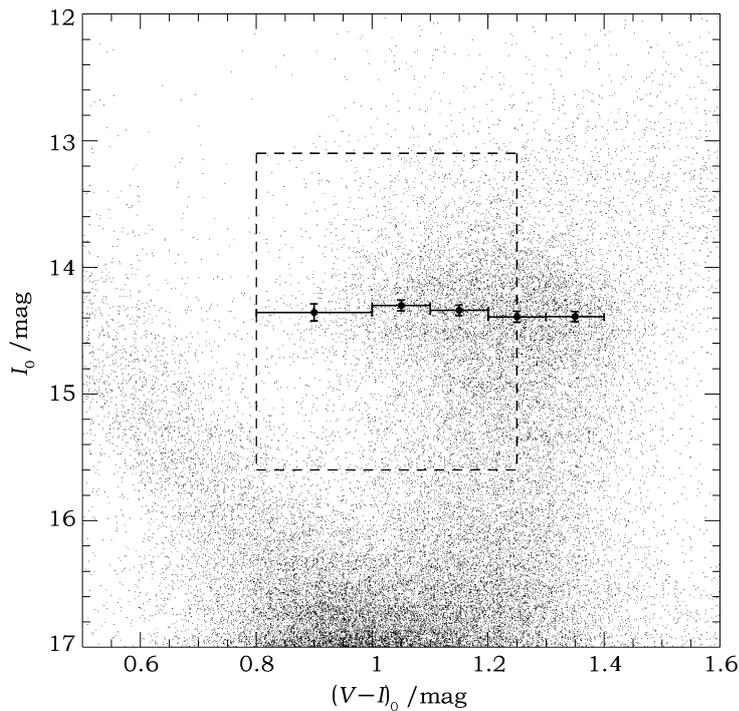


图5 消光改正后的 Baade 窗内红团簇巨星的颜色星等图

虚线矩形框内的红团簇巨星被用来和 Hipparcos 红团簇巨星进行比较求太阳银心距。5 段实线是人为划分 5 个颜色区间中红团簇巨星数密度最高处，每一段颜色区间都用式 (1) 去拟合 (只需将式 (1) 中的绝对星等替换成视星等)，得到平均视星等。图上可以看出平均视星等与颜色的关系不明显^[10]。

$|l| \leq 1^\circ.0$ 以及 $0^\circ.7 \leq |b| \leq 1^\circ.0$ 核球内的恒星，得到了几十万颗恒星在 J 、 H 、 Ks 三个波段的星等值，其中含有相当数量的红团簇巨星。在比较了核球内这些红团簇巨星的平均视星等值和 Alves^[15] 给出的 Hipparcos 红团簇巨星的平均绝对 K 星等后，得到了太阳银心距的真实距离模数为 $(14.38 \pm 0.03 \pm 0.10)$ mag (统计误差+系统误差)，或 $R_\odot = (7.52 \pm 0.10 \pm 0.35)$ kpc。Nishiyama 等人^[22] 仔细分析了误差来源，认为统计误差的主要来源是 Hipparcos 红团簇巨星内禀光度的不确定，而系统误差则是多方面原因的综合表现，包括核球红团簇巨星平均视星等的拟合误差、消光估计误差、测光零点误差及星族效应带来的误差 (高达 0.07 mag)。Nishiyama 等人^[22] 的研究表明 Hipparcos 红团簇巨星与核球红团簇巨星之间的“星族差异”可能是误差的主要来源。Nishiyama 等人^[22] 得到的距离与 Eisenhauer 等人^[23] 利用银河系中心大质量黑洞附近的恒星运动轨迹算出的距离 $R_\odot = (7.62 \pm 0.32)$ kpc 符合得很好。需要说明的是，Eisenhauer 等人^[23] 的方法是一种纯粹的几何测量方法，不需要依赖物理假设，减少了不确定因素，且所得结果的相对误差好于 5%。

表 1 列出了近十多年来基于红团簇巨星的太阳银心距的主要测量结果。

3.2 银河系中心的棒结构

因为太阳在银河系中所处的特殊位置，银心方向严重的消光以及拥挤的核球恒星与前景

表 1 基于红团簇巨星的太阳银心距的主要测量结果

序号	距离模数/mag	R_{\odot}/kpc	发表年份	参考文献	备注
1	14.62 ± 0.1	8.4 ± 0.4	1998	[10]	光学 I 波段
2	$14.57 \pm 0.04 \pm 0.04$	$8.2 \pm 0.15 \pm 0.15$	1998	[16]	光学 I 波段
3	14.58 ± 0.11	8.24 ± 0.42	2000	[15]	近红外 K 波段
4	$14.38 \pm 0.03 \pm 0.10$	$7.52 \pm 0.10 \pm 0.35$	2006	[22]	近红外 K 波段

盘星之间的投影混淆使得天文学家对银河系中心区结构的研究一直存在困难。早在 1964 年 de Vaucouleurs^[24]就注意到银河系内区的中性氢 HI 呈现某种非圆周运动特征, 有着与棒旋星系中观测到的非圆运动径向速度类似的特性, 据此他认为银河系可能是个棒旋星系。最近十几年, 有关银河系中心棒结构的研究进展比较大, 其中红团簇巨星起到了重要的作用, 因为红团簇巨星内禀光度的弥散很小, 能产生足够的分辨率。目前银河系是一个棒旋星系已经得到天文学家的普遍认同。本节只介绍红团簇巨星在银河系内区棒结构研究中所起的独特作用, 想更详细地了解银河系内区棒结构研究进展的读者可阅读 2009 年 Zhao^[25]的综述性文章。

1994 年 Stanek 等人^[26]首次利用红团簇巨星来研究银河系核球的结构, 他们从 OGLE (光学引力透镜实验) 计划的观测数据中, 提取出 13 个视场, 共包含有 5×10^5 颗恒星的测光数据, 每个视场有几千颗红团簇巨星。这 13 个视场中有 9 个位于 Baade 窗内, Baade 窗内的红团簇巨星用于定标, 其余 4 个视场各有两个分别位于银心两侧 $l \approx \pm 5^\circ$ 的位置。他们发现位于银心两侧视场内的红团簇巨星消光改正后的视星等相差 (0.37 ± 0.03) mag, 如果承认红团簇巨星的内禀光度一样, 这表明银心两侧视场离开太阳的距离不一样, 远端的距离是近端的 (1.185 ± 0.015) 倍。Stanek 等人^[26]认为比较合理的解释是银河系核球是一个三轴结构或者是棒结构, 棒的长轴与银心视线的夹角不超过 45° , 银经为正的那一端更靠近太阳。

1997 年 Stanek 等人^[27]利用 OGLE 计划得到的遍及核球区的 12 个场中多达 7×10^5 颗恒星的观测数据, 从这些恒星的测光资料中他们很容易证认出红团簇巨星, 对这些红团簇巨星进行更为仔细的分析, 发现棒的主轴与银心视线的夹角在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 并且三轴结构的轴比为 $3.5 : 1.5 : 1$, 为棒的结构提供了更严格的约束。

2005 年 Nishiyama 等人^[28]使用 IRSF 望远镜及 SIRIUS 近红外照相机, 对银纬 $-10^\circ.5 \leq l \leq 10^\circ.5$, $b = 1^\circ$ 的一个长条带天区进行扫描观测, 得到这一区域的恒星的红外测光数据。他们发现红团簇巨星的视星等峰值位置随银经连续变化, 从 $l = -10^\circ$ 处的 13.4 mag 减小到 $l = 10^\circ$ 处的 12.2 mag, 这一现象可以用存在棒结构来解释。Nishiyama 等人^[28]也同时发现, $-4^\circ \leq l \leq 4^\circ$ 这个区域, 视星等峰值位置随银经的变化趋势要平缓得多, 变化只有约 0.1 mag, 因此他们认为这一区域还存在一种未知的次结构。同样是 2005 年, Babusiaux 和 Gilmore^[29]利用深度近红外测光数据分析了银河系的棒以及内盘结构, 再次证实了三轴结构的存在。他们得到的棒主轴和银心视线的夹角为 $22^\circ \pm 5^\circ.5$, 推测出棒的半长轴长度大概是 2.5 kpc, 轴比率很小。Babusiaux 和 Gilmore^[29]同样认为可能存在第 2 个结构成分, 但并未确定该结构的本质。

2007 年 Rattenbury 等人^[30]利用 OGLE-II 微透镜巡天计划在 44 个核球区域观测到的红团簇巨星作为示踪天体,分析了棒的结构,他们得到棒的主轴与太阳-银心连线的夹角为 $24^\circ \sim 27^\circ$,轴比为 $10:3.5:2.6$ 。同一年, Cabrera-Lavers 等人^[31]使用红团簇巨星作为示踪天体并以 2MASS 观测资料恒星计数,分析了距银河系中心 5 kpc 以内的结构。他们发现两个非常不同的三轴结构共存在这一区域,一个长且细的恒星棒被限制在银道面附近 $|b| < 2^\circ$ 范围内,棒的位置角为 $43^\circ.0 \pm 1^\circ.8$,棒的标高大约 100 pc;在银道附近 $|b| \leq 7^\circ.5$ 的范围内存在一个三轴核球,位置角为 $12^\circ.6 \pm 3^\circ.2$,其标高比棒的标高要大 5 倍。

2008 年 Cabrera-Lavers 等人^[32]利用 UKIDSS-GPS (United Kingdom Infrared Deep Sky Survey-Galactic Plane Survey) 计划第三次释放的数据,这也是当时研究银心处恒星分布最理想的近红外观测数据。他们提取出红团簇巨星作为示踪天体来分析银河系内区的结构,再次证实了银河系内区存在两个不同的结构,其中一个比较厚的核球状结构从银心一直延伸到 $l = 10^\circ$ 位置,位置角为 $23^\circ.60 \pm 2^\circ.19$;另一个棒状结构则从 $l \leq 10^\circ$ 处一直延伸到 $l = 28^\circ$ 附近,其位置角为 $42^\circ.44 \pm 2^\circ.14$ 。

3.3 大麦哲伦云的距离

大麦哲伦云 (LMC) 是距离银河系最近的一个不规则矮星系,准确地测量它的距离是迈出宇宙尺度阶梯的基础性一步。LMC 距离的测量精度对基于造父变星周光关系的河外星系距离的测量,甚至哈勃常数的准确测量都有影响^[33]。鉴于 LMC 距离测量的重要性,已经有很多天文学家用各种方法测量过 LMC 的距离^[33],本节只对利用红团簇巨星测量 LMC 距离的工作做一些介绍。

1998 年 Udalski 等人^[34]利用 OGLE-II 计划的光学波段观测资料,使用 Paczyński 和 Stanek^[10]提出的红团簇巨星测距法,分析了 LMC 中有代表性的 4 个不同区域红团簇巨星的平均视星等,根据这 4 个区域的平均视星等算得的 LMC 距离彼此符合得很好,并且最终得到 LMC 的一个总距离模数为 $(18.08 \pm 0.03 \pm 0.12) \text{ mag}$ (统计误差+系统误差),因为红团簇巨星的数目总计有 20 000 多颗,因而结果的统计误差比较小,系统误差的主要来源是消光值的不确定。这个结果与当时已有的利用天琴座 RR 型变星以及利用超新星 SN1987A 光回波 (light echo) 测得的结果比较一致,但是这个结果比已有的普遍接受的值 $(18.50 \pm 0.15) \text{ mag}$ ^[35]小约 0.4 mag,距离小约 15%,并且他们同时测得的小麦哲伦云 (SMC) 距离模数也小约 0.4 mag。Udalski 等人^[34]分析了造成这种系统性偏小的可能原因,先后排除了测光零点偏差,消光值的高估,以及年龄、化学成分的差异即“星族效应”(population effects) 三种可能性。他们认为很可能是先前利用造父变星测得的距离模数被高估了约 0.4 mag。但是 Udalski 等人^[34]强调“星族效应”需要引起重视,必须在理论和观测两方面进行更深入的研究。

不久, Stanek 等人^[36]的工作得到了与 Udalski 等人^[34]相似的结论。Stanek 等人^[36]用与 Udalski 等人^[34]类似的方法,基于 Stanek 和 Garnavich 得到的 Hipparcos 红团簇巨星的光学绝对星等^[16],他们得到的 LMC 距离模数为 $(18.065 \pm 0.031 \pm 0.09) \text{ mag}$ (统计误差+系统误差),或表示成距离 $R_{LMC} = (41.02 \pm 0.59 \pm 1.74) \text{ kpc}$ 。Stanek 等人^[36]认为他们自己的结论与 Udalski 等人^[34]的结论符合得很好,但是依然存在比用变星测得的 LMC 距离模数小约 0.4 mag 的问题。Stanek 等人^[36]认为存在着几种可能性: LMC 中恒星的形成历史比较复杂,“星族效应”依

然可能存在; 其次造父变星样本太少也可能是一个原因, 有较好的 Hipparcos 视差的造父变星数量太少使得周光关系存在较大的不确定性; 另外, 造父变星的周光关系受消光、金属丰度、统计方法等的影响也可能是必须考虑的因素。

同样在 1998 年 Cole^[37] 利用红团簇巨星的演化模型得到了 LMC 中红团簇巨星的绝对星等, 结合 Udalski 等人^[34] 的观测数据, 得到 LMC 的距离模数为 (18.36 ± 0.17) mag。Cole^[37] 认为红团簇巨星的“星族效应”必须考虑, 很可能 Udalski 等人^[34] 以及 Stanek 等人^[36] 的工作就是因为没有考虑“星族效应”的影响才导致 15% 的偏小。Cole^[37] 的工作表明不同的星族由于年龄、金属丰度的差异, 最多可导致红团簇巨星的 I 波段平均绝对星等相差 0.6 mag。

1998 年 Girardi 等人^[4] 运用星族合成的方法模拟 LMC 中红团簇巨星的颜色星等图以及光度函数, 并得到 LMC 的距离模数为 (18.28 ± 0.14) mag。他们发现红团簇巨星的 I 波段平均绝对星等对于不同星族来说并不是常数, 而是和金属丰度相关, 平均金属丰度低的星系的红团簇巨星 I 波段平均星等系统性地偏亮。他们认为把红团簇巨星当标准烛光使用的前提是需要搞清楚所要测量的星族内的红团簇巨星与 Hipparcos 红团簇巨星之间的差异, 并指出 Udalski 等人^[34] 以及 Stanek 等人^[36] 之所以得到了偏小 15% 的距离很可能就是这个原因。

2000 年 Udalski^[11] 再次用红团簇巨星测量了 LMC 的距离。这次考虑了 I 波段光度与金属丰度的关系, 幸运的是太阳邻近的红团簇巨星的金属丰度分布较广 ($-0.6 \sim 0.2$ dex), 部分地覆盖了 LMC 中红团簇巨星的金属丰度 ($-0.7 \sim -0.35$ dex)。由于他们所观测的 LMC 的 9 个场区中平均金属丰度为 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.55$, 对由 Hipparcos 红团簇巨星得到的绝对星等与金属丰度关系进行插值, 可以获得金属丰度值为 $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.55$ 时 LMC 中红团簇巨星所对应的平均绝对星等, 再与 LMC 中红团簇巨星的视星等比较算得 LMC 的距离模数为 (18.24 ± 0.08) mag。同样是在 2000 年, Romaniello 等人^[38] 利用哈勃望远镜的 WFPC2 观测 LMC 中一块以 SN1987A 为中心半径约为 $2'$ 的天区, 获得这一块天区内大量恒星的深度多色测光。他们用红团簇巨星和红巨星支上端 (tip of red giant branch) 两种标准烛光天体来确定这一天区的距离, 在仔细分析该天区的星际消光后, 得到两个对应的距离 $(18.59 \pm 0.04 \pm 0.08)$ mag (统计误差+系统误差) (利用红团簇巨星), $(18.69 \pm 0.25 \pm 0.06)$ mag (统计误差+系统误差) (利用 TRGB)。并且他们在 3σ 水平上排除了 LMC 距离模数小于 18.43 mag 的可能性。值得一提的是 Romaniello 等人^[38] 的工作也是充分考虑了红团簇巨星的“星族效应”的。

2002 年 Alves 等人^[39] 利用 V 、 I 、 K 三个波段测光分析了 LMC 中的红团簇巨星, 这是近红外 K 波段测光首次被用于分析 LMC 的红团簇巨星。对比 LMC 中红团簇巨星与太阳邻近红团簇巨星的光度函数分布, 并考虑到星族效应带来的影响后, Alves 等人^[39] 得到了 LMC 的真实距离模数为 (18.493 ± 0.033) mag, 或者表示成距离 (49.96 ± 0.77) kpc。2002 年 Pietrzyński 和 Gieren^[40] 利用欧南台 (ESO) 的新技术望远镜获得 LMC 中两个区域恒星的深度近红外 J 、 K 波段观测资料, 其中有几百颗被证认出是红团簇巨星。他们使用 Alves^[15] 给出的 Hipparcos 红团簇巨星 K 波段绝对星等, 在不考虑“星族效应”的情况下得到 LMC 的距离模数 $(18.487 \pm 0.08 \pm 0.045)$ mag (统计误差+系统误差), 他们的研究还表明 K 波段“星族效应”的影响非常微弱。

2002 年 Sarajedini 等人^[41] 利用近红外 J 、 K 波段观测 LMC 中两个星团 Hodge 4 和 NGC

1651, 他们所用的红团簇巨星 K 波段绝对星等取自 Grocholski 等人^[18]的工作, 考虑年龄以及金属丰度对红团簇巨星 K 波段绝对星等的影响后, 得到这两个星团距离模数分别是为 (18.52 ± 0.17) mag 和 (18.55 ± 0.12) mag, 其平均值就是 LMC 的距离模数 (18.54 ± 0.10) mag。由于星团中红团簇巨星的数目相对较少, 因此精度稍差。

2007 年 Grocholski 等人^[42]观测 LMC 中 17 个星团, 测量这些星团中红团簇巨星的 K 波段平均视星等, Grocholski 等人^[42]并没有利用 Hipparcos 红团簇巨星绝对星等作为他们估算 LMC 距离模数的基础, 也没有像 Grocholski 和 Sarajedini^[18]工作中那样, 利用多个已有可靠主序拟合距离的疏散星团, 根据红团簇巨星的视星等来计算其绝对星等。Grocholski 等人^[42]完全借助于 Girardi 和 Salaris^[14]的恒星演化理论模型, 该模型覆盖的年龄、金属丰度范围很广, 刚好可以弥补疏散星团金属丰度覆盖范围窄的欠缺, 比较适合用在 LMC 的星团中。并且 Girardi 和 Salaris^[14]的理论模型在疏散星团样本上已经得到了很好的验证^[18]。根据这 14 个星团的距离, 再结合 LMC 的形状结构, Grocholski 等人^[42]得到 LMC 中心位置的距离模数为 $(18.40 \pm 0.04 \pm 0.08)$ mag (随机误差+系统误差), 或 $R_{\odot} = (47.9 \pm 0.9 \pm 1.8)$ kpc。Grocholski 等人^[42]的结果与 Cole^[37]的结果很接近, 并且方法上也类似, 都是用恒星演化模型得到红团簇巨星的绝对星等, 考虑“星族效应”的影响。

最近 Koerwer^[43]使用 IRSF (Infraed Survey Facility) MCPSC (Magellanic Clouds Point-Source Catalog) 提供的 J 、 H 两个近红外波段的观测资料挑选出红团簇巨星样本, 并计算 LMC 红团簇巨星 H 波段的平均视星等, 再结合根据星族合成方法得到的 H 波段绝对星等, 得到 LMC 的距离模数 (18.54 ± 0.06) mag, 或表示成距离 $R_{\odot} = (51.1 \pm 1.4)$ kpc。Koerwer^[43]在利用星族合成方法得到红团簇巨星的绝对星等过程中, 考虑了恒星形成历史 (SFH)、恒星形成率 (SFR) 以及年龄金属丰度关系 (AMR) 的因素, 最大限度地减少了“星族效应”带来的系统性误差。

表 2 列出了近十多年来以红团簇巨星为标准烛光所测得的 LMC 距离模数。总体上可以看出这样的趋势: 由最初的光学波段测量向近红外波段过渡, 测量精度逐渐提高, 对“星族效应”日趋合理的估计使测得的距离模数有所增大。这种趋势在一定程度上反映了天文学家对红团簇巨星绝对星等的认识在逐步深入。

4 总结和展望

理论和观测的研究均表明红团簇巨星是一类比较有应用前景的“标准烛光”天体, 但是在使用它作为标准烛光来测量天体距离的时候, 需要充分考虑到“星族效应”可能带来的影响。研究似乎也表明近红外 K 波段的星等比光学波段受“星族效应”的影响要小, 受消光的影响也小。另外红团簇巨星数量多, 可以减少由于样本数量少而带来的统计误差。正如 Paczyński 和 Stanek^[10]在他们文章中提到的那样, 任何基于恒星 (原文如此, 此处理解为标准烛光更恰当) 的距离测量都面临 4 个困难:

- (1) 测得距离的精度依赖于本地此类恒星的绝对星等的精确度;
- (2) 星际介质消光的准确测定;

表 2 基于红团簇巨星的 LMC 距离的主要测量结果

序号	距离模数/mag	发表年份	参考文献	备注
1	$18.08 \pm 0.03 \pm 0.12$	1998	[34]	光学I波段
2	$18.065 \pm 0.031 \pm 0.09$	1998	[36]	光学I波段
3	18.36 ± 0.17	1998	[37]	光学I波段
4	18.28 ± 0.14	1998	[4]	光学I波段
5	18.24 ± 0.08	2000	[11]	光学I波段
6	$18.59 \pm 0.04 \pm 0.08$	2000	[38]	光学I波段
7	18.493 ± 0.033	2002	[39]	近红外K波段
8	$18.487 \pm 0.08 \pm 0.045$	2002	[40]	近红外K波段
9	18.54 ± 0.10	2002	[41]	近红外K波段
10	$18.40 \pm 0.04 \pm 0.08$	2007	[42]	近红外K波段
11	18.54 ± 0.06	2009	[43]	近红外H波段

(3) 参考星与被测量星的质量、年龄以及化学成分的差异可能会带来内禀光度的差异, 即“星族效应”;

(4) 如果样本数量小, 统计误差就大。

而红团簇巨星是唯一不受第 4 个困难限制的“标准烛光”^[10]。银河系的核球、LMC、SMC、M31 中都存在大量的红团簇巨星, 因此利用红团簇巨星来测量它们的距离比较理想。相比而言变星就少得多, 有 Hipparcos 视差的变星数量很少, 并且确定变星的周光关系也比测量红团簇巨星的星等更复杂。因此不难理解, 1997 年依巴谷天体测量卫星的数据公布以后, 对红团簇巨星的绝对星等以及利用红团簇巨星测量距离的研究随即多起来, 并且取得了很大的进展。

近 10 年有关红团簇巨星的研究文献主要集中在两个方向: 一是对红团簇巨星的绝对星等进行测定, 也即回答标准烛光有多标准的问题, 观测和理论两方面都在进行; 另一个方向就是利用红团簇巨星测量各种天体的距离, 涉及到太阳银心距、银河系中心棒的结构、星团、SMC、LMC 以及 M31。可以预见, 随着观测技术的进步, 红团簇巨星的观测数据会越来越多, 红团簇巨星的绝对星等会测量得更加准确。更多有更高精度三角视差、测光、金属丰度的红团簇巨星, 无疑将会对红团簇巨星的绝对星等测定起到极大的推动作用, 而且可以更好地验证现有的恒星演化理论对“星族效应”的预言, 从而推动恒星演化理论的发展。计划于 2012 年发射的 GAIA 卫星将提供微角秒量级的天体测量精度, 预计亮度在 $G = 15$ 、 20 、 20 mag 附近的恒星, 对应的位置精度分别可达到 10、20、100 微角秒^[44]。这意味着可将三角视差相对精度 10% 的范围从 Hipparcos 的太阳周围 100 pc 扩展到银河系中心^[45], 届时红团簇巨星绝对星等的测量精度将会有大幅提高。红团簇巨星绝对星等测量精度的提高将会深化人类对恒星演化、银河系结构、宇宙尺度等一系列基本问题的认识。

参考文献:

- [1] 向守平. 天体物理概论. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 67
- [2] Cannon R. D. MNRAS, 1970, 150: 111
- [3] 黄润乾. 恒星物理. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 239
- [4] Girardi L, Groenewegen M A T, Weiss A, et al. MNRAS, 1998, 301: 149
- [5] Cutri R M, Skrutskie M F, van Dyk S, et al. The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive. <http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Gator/>, 2003
- [6] Perryman M A C, Lindegren L, Kovalevsky J, et al. A&A, 1997, 323: L49
- [7] Alves D R, Sarajedini A. ApJ, 1999, 511: 225
- [8] Sarajedini A. AJ, 1999, 118: 2321
- [9] Chen Y Q, Zhao G, Zhao J K. ApJ, 2009, 702: 1336
- [10] Paczynski B, Stanek K Z. ApJ, 1998, 494: L219
- [11] Udalski A. ApJ, 2000, 531: L25
- [12] Zhao G, Qiu H M, Mao S. ApJ, 2001, 551: L85
- [13] Groenewegen M A T. A&A, 2008, 488: 935
- [14] Girardi L, Salaris M. MNRAS, 2001, 323: 109
- [15] Alves D R. ApJ, 2000, 539: 732
- [16] Stanek K Z, Garnavich P M. ApJ, 1998, 503: L131
- [17] Kaluzny J, Wysocka A, Stanek K Z, et al. Acta Astronomica, 1998, 48:439
- [18] Grocholski A J, Sarajedini A. AJ, 2002, 123: 1603
- [19] van Helshoecht V, Groenewegen M A T. A&A, 2007, 463: 559
- [20] 赵君亮. 天文学进展, 2009, 27: 229
- [21] Tiede G P, Frogel J A, Terndrup D M. AJ, 1995, 110: 2788
- [22] Nishiyama S, Nagata T, Sato S, et al. ApJ, 2006, 647: 1093
- [23] Eisenhauer F, Genzel R, Alexander T, et al. ApJ, 2005, 628: 246
- [24] de Vaucouleurs G. The Galaxy and the Magellanic Clouds, Frank J K, ed. IAUS 20, 1964: 195
- [25] 赵君亮. 天文学进展, 2009, 27: 116
- [26] Stanek K Z, Mateo M, Udalski A, et al. ApJ, 1994, 429: L73
- [27] Stanek K Z, Udalski A, Szymanski M, et al. ApJ, 1997, 477: 163
- [28] Nishiyama S, Nagata T, Baba D, et al. ApJ, 2005, 621: L105
- [29] Babusiaux C, Gilmore G. MNRAS, 2005, 358: 1309
- [30] Rattenbury N J, Mao S, Sumi T, et al. MNRAS, 2007, 378: 1064
- [31] Cabrera-Lavers A, Hammersley P L, González-Fernández C, et al. A&A, 2007, 465: 825
- [32] Cabrera-Lavers A, González-Fernández C, Garzón F, et al. A&A, 2008, 491: 781
- [33] Alves D R. New Astronomy Review, 2004, 48: 659
- [34] Udalski A, Szymanski M, Kubiak M, et al. Acta Astronomica, 1998, 48: 1
- [35] Madore B F, Freedman W L. ApJ, 1998, 492: 110
- [36] Stanek K Z, Zaritsky D, Harris J. ApJ, 1998, 500: L141
- [37] Cole A A. ApJ, 1998, 500: L137
- [38] Romaniello M, Salaris M, Cassisi S, et al. ApJ, 2000, 530: 738
- [39] Alves D R, Rejkuba M, Minniti D, et al. ApJ, 2002, 573: L51
- [40] Pietrzynski G, Gieren W. AJ, 2002, 124: 2633
- [41] Sarajedini A, Grocholski A J, Levine J, et al. AJ, 2002, 124: 2625
- [42] Grocholski A J, Sarajedini A, Olsen K A G, et al. AJ, 2007, 134: 680
- [43] Koerwer J F. AJ, 2009, 138: 1
- [44] Brown A G A. Classification and Discovery in Large Astronomical Surveys, AIPC, 2008, 1082: 209
- [45] Binney J. arXiv: 0911. 2661, 2009

Absolute Magnitude of the Red Clump and its Applications in Distance Determination

GAO Xin-hua^{1,2}, CHEN Li^{1,3}, HOU Jin-liang¹, ZHAO Jun-liang¹

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory for Research, Shanghai 200234, China)

Abstract: Red clump giants are intermediate-age core helium-burning stars. Theoretical models predict that their luminosities weakly depends on their age and chemical composition. Small variance in intrinsic luminosities and weakly dependence on chemical composition and age make them an extremely useful distance indicators.

Accurate parallaxes for several hundred red clump giants in the solar neighborhood provided by Hipparcos satellite have been used to estimate the mean absolute *I*-band and *K*-band magnitudes. Several *I*-band and *K*-band mean absolute magnitudes have been reported based on local red clump giants and the dependence on metallicity and color have also been investigated. Accurate distance to the Galactic center, local group, and some star clusters in our Galaxy have been measured using red clump giants as reliable standard candles. By using the red clump giants population as a tracer of inner Galaxy, some researchers have analysed the structure of the bar.

As all stellar distance indicators, the main worry for red clump giants lies in the possible population effects. Several studies have indicated that the luminosity dependence of the red clump giants on age and metallicity can cause significant difference in mean absolute magnitude between different stellar populations.

More red clump giants with accurate parallaxes, high-quality photometry and reliable metallicities are needed to calibrate the mean absolute magnitude and the population effects. In the near future the GAIA astrometric data (position and distance), photometric data (luminosity), and spectroscopic data (metallicity, distance and extinction), will resolve this ambiguity.

Key words: red clump giant; absolute magnitude; standard candle