

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.03

# M31 中的恒星观测与研究进展

李承东, 赵 刚

(中国科学院 光学天文重点实验室, 北京 100012)

**摘要:** 仙女座星系又称 M31, 是本星系群中最大的旋涡星系, 它距离我们银河系约 770 kpc。M31 的累积视星等为 3.44 mag, M31 中的恒星数量大约为  $10^{12}$  个。简要回顾了对 M31 当中恒星观测的发展历程, 介绍了 M31 本地观测坐标系的建立和 M31 成员星的证认方法; 总结了近年来在 M31 恒星观测上的进展并分析了其中的一些成果; 最后讨论了未来的可行科学目标和 LAMOST 巡天计划在 M31 恒星观测方面可以做的。

**关 键 词:** M31; 测光; 光谱; 恒星

**中图分类号:** P152      **文献标识码:** A

## 1 引 言

仙女座星系又称 M31, 是本星系群中最大的旋涡星系。它距离我们银河系约 770 kpc<sup>[1]</sup>, 并且以 300 km/s<sup>[2]</sup> 的速度向我们靠近。迄今为止, 天文学家对 M31 自行的观测和计算还在尝试阶段。M31 的累积视星等为 3.44 mag<sup>[3]</sup>, 是肉眼可见最远的深空天体。2006 年, Spitzer 望远镜的观测数据显示, M31 中的恒星数量大约为  $10^{12}$  个, 远比我们银河系多。M31 与银河系是本星系群中最大的两个旋涡星系, 在物理性质和结构组成方面都有一定的相似度, 对 M31 进行观测可以帮助我们更深入地了解银河系。因此, 对于 M31 中的恒星观测从几十年前就已经开始进行。

由于设备和条件的限制, 早期对 M31 的单颗恒星进行观测较为困难。观测目标一般都定为 M31 的某一块区域或是发射线星云, 比如 Baade 和 Arp 关于 M31 中发射线星云的观测<sup>[4]</sup>, 在这项研究中, 他们提出了将恒星的赤经赤纬坐标转化成标准坐标, 再转换成以 M31 盘平面为标准平面的直角坐标。这一方法在后来的研究中得到了进一步的发展和多次应用。1979 年, Humphreys 对 Baade 观测的第四块区域进行分析, 发现所观测到的几颗亮星无论是光谱和亮度, 还是在赫罗图 (Hertzsprung-Russel diagram) 中的位置, 都与对银河

收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2013-10-15

资助项目: 国家自然科学基金 (11233004, 11390371)

通讯作者: 赵刚, gzha@nao.cas.cn

系旋臂进行的观测所得到的结果类似。这也就说明 M31 旋臂上星族 I 的恒星与我们银河系类似区域的恒星演化过程是相似的<sup>[5]</sup>。这一结论逐渐燃起了天文学家们对 M31 恒星成分的兴趣。

进入 20 世纪 80 年代, 随着望远镜技术的发展, M31 数量庞大的恒星成分和单颗恒星个体性质吸引了更多天文学家的关注, 导致在 20 世纪 80 年代爆发了研究 M31 中恒星的热潮。1983 年, Moffat 和 Shara<sup>[6]</sup> 的研究工作中记录了 20 余颗 M31 中的 Wolf-Rayet 星, 这也是最早对 M31 中恒星的观测之一。1987 年, 他们在后续工作中指出: Wolf-Rayet 星主要集中在距离 M31 中心 7~12 kpc 恒星形成较活跃的环带内<sup>[7]</sup>。同样在 20 世纪 80 年代中期, Massey 等人也把目标放在了 M31 当中的高亮度大质量恒星上<sup>[8]</sup>。1988 年, Berkhuijsen 等人给出了 M31 天区的亮星星表, 在这个星表中包含  $10^4$  余颗恒星<sup>[9]</sup>。他们根据这个星表进行的观测, 讨论了 M31 中 OB 型星的光度函数和分布<sup>[10]</sup>, 并且分别提出了用光谱<sup>[11]</sup> 和色指数<sup>[10]</sup> 的方法来区别 M31 中的恒星和银河系的前景矮星。

20 世纪 90 年代, M31 中的恒星观测工作进一步得到发展, 区分 M31 成员星和银河系前景星的方法也逐渐完备。1992 年, Magnier 等人用 BVRI<sup>[12]</sup> 四色测光的方法观测了 M31 天区中 1 平方度的 361 281 颗恒星并制作了星表。20 世纪 90 年代中后期, M31 中的恒星观测工作主要集中在观测大质量高亮度恒星<sup>[13]</sup>; 在验证是否为 M31 成员星方面, 采用了测光与光谱相结合的方法来区分 M31 成员星和银河系前景星<sup>[14]</sup>。1995 年, Brewer 等人在对 M31 晚型星的观测中, 根据光谱验证出了一些 M31 中的 M 型星、C 星和 Li 星<sup>[15]</sup>。

21 世纪, 随着观测技术的发展, 对 M31 中超巨星进行高分辨率光谱观测已经成为可能。Venn 等人首次采用高分辨率光谱数据给出了 M31 中 4 颗 A-F 超巨星的化学元素丰度, 并与之前对发射星云观测给出的氧丰度进行了比较<sup>[16]</sup>, 初步验证了氧丰度梯度。2001 年, Smartt 等人使用高分辨率光谱观测了 OB10-64 星协中的一颗 B 型超巨星, 并且用非局部热动平衡 (NLTE) 来分析这颗恒星的大气参数<sup>[17]</sup>。2002 年, Trundle 等人利用中等分辨率光谱观测, 得到 7 颗 M31 中的 B 型超巨星的元素丰度, 然后对其中 1 颗恒星进行了非局部热动平衡分析, 并且在整合了前人的观测基础之后作出了氧丰度径向变化的趋势图<sup>[18]</sup>。几项利用 KECK 望远镜对 M31 中恒星的观测工作也随后展开。2004 年, Reitzel 和 Guhathakurta 对 M31 中大质量球状星团 G1 附近的红巨星进行了观测, 引入了采用视向速度来证认恒星是否为 M31 成员星的方法<sup>[19]</sup>。他们随后利用 KECK 望远镜对 M31 南部的超大星流 (Great Southern Stream)<sup>[20]</sup> 进行了多次的观测<sup>[21]</sup>, 并且在 2006 年提出了新的证认 M31 成员星的方法<sup>[22]</sup>。2001 年, 本星系群巡天项目 (Local Group Galaxies Survey) 启动, 其科学目标是了解更多的关于我们身边星系的性质, 作为本星系群中最大的旋涡星系, M31 自然是主要目标, 图 1 给出本星系群巡天工作中 M31 天区的视场。2007 年, 根据本星系群巡天的工作结果, Massey 等人发布了 M31 的星表, 其中恒星的数目约为 37 万颗<sup>[23]</sup>, 是迄今为止最全面的 M31 的恒星星表。在 M31 成员星的证认方面, 他们同时采用了两种方式——视向速度同恒星在 M31 盘平面上的投影位置的关系与用色指数区分矮星和巨星<sup>[24]</sup>, 使得 M31 成员星判定的精确度有效地提高。2009 年, Caldwell 等人发现, 在 M31 南部的超大星流附近一颗恒星的视向速度为  $-780 \text{ km/s}$ <sup>[25]</sup>。



图 1 本星系群巡天工作中 M31 的视场<sup>[23]</sup>  
沿 M31 长轴方向覆盖了面积 2.2 平方度的天区。

第 2 章叙述 M31 本地观测坐标系统的建立, 第 3 章主要讨论 M31 成员星证认过程的发展, 第 4 章总结在测光和光谱两方面迄今所得到的一些成果, 最后讨论 LAMOST 巡天计划与 M31 有关的工作和今后对 M31 观测的一些想法。

## 2 M31 本地观测坐标系的建立与发展

研究 M31 的结构与运动学性质, 采用 M31 本地系统坐标系进行计算较为方便, 画出的观测目标位置图也较为直观。1964 年, 在对发射星云观测过程中, Baade 和 Arp 首先采用了 M31 本地坐标系<sup>[4]</sup>进行测量与计算。他们首先在每个区域内选取 3 颗标准星, 然后测量连同 3 颗标准星在内每个区域恒星的  $x, y$  坐标值。他们根据星表查找 3 颗标准星的赤经和赤纬, 并将赤经赤纬  $\alpha, \delta$  转换成标准坐标 (standard coordinates)  $\xi, \eta$ , 再将所得到的值代入下述方程组<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \xi = ax + by + c \\ \eta = \alpha x + \beta y + \gamma \end{cases} \quad (1)$$

求解这个方程组可以得到  $a, b, c$ , 和  $\alpha, \beta, \gamma$  这 6 个参数的值。最后把待测目标的  $x, y$  坐标值代入已知参数的方程组就可以求得标准坐标。为了得到恒星在以 M31 盘平面为基准面的观测坐标系 (observed coordinates) 中的坐标, 需要将标准坐标系进行旋转, M31 的盘平面在天空中的方位角约为  $38^\circ$ <sup>[26]</sup>。M31 的观测坐标系  $X, Y$  与标准坐标系  $\xi, \eta$  的关系如下面方程组所示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} X = \xi \cos \theta + \eta \sin \theta \\ Y = -\eta \cos \theta + \xi \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2) 可解出  $X$  和  $Y$  的值, 即以 M31 的盘平面为基准面的观测坐标系的坐标值; 其中方位角  $\theta = 38^\circ$ ,  $X$  的方向沿 M31 长轴,  $Y$  的方向沿短轴。这个坐标系使用 M31 系统的视角来对其性质进行研究, 方便而又简明, 在后续的工作与研究中得到了很多的应用与进一步的发展。

1970 年, Rubin 和 Ford 通过观测 M31 发射线星云光谱计算旋转曲线的研究利用了 M31 观测坐标系<sup>[27]</sup>的特性, 将发射线星云的视向速度与其在 M31 盘上的圆周运动速度联系在一起, 得:

$$V_{\text{obs}} - V_c = V(R) \sin \xi \cos \theta + E(R) \sin \xi \sin \theta , \quad (3)$$

其中  $V_{\text{obs}}$  是观测目标的视向速度,  $V_c$  是 M31 相对于银河系运动的系统速度, 一般取  $-300 \text{ km/s}$ <sup>[2]</sup>,  $V(R)$  表示观测目标在 M31 盘平面上的圆周运动速度,  $E(R)$  表示观测目标垂直于 M31 盘平面的膨胀运动速度,  $\xi$  是视线方向与 M31 盘平面垂线方向的夹角。在观测坐标系中,  $\theta$  是观测点所在位置到 M31 中心的连线与长轴方向所成的夹角, 即:  $\cos \theta = X/R$ 。他们假设所有的运动都被约束在 M31 的盘平面上, 即膨胀运动是不存在的,  $E(R) = 0$ 。那么由视向速度计算观测目标在 M31 盘上圆周运动的速度就可以由下式给出:

$$V_{\text{obs}} + 300 = V(R) \sin 77^\circ (X/R) . \quad (4)$$

1991 年, Huchra 等人总结了从赤道坐标系转化到 M31 本地观测坐标系的方法<sup>[28]</sup>, 先将赤道坐标  $\alpha$  和  $\delta$  转化成标准坐标  $x'$  和  $y'$ , 再通过标准坐标与 M31 观测坐标之间的关系可得到观测源在 M31 盘平面上的位置:

$$x' = \sin(\alpha - \alpha_0) \cos \delta , \quad (5)$$

$$y' = -\cos(\alpha - \alpha_0) \cos \delta \sin \delta_0 + \sin \delta \cos \delta_0 , \quad (6)$$

$$X = x' \sin \theta + y' \cos \theta , \quad (7)$$

$$Y = -x' \cos \theta + y' \sin \theta . \quad (8)$$

M31 观测坐标系的建立, 除了有助于简明清晰地判断观测目标在 M31 盘平面上的位置以及计算其圆周运动速度之外, 还可以在我们区分 M31 成员星和银河系前景星的时候提供切实有效的帮助<sup>[24]</sup>。

### 3 M31 成员星的证认

对 M31 的恒星进行观测, 毫无疑问会受到银河系前景星的干扰, 因此, 证认观测目标是否为 M31 的成员星就成为研究时首先需要考虑的问题。

早在 1980 年, Humphrey 和 Sandage 在对 M33 恒星观测的研究中, 就提出了利用色指数区分 M33 成员星和银河系前景星的方法<sup>[29]</sup>。在后来的研究工作中, 这一方法也被逐渐应用到 M31 恒星的观测研究中。除了测光的方法外, 对观测目标光谱的分析也可以帮助判断

目标恒星是否为 M31 的成员星<sup>[11]</sup>。1988 年, Humphrey 等人对 M31 中红超巨星 (RSG) 进行观测时, 用红外波段 Ca II 三重线的等值宽度值作为判断 M31 成员星的方法之一, 他们在研究中指出, CaII 三重线等值宽度总和大于 11 Å 的恒星是 M31 中的红超巨星, 而小于 9 Å 的则认为是银河系的前景星<sup>[30]</sup>。由于只采用一种方法可能包含一些无法确定的目标, 他们在文章中还给出另外一种确定 M31 成员星的方法, 即用红外 J, H, K 波段的测光数据, 计算相应的  $J - H$ ,  $H - K$  的色指数值, 并采用 Elias 的方法<sup>[31]</sup> 来区分 M31 的红超巨星和银河系的前景矮星。考虑到数据测量的误差, 为了保证所挑选 M31 成员星的准确性, 他们只选取光谱和色指数两种方法都证认为 M31 成员的恒星作为 RSG 候选星。Berkhuijsen 等人在对 M31 当中的 OB 型恒星的观测工作中, 通过恒星的光度函数以及颜色来证认 M31 的成员星<sup>[10]</sup>。他们以满足色指数条件  $B - V \leq 0.1$  或  $U - V \leq -0.9$  为判断的依据来选择 M31 中的 OB 型星。

20 世纪 90 年代中后期, Massey 等人对本星系群中几个比较主要的星系 NGC 6822, M33, M31 进行观测。他们使用  $\lg g$  和色指数相结合的方法区分银河系前景星和目标星系中的红超巨星, 计算时采用 Kurucz 的 ATLAS9 恒星大气模型<sup>[32]</sup>。他们将银河系前景矮星和目标星系中红超巨星的  $\lg g$  分别取为 4.5 和 0.0。将银河系前景矮星丰度  $\lg Z/Z_{\odot}$  值取为 -0.5 和 0.0; 而对于 NGC 6822, M33 和 M31 中的红超巨星, 丰度值分别选取  $\lg Z/Z_{\odot} = -0.5, 0.0, +0.3$ <sup>[14]</sup>。他们在经过计算后得到: 在色指数  $V - R$  相同的情况下, 由于  $\lg g$  不同, 红超巨星的色指数  $B - V$  值比银河系前景矮星更大, 即表现在颜色上显得更偏红。他们认为在考虑了红化的影响之后<sup>[33]</sup>, 这一结果可用来有效地区分银河系的前景矮星和 M31 中的红超巨星。

2002 年, Reitzel 和 Guhathakurta 利用 KECK II 10 m 望远镜对 M31 的外晕 (outer halo) 进行了一次低分辨率的光谱巡天<sup>[34]</sup>, 他们观测的目标是 M31 晕中的红巨星。在这项研究工作中, 他们采用由交叉相关计算视向速度<sup>[35]</sup>的方法区分 M31 中的红巨星和银河系前景矮星。M31 整体相对我们银河系的视向速度约为  $-300 \text{ km/s}$ <sup>[2]</sup>, 根据这一条件他们得到视向速度方向为负且值较大的目标恒星更有可能是 M31 晕中的红巨星。对于用视向速度方法不太容易确定的目标, 他们使用较为常用的色指数方法来辅助证认。在 2006 年的后续工作中, 他们除了使用视向速度和色指数的方法之外, 还新增加了利用恒星光谱来区分 M31 红巨星和银河系前景矮星的方法<sup>[22]</sup>。他们计算对温度和表面重力敏感的 NaI 8190 Å 吸收线的等值宽度值<sup>[36]</sup>, 再将  $V - I$  色指数和 NaI 8190 Å 等值宽度值作图, 来分辨 M31 晕中的红巨星和银河系前景矮星。

从 2001 年开始, Massey 等人进行的本星系群巡天观测工作将 M31 列为主要目标之一, 并且在 2007 年发布的 M31 星表中包含了约 37 万颗恒星<sup>[23]</sup>, 也是迄今为止包含恒星数量最多的 M31 星表。2009 年, Massey 等人在证认 M31 红超巨星的工作中, 继续沿用了他们在 1998 年区分银河系前景星和 M31 红超巨星的方法<sup>[14]</sup>。如图 2 所示: 由于谱线覆盖效应, 表面重力小的红超巨星在色指数  $V - R$  相同的情况下会比表面重力较大的前景矮星色指数  $B - V$  值更大, 这样就可以分辨出 M31 中的红超巨星和银河系的前景星。

在这项工作中, Massey 等人采用的方法是: 将恒星的视向速度与在 M31 观测坐标系中

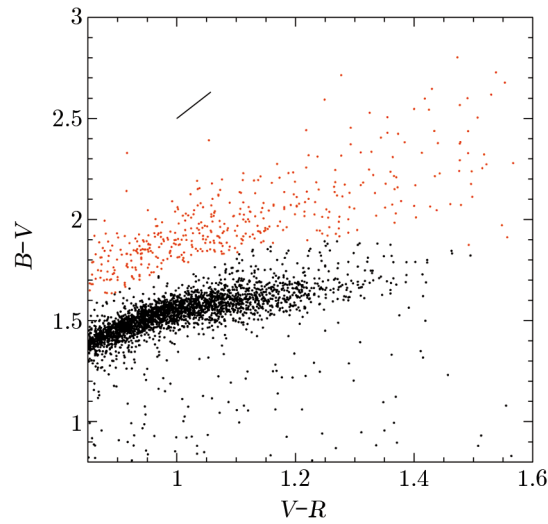


图 2 双色图<sup>[24]</sup>

图中红色实心圆点代表 M31 中红超巨星, 黑色实心圆点代表银河系前景矮星, 左上方是对 M31 早型星的一个典型色余值  $E(B - V) = 0.13$  所代表的红化方向。

的位置作图, 并根据拟合的结果来判断恒星是否为 M31 的成员星<sup>[24]</sup>。他们根据 Rubin 和 Ford 的观测数据<sup>[27]</sup> 做了线性拟合之后, 再将红超巨星候选体画在图中, 与拟合的结果符合较好, 如图 3 所示。

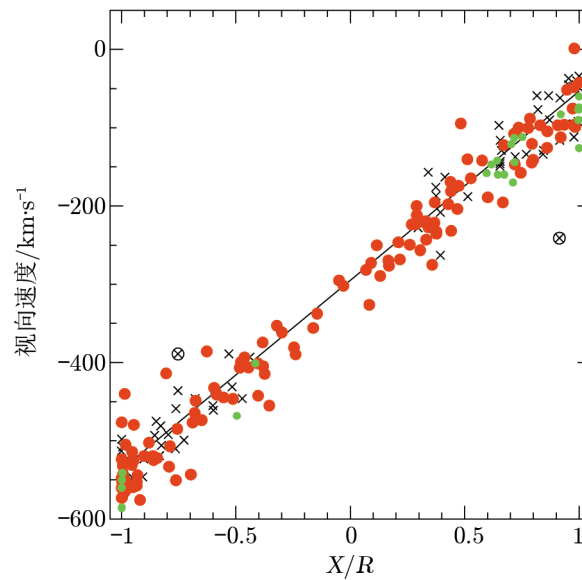


图 3 恒星视向速度和在 M31 观测坐标系中  $X/R$  的关系<sup>[14]</sup>

其中  $R$  是恒星对应的点在坐标系中到原点的距离。黑色的  $\times$  是 Rubin 和 Ford 的工作中的数据 (两个黑色圆点未在拟合所用数据中), 红色的点是这项研究中证认的红超巨星, 绿色的点是 Massey 1998 年文章中证认的红超巨星候选体

为了更好地分析 M31 中的恒星物理性质, 区分 M31 成员星和银河系前景星是最基础的一步。从早期对 M31 的观测工作开始, 证认 M31 成员星的方法越来越完善和可靠, 这也为 M31 恒星观测的发展起到了重要的作用。

## 4 M31 恒星观测的发展与相关研究结果

### 4.1 UBVR 测光巡天

以观测 M31 中恒星为目标的巡天工作在很早之前就开始展开。1988 年, Berkhuijsen 等人采用 UBVR 四色测光系统观测 11 438 颗恒星, 其 V 波段星等范围为 11.5~20 mag, 他们采用色指数方法区分 M31 恒星和银河系的前景矮星, 以色指数  $B - V < 0.4$  和  $U - V < 0.0$  作为 M31 中蓝色恒星的选择标准。对于红色恒星, 认为色指数  $B - V > 1.5$  的恒星中, 约有 1/3 是 M31 中的恒星<sup>[9]</sup>, 并制作了所观测的 M31 天区亮星星表。他们在这项工作中观测了  $10^4$  多颗恒星, 但由于极限星等的限制和证认 M31 成员星方法的局限, 实际证认出的 M31 成员星数量并不多。即便如此, 这项研究还是为此以后以 M31 恒星为目标的巡天工作做出了一个范例, 从那之后的测光巡天工作, 大多是在这项研究的基础上进行, 只是提高了极限星等和完善了证认 M31 成员星的方法。

1992 年, Magnier 等人用基特峰麦克劳-希尔 (McGraw-Hill) 望远镜进行 BVRI 四色测光巡天, 他们观测了 M31 方向面积为 1 平方度天区的 361 281 颗恒星。在这项观测工作中, BVRI 四色的极限星等分别为 22.3, 22.2, 22.2, 20.9 mag, 比 1988 年 Berkhuijsen 等人的测光工作深 2 mag。Magnier 等人依旧采用色指数的方法来区分 M31 中的巨星、超巨星和前景矮星<sup>[12]</sup>。这项工作 在测光深度上已经达到了较深的程度, 观测得到的 M31 恒星数量也相对较多, 而且在星表中提供了相当高精度的恒星坐标<sup>[23]</sup>, 为后人的工作提供了一个可靠的选源样本。

### 4.2 利用 KECK 望远镜观测 M31 恒星

#### 4.2.1 高分辨率光谱观测

自从 KECK 望远镜投入使用后, 人们陆续利用高分辨率光谱对 M31 中超巨星进行观测研究。2000 年, Venn 等人用 KECK-I 的 HIRES 高分辨率光谱仪对 M31 中的 4 颗 A-F 型超巨星 41-2368, 41-3712, A-207 和 41-3654 进行观测<sup>[16]</sup>; 然后用 ATLAS9 大气模型<sup>[37]</sup> 对前三颗恒星进行大气成分分析, 确定其化学元素丰度; 最后与前人对 M31 中发射线星云观测计算出的氧丰度<sup>[38]</sup> 进行了比较。这项工作是首次采用高分辨率光谱仪观测 M31 中的恒星, 由于光谱分辨率的提高, Venn 等人得到的 M31 恒星化学元素丰度比前人由发射线星云给出的元素丰度误差小, 结果更为可靠。

2001 年, Smartt 等人同样使用高分辨率光谱仪观测了 OB10-64 星协中的一颗 B 型超巨星, 并且用非局部热动平衡<sup>[39]</sup> 理论来分析这颗恒星, 采用计算吸收线等值宽度的方法给出 He, C, Ni, O, Mg, Si 等元素的丰度, 并且与使用同样设备观测的一颗银河系 B 型超巨星 HD167264 进行比较。他们经过比较后发现, 在观测误差允许的范围内, 这两颗恒星的大气

参数基本上是相同的<sup>[17]</sup>。

#### 4.2.2 中低分辨率光谱观测

2002 年, Reitzel 和 Guhathakurta 用 Keck 望远镜进行观测, 得到 M31 外晕中 99 颗红巨星 I 波段 CaII 三重线附近的低分辨率光谱, 这 99 颗红巨星的 I 波段星等在 20~22 mag 之间。他们在 M31 成员星的证认方法上首次采用了视向速度的方法来区分 M31 中的恒星和银河系的前景星, 他们认为视向速度小于  $-220$  km/s 的恒星可以确认为 M31 的成员星; 而视向速度大于  $-160$  km/s 的恒星, 银河系前景矮星占其中的大多数。对于视向速度  $V$  在  $-220 \sim -160$  km/s 范围内的恒星, 辅助以  $B-I$  色指数来进行验证, 他们认为  $B-I > 2$  的为 M31 晕中的红巨星。证认出 M31 晕中红巨星之后, Reitzel 和 Guhathakurta 还用测光和光谱两种方法给出了它们的金属丰度<sup>[34]</sup>。

在此前观测证认 M31 成员星的工作中, 色指数方法一直是区分银河系前景星和 M31 中恒星的主要手段, 而 Reitzel 和 Guhathakurta 这项工作证明了采用视向速度证认 M31 成员星同样可行, 为之后 M31 成员星的证认工作提供了一个新的方法。此后的几项对 M31 中恒星的观测及证认的工作中, 色指数和视向速度同时使用、相互验证成为了较为常用的方法。

2006 年, Chapman 等人使用 Keck-II 望远镜 DEIMOS 光谱仪对 M31 天区近  $10^4$  颗恒星进行了低分辨率光谱观测<sup>[40]</sup>, 他们计算了所有观测恒星的视向速度, 通过视向速度证认方法剔除掉银河系的前景星。相对于 M31 中的红巨星, 由于银河系前景星有更强的 Na 8183 Å, 8195 Å 吸收线, Chapman 等人提出了计算 Na 8183 Å, 8195 Å 吸收线的等值宽度来区分银河系前景星和 M31 红巨星的方法。他们将证认出的 M31 成员星的视向速度按照几何关系改正为恒星与 M31 盘相关的速度, 尝试将恒星分别归类到薄盘、厚盘和晕中。通过速度与恒星在 M31 观测坐标系中位置的关系, 证认出其中 827 颗恒星位于距离 M31 中心 50 kpc 以外的贫金属晕中, 并通过计算 Ca II 三重线的等值宽度给出这些恒星的金属丰度, 推测 M31 晕的金属丰度值约为  $[Fe/H] = -1.4$ , 误差为 0.2 dex。

#### 4.3 M31 盘金属丰度梯度

2002 年, Trundle 等人使用威廉·赫歇尔望远镜的 ISIS 中等分辨率光谱仪观测了 7 颗 M31 中的 B 型超巨星<sup>[18]</sup>, 采用局部热动平衡 (LTE) 理论分析这 7 颗超巨星并给出 He, C, Ni, O, Si, Mg, Al, Fe 等元素的丰度 (其中包括 2001 年 Smartt 工作中计算的 OB10-64), 他们对其中一颗恒星 OB78-277 采用 1997 年 Santolaya 等人提出的研究带有恒星风的早型星的方法<sup>[41]</sup> 进行非局部热动平衡 (NLTE) 分析, 将得到的元素丰度与 LTE 给出的结果相比, 发现 NLTE 效应对丰度的影响并不大。他们在综合前人的研究基础上作出了 M31 中氧元素丰度沿盘径向的变化趋势图, 如图 4 所示。

沿 M31 盘径向方向的元素丰度梯度问题一直处于讨论之中, 从图中可以看出, 几项对发射线星云氧元素丰度的分析显示, 沿着 M31 的盘径向增大的方向, 氧丰度逐渐减小。但是, 近期的几项使用高分辨率光谱仪对 M31 中恒星的观测工作结果并没有明显地显示出这种特征; 这种情况的产生原因之一是, 现阶段对 M31 中恒星的高分辨率光谱观测数据还相对较少, 无法通过对数据的分析得出明显的趋势。相信这个问题在未来会继续得到关注, 并且随



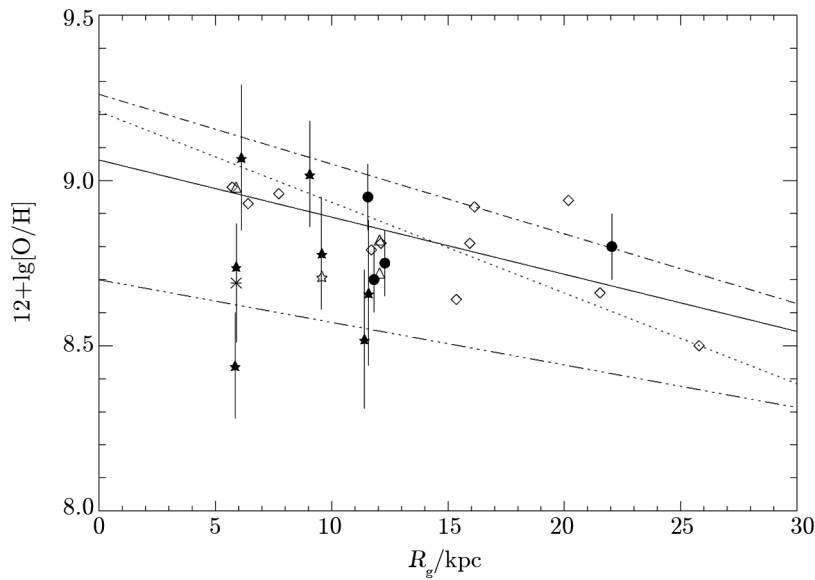


图 4 M31 中氧元素丰度沿盘径向的变化趋势<sup>[18]</sup>

图中★代表2002年Trundle观测工作中的7颗B型超巨星<sup>[18]</sup>，\*代表2001年Smartt研究中用NLTE理论计算的OB10-64B型超巨星的氧元素丰度<sup>[17]</sup>，◇和△分别代表1982年Blair<sup>[38]</sup>和1999年Galarza<sup>[42]</sup>的研究工作中所给出的M31中H II区的氧元素丰度。●代表2000年Venn的工作中计算出的4颗A-F型超巨星的氧元素丰度<sup>[16]</sup>。图中的线表示对相应工作数据的最小二乘法拟合结果

着望远镜和观测技术的发展，一定会有更多的高分辨率光谱观测可以用来对这个问题进行分析和验证。

#### 4.4 本星系群巡天

Massey 等人利用 KPNO 4 m 望远镜进行的本星系群巡天 (LGGS) 对 M31 中 2.2 平方度的天区进行测光观测，用 *UBVRI* 五色测光观测了 M31 天区 371 781 颗恒星，其中大部分恒星拥有全部 5 个波段的测光数据。相比较 1992 年 Magnier 等人的巡天工作<sup>[12]</sup>，本星系群巡天工作的测光深 2 mag，在 M31 天区上的巡天面积也要大两倍多；并且在宽带测光的同时，Massey 等人还使用了中心位于  $H\alpha$ ， $[O III]5007 \text{ \AA}$ ，和  $[S II]6713, 6731 \text{ \AA}$  的窄带 (50~80 $\text{\AA}$ ) 测光，其中  $H\alpha$  的窄带测光用于从行星状星云和超新星遗迹中区分  $H\alpha$  发射线恒星<sup>[23]</sup>。Massey 等人同时对其中一些比较亮的恒星进行了光谱观测，并且通过光谱证认出 34 颗新的 M31 成员星，这 34 颗恒星中 V 波段最暗为 18 mag。他们在所发表文章的附表中列出了所有之前通过光谱证认过的 M31 成员星的信息。由于银河系的前景星对 M31 恒星证认主要的影响在红色部分，因此这项工作中证认出 M31 中的 O—F 型星要多于 K, M 型星，而有相当一部分 K, M 型星被归入未确定的部分。Massey 等人在接下来的工作中也主要探讨了 M31 中红超巨星和黄超巨星的证认问题。

2009 年，Massey 等人在研究工作中指出，M31 方向上  $16 < V < 20 \text{ mag}$  的红色恒星中 ( $1.2 < B - V < 1.8$ ) 有 80% 以上的恒星是银河系的前景星<sup>[24]</sup>。在这项工作中，Massey 等人

除了证认 M31 成员星外, 还使用 MMT 望远镜观测了 17 颗 M31 中恒星的光谱, 其中 16 颗为 M 型星, 并且采用模板匹配的方法对这些恒星的光谱进行了分析, 给出了相应的恒星大气参数。

本星系群巡天是迄今为止对 M31 最为完整的测光巡天工作, 无论在观测恒星的星等深度上还是天区的面积上, 都超过以往的测光巡天, 为后人的选源工作提供了极大的便利。而且在 Massey 等人的几项研究工作中, 证认 M31 成员星的方法也得到了发展, 光谱证认 M31 成员星成为主要的证认手段。这也为我们使用 LAMOST 光谱数据证认 M31 成员星提供了宝贵的经验。

#### 4.5 弥漫星际介质谱带观测

弥漫星际介质谱带 (Diffuse Interstellar Band) 是在天体的光谱中看到的由星际介质产生的吸收特征, 现在已经观测到从 3900~ 8100 Å 共 400 多个弥漫星际介质谱带<sup>[43]</sup>。研究什么成分导致了弥漫星际介质谱带的吸收逐渐成为一个重要的课题, 这对于研究星系中的星际介质成分和演化有重要价值。

2008 年, Cordiner 等人利用 KECK 望远镜的 DEIMOS 光谱仪对 M31 中弥漫星际介质谱带进行观测。他们在观测星际介质的同时, 对 M31 中两颗超巨星 MAG 63885 和 MAG 70817 进行高分辨率的光谱观测。在对比两颗 M31 中恒星和银河系的 DIB 观测结果时, 发现对于 MAG 70817, DIB 5780 Å 的等值宽度远大于银河系中的观测结果, 图 5 所示 DIB5780 Å 的等值宽度与红化之间的关系。而 M31 具有更强的弥漫星际介质谱带吸收, 可能是由于星际空间的紫外消光曲线和辐射场与银河系不同造成的<sup>[44]</sup>。在后续的工作中, Coediner 等人使用双子座望远镜观测了超过 30 颗 M31 中的早型星, 并且计算了相应的弥漫星际介质谱带的等值宽度值<sup>[52]</sup>, 与他们 2008 年研究工作中的结果类似, M31 中弥漫星际介质谱带的等值宽度稍大于银河系的相应结果。

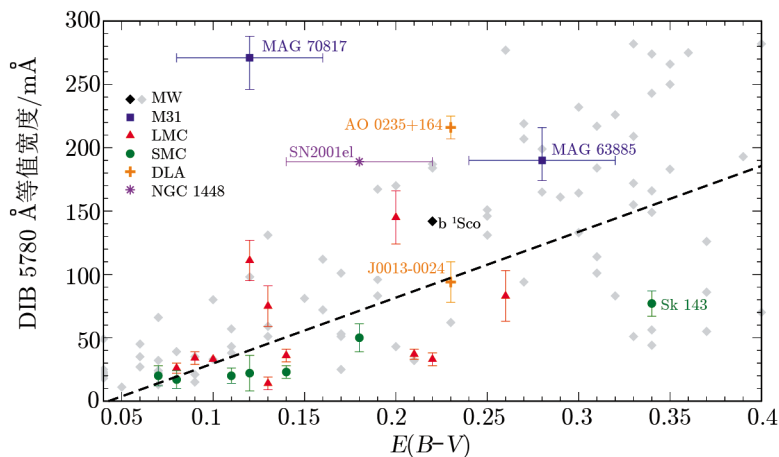


图 5 不同星系间 DIB 5780 Å 等值宽度与红化的关系

图中标出了 LMC 和 SMC<sup>[45]</sup>、DLAs<sup>[46][47]</sup> 和 NGC 1448<sup>[48]</sup> 中的相应关系。虚线是对银河系 DIB 观测数据的线性拟合<sup>[49-51]</sup>。

尽管有研究称含碳分子如多环芳香烃或者富勒烯是造成弥漫星际介质谱带的原因<sup>[53]</sup>，但是目前尚没有一个确定的结论。对 M31 当中的弥漫星际介质谱带的观测也许可以为我们提供一个与银河系进行相互比较的机会，对研究 M31 和银河系的星际介质环境以及辐射场也可以提供帮助。

#### 4.6 M31 晕表面亮度函数

2010 年, Tanaka 等人用昴星团望远镜 (Subaru Telescope) 对 M31 晕进行了一次巡天工作, 观测目标是南部大星流和其他一些亚结构, 并通过 VI 波段的测光计算 M31 晕的表面亮度函数。他们指出, 在  $R > 100$  kpc 时 M31 的晕也展现出平滑的延展结构, 遵循指数约为  $-2.17 \pm 0.15$  的指数律形式<sup>[54]</sup>。2012 年, Gilbert 等人利用 KECK 望远镜 DEIMOS 光谱仪对 M31 延伸到 175 kpc 以外晕的恒星成分进行观测, 根据证认的 M31 晕中的红巨星计算 M31 晕的表面亮度, 发现其遵循幂律形式<sup>[55]</sup>, 拟合得到指数为  $-2.2$ , 如图 6 所示。并且发现 M31 晕的表面亮度显示出比较平滑的变化趋势, 并没有像以前的研究工作中所讨论的那样, 在半径较大处有一个明显的向下降低的趋势<sup>[56]</sup>。

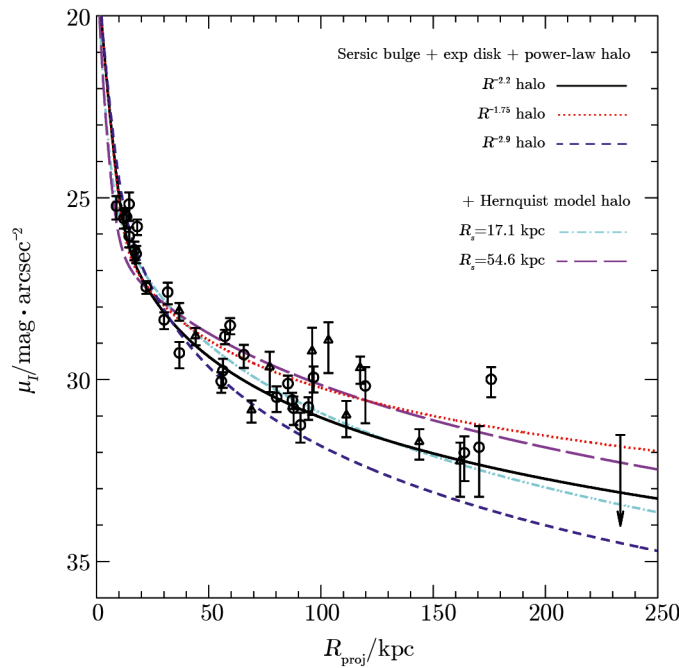


图 6 M31 晕中红巨星表面亮度的指数拟合结果<sup>[55]</sup>

其中黑色实线代表指数等于  $-2.2$  的拟合曲线。

除了上面几项工作之外, Caldwell 等人用 6.5 米 MMT 望远镜进行了一次对 M31 中星团的巡天工作<sup>[57]</sup>。在这项工作中, Caldwell 等人发现了一颗 F 型超巨星, 视向速度达到了  $-780$  km/s<sup>[25]</sup>, 这也是迄今为止发现的负方向视向速度最大的恒星。根据 2003 年 Merrett 由行星状星云的运动学分析得到的 M31 南部星流的轨迹<sup>[58]</sup>, 这颗恒星的位置恰好处于星流的

轨迹附近, 他们也因此推测可能是 M31 的南部星流导致了这颗恒星如此异常的视向速度。

## 5 M31 恒星观测的总结与展望

M31 和我们所在的银河系在结构和性质方面都有一定的相似程度, 因此, 对 M31 恒星成分的研究除了可以帮助我们了解 M31 的性质之外, 还有助于研究银河系的结构和演化。从早期对 M31 发射星云观测中证认出超巨星开始, 对 M31 中恒星的观测逐渐发展。为了方便表示恒星在 M31 中的位置, M31 的本地观测坐标系被建立起来。在证认 M31 恒星方法的发展过程中, 逐渐形成以色指数方法和立足于星系旋转曲线性质的速度与位置关系方法为主, 以比较巨星与矮星光谱差异等多种手段为辅来共同证认的方法。一些中高分辨率光谱的观测工作得到了 M31 盘中氧元素丰度沿径向变化的趋势, 弥漫星际介质谱带与银河系的差异等结果。而其他一些巡天工作则通过对晕中红巨星的光谱观测, 计算了 M31 晕的金属丰度, 发现了表面亮度变化规律等性质。

M31 当中大规模的恒星形成过程已经结束<sup>[59]</sup>, 这给我们研究银河系未来发展走向提供了一个绝佳样本。在已经进行的诸多 M31 恒星观测研究中, 尚没有通过大样本的光谱观测对其全局的化学丰度演化进行分析的工作。LAMOST 望远镜由于其大视场多光纤等独特的性质, 使其在完成这项工作方面具有一定的优势。通过对 M31 盘中的恒星大样本观测, 分析其化学丰度演化, 也成为 LAMOST 未来的主要观测目标之一<sup>[60, 61]</sup>。

以下为利用 LAMOST 对 M31 进行观测研究的几个可能的目标。

(1) 利用 LAMOST 光谱数据证认 M31 盘上的超巨星。

利用 LAMOST 大视场多光纤的特性, 可以得到大量的 M31 方向天区的恒星光谱, 以进行证认 M31 成员星的工作。首先利用多普勒效应计算出恒星的视向速度, 再将恒星的视向速度转化到 M31 系统坐标系下, 利用其与几何位置的关系, 即可尝试证认 M31 成员星。

从前人的工作中可以看到, 证认 M31 成员星比较好的办法是视向速度方法和色指数方法同时使用来相互验证<sup>[24]</sup>: 一般是先通过色指数方法确定候选星, 然后利用光谱计算出视向速度做后续的证认。

(2) 利用 LAMOST 观测到的 M31 盘上超巨星光谱数据对 M31 盘的结构进行分析。

LAMOST 可以对 M31 盘上的超巨星进行光谱观测, 通过坐标转换可以得到观测恒星在 M31 本地观测坐标系亦即 M31 盘上的相对位置坐标; 而通过光谱多普勒效应的分析, 可以计算恒星相对我们的视向速度。再应用式 (4) 即可计算出观测目标在 M31 盘上的圆周运动速度。根据圆周运动的力学关系, 可以得到相应半径内质量的估计值为

$$M = V^2 R / G, \quad (9)$$

其中  $V$  是根据式 (4) 计算得到的观测目标在 M31 盘上的圆周运动速度,  $G$  是万有引力常数。

(3) 通过对 M31 盘上超巨星光谱的分析, 计算出恒星的金属丰度, 得到金属丰度沿半径

变化的规律,从而分析 M31 盘的演化。

在之前的几项对于 M31 恒星进行的高分辨率光谱观测工作中,尽管得到了可信的氧元素丰度计算值,但是由于数据量太少,对于氧元素沿径向变化趋势问题的解释并不充分可信。LAMOST 在这项工作上的优势在于可以得到大量盘上恒星的金属丰度,虽然由低分辨率光谱计算出的金属丰度误差较高分辨率光谱大,但是在所使用的数据量上占有很大的优势,可以在统计方面得出相应的金属丰度沿半径变化的规律,从而达到分析 M31 盘演化的目标。

随着望远镜口径的不断增大和观测技术的发展,对 M31 恒星的观测将更加细致和准确,还可以通过以下几个方面研究 M31 的性质:

(1) 通过对测光和光谱数据的综合分析,尝试区分出 M31 薄盘、厚盘和晕中的恒星,分析 M31 盘和晕的结构。关于这方面的工作,2006 年 Chapman 的研究中已经提及通过光谱计算视向速度,然后利用恒星在 M31 本地观测坐标系中的几何位置将视向速度转化为 M31 系统中的速度,用以区分薄盘、厚盘和晕的恒星<sup>[40]</sup>。随着将来望远镜口径的增大,可以得到更多 M31 恒星光谱数据,用以研究 M31 盘和晕结构的恒星样本也会更加趋于完备。

(2) 尝试计算 M31 的自行。从视向速度看来,M31 与银河系将在未来 50~100 亿年的时间内相撞<sup>[62]</sup>。为了准确地知道这是否会成为现实,我们还需要知道 M31 的自行。不仅如此,对 M31 自行的测量还有助于我们了解本星系群的演化历史和未来走向。2005 年,Loeb 和 Reid 曾经通过天体测量方法限制 M31 切向速度的范围约为  $(100 \pm 20)$  km/s,自行数值在赤经方向为正,赤纬方向为负<sup>[63]</sup>。2011 年,Darling 的研究工作首次确认了 M31 中的水脉泽(water masers),并且根据 2005 年 Brunthaler 利用水脉泽计算 M33 自行的方法<sup>[64]</sup>,预计在今后的 2~3 年时间内可以计算出较为精确的 M31 自行数值<sup>[62]</sup>。

尽管目前尝试确定 M31 自行是利用水脉泽的方法,但较为准确的 M31 自行数值确定之后,对于光学波段探测的意义也非常重大。自行可以用来较为精确地计算 M31 的距离,也可以对分析 M31 内部的引力势提供帮助。

尽管对于 M31 的恒星观测已经取得了不少成果,但是相比较我们尚未知晓的部分,仍远远不够。因此,未来对 M31 的观测将会吸引天文学家们更多的注意,而从中获取的信息也必将帮助我们更好地认识 M31 这个本星系群中最大的成员。

## 参考文献:

- [1] Ribas I, Jordi C, Vilardell F, et al. *ApJL*, 2005, 635: L37
- [2] Karachentsev I D, Kashibadze O G. *Ap*, 2006, 49: 3
- [3] Gil de Paz A, Boissier S, Madore B F, et al. *ApJS*, 2007, 173: 185
- [4] Baade W, Arp H C. *ApJ*, 1964, 139: 1027
- [5] Humphreys R. *ApJ*, 1979, 234: 854
- [6] Moffat A F J, Shara M M. *ApJ*, 1983, 273: 544
- [7] Moffat A F J, Shara M M. *ApJ*, 1987, 320: 266

- [8] Massey P, Armandroff T E, Conti P S. *AJ*, 1986, 92: 1303
- [9] Berkhuijsen E, Humphreys R M, Ghigo F D, Zumach W. *A&AS*, 1988, 76: 65
- [10] Berkhuijsen E M, Humphreys R M. *A&A*, 1989, 214: 68
- [11] Humphreys R M, Pennington R L, Jones T J, Ghigo F D. *AJ*, 1988, 96: 1884
- [12] Magnier E A, Lewin W H G, van Pardijs J, et al. *A&AS*, 1992, 96: 379
- [13] Massey P, Armandroff T E, Pyke R, et al. *AJ*, 1995, 110: 2715
- [14] Massey P. *ApJ*, 1998, 501: 153
- [15] Brewer J P, Richer H B, Crabtree D R. *AJ*, 1996, 112: 491
- [16] Venn K A, McCarthy J K, Lennon D J, et al. *AJ*, 2000, 541: 610
- [17] Smartt S J, Crowther P A, Dufton P L et al. *MNRAS*, 2001, 325: 257
- [18] Trundle C, Dufton P L, Lennon D J, Smartt S J, Ur-baneja M A. *A&A*, 2002, 395: 519
- [19] Reitzel D B, Guhathakurta P, Rich R M. *AJ*, 2004, 127: 2133
- [20] Guhathakurta P, Rich R M, Reitzel D B, et al. *AJ*, 2006, 131: 2497
- [21] Kalirai J S, Guhathakurta P, Gilbert K M, et al. *ApJ*, 2006b, 641: 268
- [22] Gilbert K M, Guhathakurta P, Kalirai J S, et al. *ApJ*, 2006, 652: 1188
- [23] Massey P, Olsen K A G, Hodge P W, et al. *AJ*, 2007a, 133: 2393
- [24] Massey P, Silva D R, Levesque E M, et al. *ApJ*, 2009, 703: 420
- [25] Caldwell N, Morrison H, Kenyon S J, et al. *AJ*, 2010, 139: 372
- [26] Kent S. *AJ*, 1989, 97: 1614
- [27] Rubin V C, Ford W K. *ApJ*, 1970, 159: 379
- [28] Huchra J P, Brodie J P, Kent S M. *ApJ*, 1991, 370: 495
- [29] Humphreys R M, Sandage A. *ApJS*, 1980, 44: 319
- [30] Humphreys R M, Graham J A. *AJ*, 1986, 91: 552
- [31] Elias J H, Frogel J A, Humphreys R M. *ApJS*, 1985, 57: 91
- [32] Kurucz R L. *IAU Symposium*, 1992, 149: 225
- [33] Savage B D, Mathis J S. *ARA&A*, 1979, 17: 73
- [34] Reitzel D B, Guhathakurta P. *AJ*, 2002, 124: 234
- [35] Tonry J, Davis M. *AJ*, 1979, 84: 1511
- [36] Schiavon R P, Barbuy B, Rossi S C F, Milone A. *ApJ*, 1997, 479: 902
- [37] Kurucz R. *ApJS*, 1979, 40: 1
- [38] Blair W P, Kirshner R P, Chevalier R A. *ApJ*, 1982, 254: 50
- [39] McErlean N D, Lennon D J, Dufton P L. *A&A*, 1999, 349: 553
- [40] Chapman S, Ibata R, Lewis G, et al. *ApJ*, 2006, 653: 255
- [41] Santolaya-Rey A E, Puls J, Herrero A. *A&A*, 1997, 323: 488
- [42] Galarza V C, Waltebos R A M, Braun R. *AJ*, 1999, 118: 2775
- [43] Hobbs L M, York D G, Thorburn J A, et al. *ApJ*, 2009, 705: 32
- [44] Cordiner M A, Cox N L J, Trundle C, et al. *A&A*, 2008a, 480: L13
- [45] Welty D E, Federman S R, Gredel R, et al. *ApJS*, 2006, 165: 138
- [46] York B A, Ellison S L, Lawton B, et al. *ApJ*, 2006, 647: L29
- [47] Ellison S L, York B A, Murphy M T, et al. *MNRAS*, 2008, 383: L30
- [48] Sollerman J, Cox N, Mattila S, et al. *A&A*, 2005, 429: 559
- [49] Herbig G H. *ApJ*, 1993, 407: 142
- [50] Thorburn J A, Hobbs L M, McCall B J, et al. *ApJ*, 2003, 584: 339
- [51] Megier A, Krelowski J, Weselak T. *MNRAS*, 2005, 358: 563
- [52] Cordiner M A, Cox N L J, Evans C J, et al. *ApJ*, 2011, 726: 39
- [53] Herbig G H. *ARA&A*, 1995, 33: 19
- [54] Tanaka M, Chiba M, Komiyama Y, et al. *ApJ*, 2010, 708: 1168
- [55] Gilbert K M, Guhathakurta P, Beaton R L, et al. *ApJ*, 2012, 760: 76
- [56] Cooper A P, Cole S, Frenk C S, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 744

- [57] Caldwell N, Harding P, Morrison H, et al. AJ, 2009, 137: 94  
[58] Merrett H R, et al. MNRAS, 2003, 346: L62  
[59] van den Bergh S, A&ARv., 1999, 9: 273  
[60] Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 723  
[61] Yang F, Carlin J L, Liu C et al. RAA, 2012, 12: 781  
[62] Darling J. ApJ, 2011, 732: L2  
[63] Loeb A, Reid M J, Brunthaler A, Falcke H. ApJ, 2005, 633: 894  
[64] Brunthaler A, Reid M J, Falcke H, et al. Science, 2005, 307: 1440

## Stellar Observation and Research Progress in M31

LI Cheng-dong, ZHAO Gang

(Key Laboratory of Optical Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** Andromeda, also known as M31, is the largest spiral galaxy in the Local Group which locates in the Andromeda constellation. The distance from M31 to the Milky Way is 770 kpc, i.e. about 2.5 million light years. The integrated apparent magnitude of M31 is 3.44 mag. It is the farthest deep-sky object which can be seen by eye. The number of stars in M31 is about  $10^{12}$ .

We give a brief review of progress in observing in M31, including photometric and spectroscopic observations in the past few decades. Then we introduce the founding of M31 observation coordinate system and the usage of this system in M31 star observations. Afterwards, we conclude how to use the radio velocity method and the color index method to separate the M31 stars from the Milky Way foreground contaminations. We then summarize the progress in recent years on the observation of M31 stars, we also analyze the results of UBVR photometric surveys, spectral observation with KECK telescope, the Local Group Galaxies Survey project, the observation of M31 diffuse interstellar band and the fitting of M31 halo's surface brightness function.

Finally, we discuss what LAMOST can do for M31 studies in the future, for instance, identify the supergiant stars in M31 disk and analyze the radial gradient of the element abundance in M31 disk. We also proposed some possible scientific targets for future work.

**Key words:** M31; photometry; spectroscopy; stellar