

文章编号: 1000-8349(2004)02-0163-16

M31 的观测与研究进展

孙振娜, 侯金良, 常瑞香, 陈 力

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 介绍了本星系群中最大的旋涡星系 M31 (仙女星系) 的基本观测性质。与银河系结构类似, M31 的基本成分包括: 核、核球、盘和晕。对以上各个成分的观测和研究进展分别作了综述, 重点是盘的星族成分和恒星形成历史, 以及球状星团的分布和晕的形成历史。同时与银河系的各种观测特征和形成机制作了详细的比较。

关键词: 天体物理学; M31 (仙女星系); 综述; 观测; 银河系
中图分类号: P157 **文献标识码:** A

1 引 言

本星系群是宇宙中一个重要而典型、同时又离我们最近的星系样本, 其成员星系大约有 35~40 个, 涵盖了宇宙中大部分的星系类型, 如旋涡星系、不规则星系、矮椭圆星系、矮椭球星系, 以及一个被高度撕裂的星系——人马座矮星系 (Sgr dSph)^[1]。唯一没有被观测到的星系类型是大的椭圆星系和 cD 星系。如果本星系群是无偏的且有代表性的, 那么研究这一星系样本对理解宇宙中其他星系的性质有着重要的指导意义。M31 (仙女星系, NGC 224) 与银河系以及 M33 是本星系群中 3 个仅有的旋涡星系, 其中, M31 和银河系还是本星系群中两个最大的星系, 对它们的观测和研究不仅可以更好地探索本星系群本身的形成过程和演化历史, 而且也有助于理解星系, 尤其是旋涡星系的形成和演化。

星系的形成和演化研究所涉及的主要内容可以归纳为两个方面, 一是星系质量的吸积历史和分布规律; 二是恒星的形成历史。对于银河系, 大量的观测数据已提供了一个相对比较清晰的结构图像, 如银晕、厚盘、薄盘、核球等。但是要明确地理论推断它的早期形成和演化机制仍然存在许多不确定性。近年来, 利用空间设备如哈勃空间望远镜 (HST), 以及一些地面大型设备, M31 的观测数据越来越多, 如不同区域的星族成分、恒星形成率、气体分布、元素丰度测定等。观测上, 已经揭示了 M31 与银河系具有许多不同和相似之处^[2]。仔细地分析和探讨这些不同和相同性质对理解这两个星系的形成和演化是十分有意义的。

收稿日期: 2003-12-26; 修回日期: 2004-01-10; 特约稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10173017、10133020、10373020); 国家 973 资助项目 (G19990754)

2 M31 的基本结构以及观测特征

M31 离银河系大约 760 kpc, 属于 Sb 星系。同对银河系的了解一样, 观测上已经可以给出 M31 的基本结构, 包括: 核、核球、盘和晕。下面我们分别综述这些成分的观测和研究进展, 重点是盘的星族成分和恒星形成历史, 以及球状星团的分布和晕的形成历史。

2.1 核 (nucleus)

天文学家相信, 大部分正常星系的核区都隐藏着一个大质量暗天体 (MDO), 它可能是黑洞。这类星系的中心区域一般都有非常密集的恒星分布, 它们的结构和动力学性质是与星系的整体性质相关的^[3]。星系早期形成的印迹显然会记录在这些恒星的轨道特性上。M31 对于理解星系核具有特殊的重要性, 这是因为 M31 是离银河系最近而且具有正常核球的一个星系。有强烈的证据表明这个星系的核球中心有一个质量大约为 $3 \times 10^7 M_{\odot}$ 的黑洞^[4,5]。同时, 对其核心区域的详细测光和运动学研究表明 M31 的核是一个独立的物理实体, 高分辨率的气球观测显示这个核是椭圆形的。它的视星等 $V = 12.6 \pm 0.3$, 相应的绝对星等 $M_V = -12.0$ 。如此高的光度, 至少相当于一个普通的球状星团亮度的 60 倍。M31 核的取向与 M31 主轴的取向相差很大, 这表明 M31 的核应该是一个动力学可区分的实体。Tremaine 等人 (1975)^[6] 认为, M31 的核是相当数量的球状星团通过动力学摩擦被拖进其中心而形成的。然而, van den Bergh (1969)^[7] 观测到在 M31 中 97% 的球状星团比核区金属丰度低, 因此认为核区中占主导地位的星族并非来自这些球状星团。但是不能排除这样一种可能性: M31 内部核球曾经有过一个由超富金属星团组成的星族, 由于动力学摩擦而被陷入核中。另一个可能的解释是: 这个核形成于气体内落, 而内落气体的金属丰度很高。遗憾的是这些解释均未被观测证实。

对核心区域的测光观测可以提供核形成的一些线索。Sandage 等人 (1969)^[8] 发现 M31 核球最内部的 $40''$ 区域表现出紫外超。Spillar 等人 (1990)^[9] 发现 M31 的致密核的颜色 $V - K = 2.1 \pm 0.4$, 比其核球的 $V - K (= 3.6 \pm 0.2)$ 要蓝很多。只要假设核心区域确实通过潮汐作用俘获了一些包含蓝水平支恒星的球状星团, 就可以解释这些观测现象。而且这个假设与 Welch (1982)^[10] 的 IUE 观测一致, Welch 认为 M31 核中包含很多热的高度演化的恒星, 其数量比富金属红巨星还多。

M31 核的运动学和动力学曾一度是观测和理论研究的热点。高精度的观测表明^[11,12], M31 核中的转动对称中心偏离其光学中心 $0.5''$ (约 1.8 pc), 其核的运动学中心与核球的等照度线的对称中心一致。M31 核中几个 pc 内不但有快速的转动, 而且速度弥散度很大。其转动速度在离开中心 $1.1''$ 处达到峰值 149 km/s, 最大的视向速度弥散度为 ± 245 km/s。如果这个核是椭球的, 如此高的速度说明核内有一个质量为 $10^7 \sim 10^8 M_{\odot}$ 的黑洞或是致密的大质量暗天体。如果核是盘状的, 其质量大约为 $10^{6.5} \sim 10^7 M_{\odot}$ 。

在核的形态上, 早期的气球观测已经发现了它结构的不对称性^[13]。HST 的高分辨率成像观测表明 M31 核心区域具有双成分结构^[14]。这两个成分 P1 与 P2 间隔大约 1.8 pc。较暗的成分 (P2) 正好位于核球的几何中心, 非常靠近 Kormendy 等人 (1988)^[12] 等提出的 MDO, 其质量大约是 $5 \times 10^7 M_{\odot}$ 。Tremaine (1995)^[15] 认为亮的成分 (P1) 是由一个小的核区恒星盘产生的, 对核的恒星动力学模型研究也支持这一观点^[16]。但是核也可能不是盘状的^[11],

因为同温层气球观测表明 M31 核区的等照度线并没有变得更平坦^[13]。

M31 核的运动学中心与光学中心偏离的可能原因有: (1) 核区的光分布受尘埃吸收的影响; (2) 光学中心分布由于受到被俘获的矮星系的影响而呈非轴对称; (3) 两个中心分布的不对称性表明核中恒星成分围绕其质量中心有一个真实的动力学震荡。红外成像观测表明尘埃吸收并不是核区不对称性的主要原因^[17]。另外, 与矮星系并合的时标仅为 10^7 yr, 所以并合在现在发生的可能性很低。因此最可能的解释为: M31 的光学中心和它的动力学中心的偏离是真实的。实际上这样的双中心结构也存在椭圆星系 NGC 4486B 中, 说明这并不是非常稀有的现象^[18], 但确实是一个比较令人困惑的结果, 它对核区、核球以及整个星系的早期形成有什么启示需要进一步的研究。

2.2 核球 (bulge)

在近域宇宙中, 大约一半的恒星位于星系核球 (或椭圆子系) 中^[19], 因此核球何时形成以及如何演化是理解星系哈勃分类的关键之一。一个典型星系核球中的恒星形成历史和质量吸积历史可为星系形成理论提供严格的约束。

与银河系相比, M31 有一个更大和更亮的核球, 其有效半长径大约为 3.7 kpc, 视扁度为 0.6。核球质量为 $3.6 \times 10^{10} M_{\odot}$, 约占 M31 总质量 (半径 30 kpc 范围内) 的 1/10。M31 核球的累积颜色 $B - V = 1.02$, $U - B = 0.48$ ^[7]。它贡献了 M31 可见光的 30% 左右^[20]。面亮度的观测表明, 从中心 200 pc 到 20 kpc, M31 的光度分布都很好地符合 $R^{1/4}$ 定律。产生这样的光度轮廓, 通常是与强烈的并合历史相关的, 表明 M31 的核球是在短时间内形成的。这与银河系核球的形成时标是一致的。通过对银河系核球区域 K 巨星样本的金属丰度分析和模型研究, Ferreras 等人 (2003)^[21] 估计银河系核球的形成时标不会大于 0.5 Gyr。同样, 对 M31 核球金属丰度的观测以及年龄的估计也可以为其核球形成提供线索^[22]。M31 核球累积

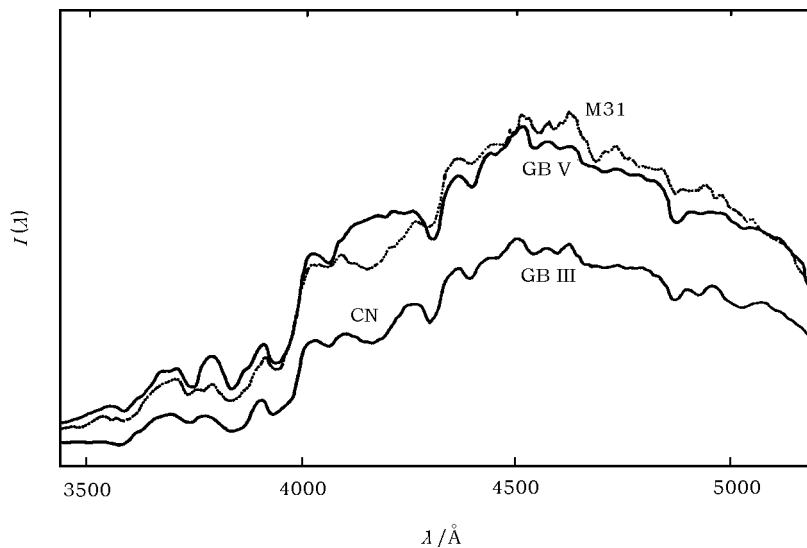


图 1 M31 核球的光谱能量分布及其与具有正常金属丰度的 G8V 和 G8III 型恒星的比较^[1]

此图表明 M31 中心核球发出的光是由富金属巨星主导的。

光度的观测表明, 对其光度的主要贡献来自富金属恒星, 如图 1 所示。同时核球中也观测到了天琴 RR 型变星, 表明核球存在很古老的成分 (≥ 10 Gyr), 这些现象都意味着 M31 核球早期形成时有较快的增丰过程。

M31 核球性质与银河系核球的相似性还表现在 X 射线源的光度分布上。早期的 X 射线观测表明 M31 核球的 X 射线谱类似于银河系中的低质量 X 射线双星^[23,24]。最新的 XMM-Newton X 射线卫星观测进一步证实了这一结论^[25]。实际上 M31 核球和盘中的 X 射线源的光度函数都非常类似于银河系^[26]。M31 核球的 X 射线源光度分布与盘的 X 射线源的光度分布是不同的, 核球由较亮的低质量 X 射线双星 (LMXBs) 占主导, 而盘则由较暗的高质量 X 射线双星 (HMXBs) 占主导。同时 M31 中年轻的 HMXBs 的 X 射线光度比老年的 LMXBs 以及球状星团要暗。这一结果与星暴星系的观测结果不一致。星暴星系中观测到了大量的高光度 X 射线源, Soria 和 Wu (2002)^[27] 认为这些源是明亮的年轻 X 射线双星。这可能与不同的星系类型以及不同的 X 射线光度范围有关。

2.3 盘 (disk)

2.3.1 盘的结构和气体分布

在星系形成和演化的研究中, 星系盘的形成和演化是关键, 因为盘是星系的主要成分, 大部分的重子物质都包含在星系的盘中。对 M31 的盘的详细研究历史可以追溯到哈勃对旋涡星云距离的测定。哈勃首次分辨出 M31 盘中的恒星, 而 Baade (1944)^[28] 则最早注意到盘中存在着不同的恒星成分。Babcock (1939)^[29] 发现盘中巴耳末线的强度随半径的增加而增大, 表明盘可能存在着一个径向的年龄梯度。在光度上, M31 的盘在 U 波段贡献了 M31 星系总光度的 65%, 在 V 波段则为 55%。Hodge 和 Kennicutt (1982)^[30] 及 Kent (1987)^[31] 的观测表明 M31 盘与其核球主轴的取向偏离 10° , 由此证明了 M31 核球确实是一个三轴椭球体。另一方面, 不同波段的测光表明 M31 指数盘的标长随波长增加而减小, 即从 U 波段的 6.5 kpc、R

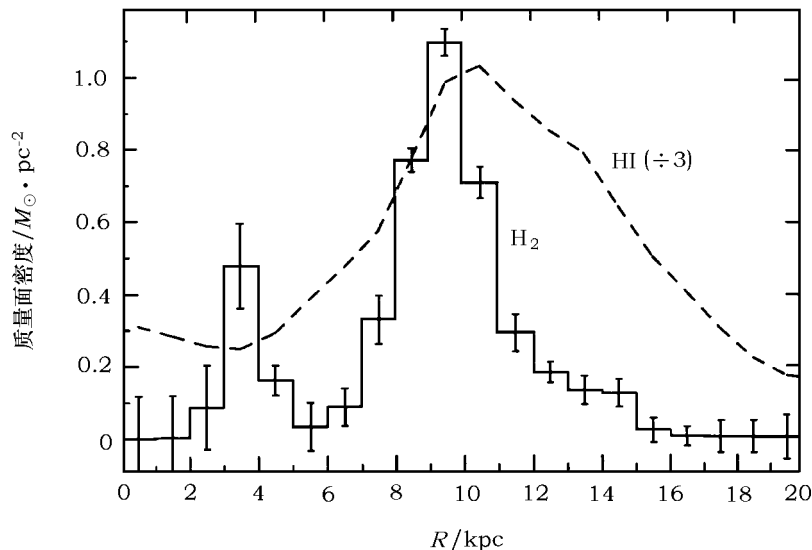


图 2 M31 中原子和分子气体质量面密度的径向分布^[35]

波段的 5.2 kpc^[32] 一直减小到 K 波段的 4.1 kpc^[33], 这一事实说明随着半径的增大, 盘星的平均年龄减小了。同时许多早期的测光也表明 M31 星系的盘有均匀的颜色 (未经过前景和内部红化的改正): $0.9 < (B - V) < 1.0$, $0.45 < (U - B) < 0.55$, 可见盘的累积光度由老年星族主导^[30,34]。M31 的盘在大的半径处颜色要蓝一些, 这可能是由于低金属丰度, 或者年轻星的相对贡献大一些而造成的, 但是也可能表明 M31 外盘星际气体中星际尘埃较少。

观测星系盘中气体和元素丰度的径向分布对理解盘的形成有重要的意义。星系盘上中性氢和分子氢的径向分布可以通过 CO 大尺度巡天观测来导出^[35,36]。与银河系不同的是, M31 中分子氢分布存在双峰特征 (图 2)。虽然 M31 与银河系具有大致相同的原子气体质量, 但是 M31 中的分子气体含量仅为银河系的 1/4。从离开中心 8 kpc 开始, M31 和银河系的气体分布都以近指数律下降。

M31 盘中镶嵌着两条旋臂。这样的旋臂结构是通过观测 M31 内部尘埃带或者外部区域的 OB 星协而描绘出来的。van den Bergh (1964)^[37] 已经绘制了 M31 中的 188 个 OB 星协。M31 中的星协比银河系、M33 和大麦云中的都要大, 这可能是由于 M31 盘中的年轻恒星的分布密度很低, 因而在很大距离上仍然可以观测到星协。由 OB 星协和 HII 区所描绘的 M31 旋涡结构在半径为 10 kpc 附近达到它的最大强度。M31 盘中累积的 H α 流量表明, 它目前的恒星形成率大约为 $0.35 M_{\odot}/\text{yr}$ ^[38]。Dame 等人 (1993)^[39] 发现 M31 中分子气体聚集在 10 kpc 的环里, 这一区域有大量的 OB 恒星和 HII 区, 是个恒星形成区。这与银河系盘中离银心 7 kpc 处的分子环结构十分类似。

Blair 等人 (1982)^[40] 利用 HII 区和超新星遗迹的分光观测研究了 M31 的径向金属丰度梯度。与其他的旋涡星系情况类似^[41,42], M31 盘中的氧、氮、硫的丰度存在一定的径向梯度, 大约为 -0.035 dex/kpc , 明显要比观测到的银河系盘的丰度梯度 -0.07 dex/kpc 小^[43]。如果星系的形成是内落占主导的, 那么丰度梯度的差别可能表明 M31 盘和银盘在形成时其内落时标的大小和径向变化都有较大的差别, 这可能与星系的总质量有关^[44]。Braun 和 Walterbos (1992)^[45] 通过观测 M31 盘的中性氢 (HI) 吸收研究了 M31 盘的气尘比, 发现其径向梯度与 Blair 等人的丰度梯度是一致的。同时也发现 M31 盘在 10~15 kpc 范围内的气尘比与银河系太阳附近的结果比较接近, 说明 M31 气体中的尘埃含量可能正比于其金属含量。

通过对 Palomar 巡天底片的数字化, Innanen 等人 (1982)^[46] 发现 M31 盘的最外部是翘曲的, 而射电观测也表明 M31 盘中的中性氢盘与恒星盘在同一方向有翘曲结构^[47]。银河系恒星盘和气体盘也有同样的观测特征^[48,49]。对近邻旋涡星系 (尤其是侧向星系) 的观测表明, 大部分旋涡星系存在盘的翘曲特征^[50,51]。这一特征显然与星系盘, 尤其是盘外部的形成历史有密切的关系。星系际磁场的作用可能是可能的原因^[52]。伴星系的潮汐作用 (对于银河系, 例如麦哲伦云) 也可能引起盘的翘曲。但是对银河系而言, 麦哲伦云的潮汐作用并不能完全解释观测到的翘曲幅度^[53,54]。Weinberg (1998)^[55] 认为围绕星系盘的中等质量的晕可能会放大伴星系的潮汐作用。晕在星系盘翘曲结构的形成中可能会起重要作用^[56]。Lopez-Corredoira 等人 (2002)^[57] 提出了星系际介质的吸积模型来解释盘的翘曲特征, 这一模型所需要的吸积率完全符合内落为主导的星系化学演化模型的要求 (约 $1 M_{\odot}/\text{yr}$)。但是盘的翘曲结构也在非常孤立的盘状星系中被发现, 如 NGC 6015^[58], 这需要新的机制来解释。Griv 等人 (2002)^[59] 通过 N 体数值模拟研究发现, 快速转动的星系盘在演化后期会在外部产生翘曲, 这可能是盘

的外部在垂直方向上发生了共振。对盘的翘曲现象目前仍没有可以被广泛接受的理论，但是它肯定会对气体的内落和星系形成提供非常有用的线索。

2.3.2 盘的恒星形成历史

与银盘一样，M31 的盘是研究大尺度恒星形成的极佳实验室。如果通过测光能区分盘上不同的恒星成分，那么结合恒星演化的模型就可以很好地理解盘中的恒星形成历史，从而为星系盘形成的重子耗散模型提供观测上的约束。

由于受到地面测光精度、视场大小以及角分辨率的限制，M31 盘的恒星形成历史研究直到最近才有一定的进展。地面大样本恒星测光的研究表明 M31 盘存在一定的年龄梯度，这与早期用氢的巴耳末线的观测结果一致。红外恒星测光观测则表明在 M31 盘的某些区域有离散和间歇的恒星形成^[60]。HST 上天以后，M31 盘恒星成分和恒星形成历史的观测有了显著的进展。HST 的高分辨率可以对 M31 盘族恒星进行更深的测光，同时可以对盘中的星团进行更精确的年龄测定^[61,62]。另外，对场星的观测提供了理解盘中不同区域的金属含量分布函数以及恒星形成历史的有用线索^[63~66]。但是 HST 的观测受到其视场较小的限制，大尺度的恒星形成历史还要借助于地面设备^[67~69]。

Williams (2002)^[65] 用 HST 对 M31 盘中 27 个区域进行了测光观测 (BVI)，给出了这些区域恒星成分的颜色 - 星等图，然后借助星族合成方法对 M31 盘的恒星形成历史进行了定量描述。对恒星形成历史给出了两个主要结果：(1) M31 的盘与银河系的盘一样，有非常少的老年贫金属恒星；(2) M31 盘作为一个整体，其恒星形成速率在过去 1 Gyr 中很低。另外，盘中大部分老年星族比较丰富的区域中也包含中等年龄的、富金属的星族，这可能与 M31 的“厚盘”有关。这些星族与旋臂中的年轻星族相连接。所有富含老年星族的区域在早期的盘形成历史中表现出相似的恒星形成率和金属丰度 (外部的个别区域除外，因为它们比其他区域更远离 M31 星系的中心)。M31 盘作为一个整体在它演化的早期恒星形成比较活跃，而较高的金属丰度则表明 M31 的盘与银盘一样，缺乏老年的贫金属恒星。同时，盘的不同位置恒星形成率的不同表明在过去的几个 Gyr 里，一些区域的恒星形成不很活跃，而另一些区域维持其早期的形成率。因为老年恒星自从形成后被很好地混合了，所以无法知道早期的恒星形成是总体性的还是局部性的。这些结果仅仅说明 M31 盘的总体恒星形成率在 1 Gyr 以前是较大的，或者可以这样来描述：在 1 Gyr 前，M31 盘的恒星形成比较活跃 ($2\sim 20 M_{\odot}/\text{yr}$)，之后，除了个别富气体区域有零星的或连续的恒星形成外，盘的总体恒星形成率变慢了。

Bellazzini 等人 (2003)^[66] 用 HST 在 V 和 I 波段进行了类似的测光工作。他们的 16 个测光区域范围离 M31 中心 4.5~35 kpc，包含了盘族和晕族恒星。主要的恒星成分是红巨星和红簇 (red clump) 恒星。在盘某些区域的颜色 - 星等图上发现有明显的蓝色主序峰 ($B - V < 0.5$)，表明在过去的 0.5~1 Gyr 中盘中的恒星形成历史在空间上是不均匀的。但是在所有被观测的区域中 (环境和离中心的距离都很不相同)，金属含量的分布在总体上是相似的。而在某些区域则存在明显富金属的成分 ($[\text{Fe}/\text{H}] > -0.2$)。在 M31 短轴方向可能存在微小的金属丰度梯度，即越是盘的外部，贫金属成分 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -0.8$) 所占的比例越高。

利用地面大望远镜所作的大视场测光观测，Williams (2003)^[67] 研究分析了 M31 盘中南北 345 个区域恒星的颜色 - 星等图。对恒星年龄分布的研究表明零星和间歇的恒星形成主要发生在富气体的旋臂区域。盘中始终较为活跃的区域可能受到了 NGC 205 和 (或者) M32 的

作用。强有力的证据表明在过去的 100 Myr 内盘中的恒星形成过程是分阶段性的,且局限于旋臂内气体多的区域。如果是密度波的传播而引起恒星分阶段形成,那么在通过旋臂间气体含量较少的区域时,密度波不能引起这样的恒星形成。总之,从过去的 250 Myr 前到 50 Myr 前, M31 盘的总体恒星形成率减小了大约 50%。在 25 Myr 前,盘的总体恒星形成率降到最低,然后在最近 20 Myr 时间内又增加了大约 20%。把观测结果归算到整个盘表明, M31 盘现在的总恒星形成率大约为 $1 M_{\odot}/\text{yr}$, 比银河系盘要小。

2.4 球状星团的分布和晕结构

星系晕中最主要的成分是球状星团,它们一般都是年老和贫金属的。球状星团的比频、金属丰度以及质量谱等观测特征是研究星系早期形成和演化的最好探针^[70]。但是对大部分河外星系而言,从地面观测球状星团相对较为困难,因为较远星系中的星团通常较暗,同时又容易被母星系的背景光所淹没。由于 M31 离银河系较近,它是第一个发现具有球状星团的河外星系^[71]。Hubble 最早分辨出其中的 140 个球状星团,随后许多新的星团被陆续发现。到目前为止在 M31 中已有较详细观测资料的球状星团有约 400 多个^[72,73],而星团的总数大约有 700 多个^[74]。另外还发现有天琴 RR 型变星和老型红巨星。M31 中球状星团的数目是银河系的数倍,这可能与 M31 有较高的光度而且具有比银河系更早的形态类型有关。

最早对 M31 中球状星团进行详细光谱和测光研究的是 van den Bergh (1969)^[7],他借助 Palomar 5 m 海尔望远镜发现, M31 球状星团的平均金属丰度大于银河系,而且金属丰度似乎与半径无关。van den Bergh 也测定了其中 33 个星团的速度。Spinrad 和 Schweizer (1972)^[75]观测了 8 个 M31 的球状星团,发现这些星团的金属丰度范围与 van den Bergh 的结果是一致的,其中 3 个星团超丰。

Huchra 等人 (1982)^[76]用多镜面望远镜 (MMT) 研究了 M31 中大约 60 个球状星团的光谱,发现这些星团系统有明显的转动特征。转动速度约为 80 km/s,与银河系球状星团系统的速度 60 km/s 基本相似。球状星团转动的发现对了解星团系统的形成和演化有重要的意义。这一现象表明星团可能是从一个缓慢转动的系统中形成的,或者某些星团是通过与盘的相互作用而绕星系中心转动的。进一步的研究表明 M31 中的球状星团可以从运动学角度分为两种成分,如 Freeman 发现贫金属球状星团基本上没有转动,其速度弥散度为 90 km/s,而富金属星团的转动基本上服从星族 I 恒星的转动模式^[77]。Elson 和 Waltherbos (1988)^[78]则提出按 3 种金属含量范围划分的球状星团分布,其中富金属星团空间分布具有盘状结构,贫金属星团没有转动,但是其空间分布比中等金属丰度星团要更延伸。Huchra 等人 (1991)^[79]观测分析了 M31 中 150 个球状星团的金属丰度和运动学性质,发现 M31 球状星团的性质与银河系球状星团非常类似。星团的金属丰度与其光度没有关系,丰度随径向投影距离有微弱的梯度。星团平均金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.2$,比银河系平均值 ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.40$) 稍高。这一观测性质与普遍接受的球状星团平均金属丰度和母星系光度之间的关系是一致的^[80,81]。Huchra 等人还发现 M31 外部的球状星团大约以 80 km/s 的速度转动,贫金属星团和富金属星团之间没有差别。总的速度弥散度大约为 155 km/s。如果取 M31 离银河系的距离为 690 kpc,那么可以推出 M31 的质量约为 $3.1 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。这一数值稍小于早期用转动曲线或者 21 cm 谱线观测得到的结果^[82,83]。

对 M31 球状星团研究最重要的发现之一是,球状星团可以分为两种成分,它们具有不同

的金属丰度、运动学和空间分布特征^[83,84]，这与银河系球状星团的分布非常类似。实际上许多河外星系中的球状星团分布也有上述性质，这已经成为球状星团和星系形成模型的一个重要约束^[85,86]。另一个重要的问题则是这两类金属丰度不同的球状星团是否有相似的或完全不同的年龄？或者说球状星团中是否存在年龄 - 金属丰度关系？

在银河系方面，基于均匀的 (V, I) 测光数据，Salaris 和 Weiss (2002)^[87] 研究了其中 55 个球状星团的年龄和金属丰度特征，他们发现贫金属的球状星团是在大约 1 Gyr 内同时形成的，而富金属的球状星团有较大的年龄弥散。球状星团的年龄 - 金属丰度关系受到所采用的金属丰度定标的影响。对整个球状星团样本，其年龄梯度为 $-1.3 \sim -2.4$ Gyr/dex。如果把样本净化到纯晕球状星团，那么这一梯度将更为明显，达到 $-2.3 \sim -4.3$ Gyr/dex。基于这一较大的样本，Salaris 和 Weiss 认为年龄可能是决定星团水平支形态的第二参数。Perrett 等人 (2002)^[84] 用中等分辨率的光纤光谱仪观测了近 200 个 M31 中的球状星团，获得了这些星团的视向速度和金属丰度数据。结果表明球状星团的金属丰度分布是双成分的，贫金属团和富金属团的平均金属丰度 [Fe/H] 分别约为 -1.4 和 -0.5 。图 3 给出了 Perrett 等人得到的 M31 球状星团金属丰度分布以及与银河系球状星团的比较。在空间分布上，富金属球状星团具有一定的中心聚度，并且有较高的转动速度；贫金属团则有更加延伸的空间分布，以及一定的转动速度。

在球状星团的空间分布和金属丰度分布上，M31 与银河系有许多相似的地方，如上面所讨论的金属丰度的双峰结构。一个明显不同的地方是，与银河系相比，在 M31 的中心和富金属球状星团中都有氮的增丰，其丰度特征更接近于椭圆星系^[88,89]。一般认为氮元素合成于中小质量恒星^[90]，但是这一核合成机制的微小变化，如考虑中等质量恒星的质量损失等就会使氮的核合成产额发生很大改变。所以 M31 中氮的增丰意味着其化学增丰历史与银河系会有较大的差异。

Barmby 等人 (2000)^[73] 通过光学和近红外测光，利用星团的水平支形态研究了 M31 中 435 个球状星团的年龄和金属丰度。结果表明，星团的双成分结构类似于银河系晕族和核球 (及盘族) 球状星团结构。M31 球状星团似乎存在着微小的径向金属丰度梯度，如图 4 所示。这隐含着在球状星团系统的形成中经历了一定的耗散过程，原初星系气体的增丰时标比坍缩时标要短。另外也没有发现星团的光度和金属丰度之间的相关性，表明球状星团在其形成和演化中没有明显的自增丰效应，也没有明显的富金属冷气体的内落。运用测光方法对年龄的估计表明，至少有部分富金属的球状星团比大部分其他星团年轻，其最大年龄差别可以达到 8 Gyr。在化学演化模型中，如此长时标的演化会使模型预言的丰度远远超过观测到的星团气体的丰度，因此这么大的年龄间隔肯定有其他的产生机制。一种可能的机制是富金属球状星团形成于星系并合事件^[91]。当然这样的并合事件不能非常激烈，否则可能影响到盘的稳定。另一种可能是贫金属球状星团形成于星系本身形成之前，而富金属星团与星系一起形成。如果第二种可能性成立，那么可以预期在其他星系的球状星团系统中会观测到类似的年龄差别，但是这需要有一种能精确确定河外星系球状星团年龄的方法。

M31 晕族场星与其球状星团的观测特性不完全相似。在金属丰度方面，通过对场星的颜色 - 星等图分析以及亮红巨星的光谱观测 (用 HST)，发现 M31 场星的平均金属丰度较高，达到 $-0.6 \sim -0.7$ dex^[92~94]，明显比银河系平均值高。场星的金属丰度分布也是不对称的，可

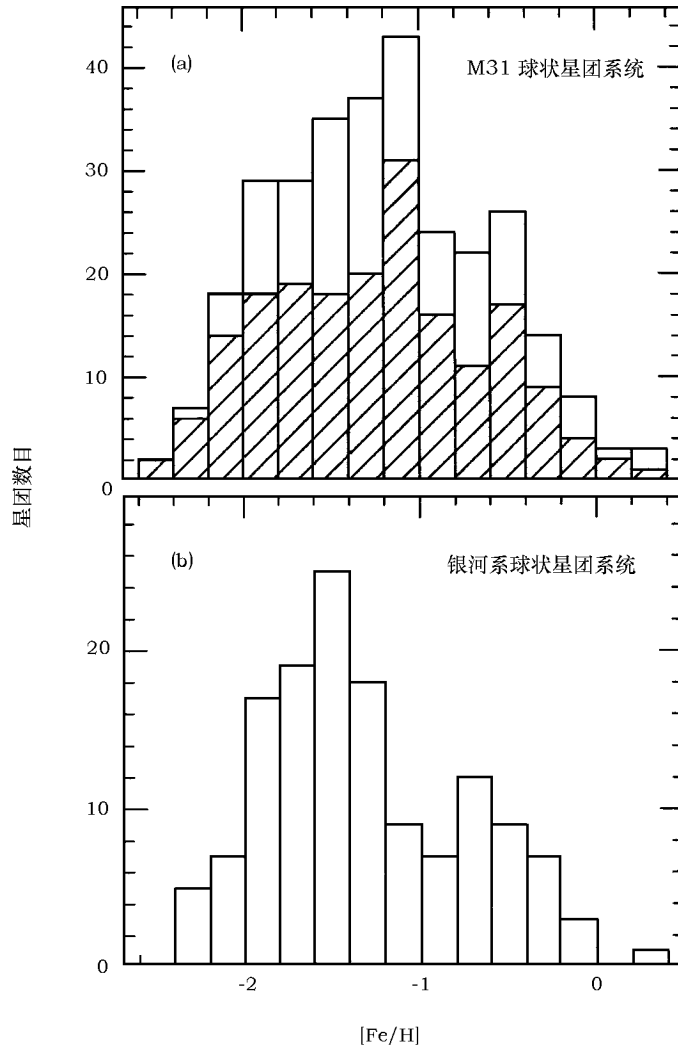


图3 M31 及银河系球状星团金属丰度分布的比较^[84]

金属丰度的双峰特征非常明显,而且 M31 和银河系球状星团两种成分各自的平均金属丰度都非常接近。

(a) 图中的阴影部分是地面大视场光纤光谱仪获得的样本。

以明显地分为富金属和贫金属两种成分。它们的峰值与球状星团类似,分别约为 -0.6 dex 和 -1.5 dex。即使在星系的外部,大部分的场星也属于富金属成分。同时没有证据表明在半径从 $9 \sim 20$ kpc 范围内晕星存在径向金属丰度梯度^[95]。因此场星与球状星团的丰度分布很不同。与银河系类比一下,可以发现 M31 的富金属恒星成分类似于银河系的厚盘。在空间分布上, M31 富金属成分的形态是扁的,短长轴比大约为 0.6 ,也许就是一个厚盘^[64,96],形成于某种并合事件。因此从总体上看, M31 场星的金属丰度分布与银河系场星有明显的区别^[97]。通过对 M31 主序后恒星的大面积计数发现 M31 有密度过高的区域,很可能是由于潮汐相互作用

用而产生的星流的遗迹。这需要利用地面大望远镜 (如 Keck 10 m), 或空间望远镜 (如 HST) 获得恒星详细的运动学数据后来确认。相信在 GAIA 天文卫星上天后 (大约 2010 年) 可以获得更多的线索。

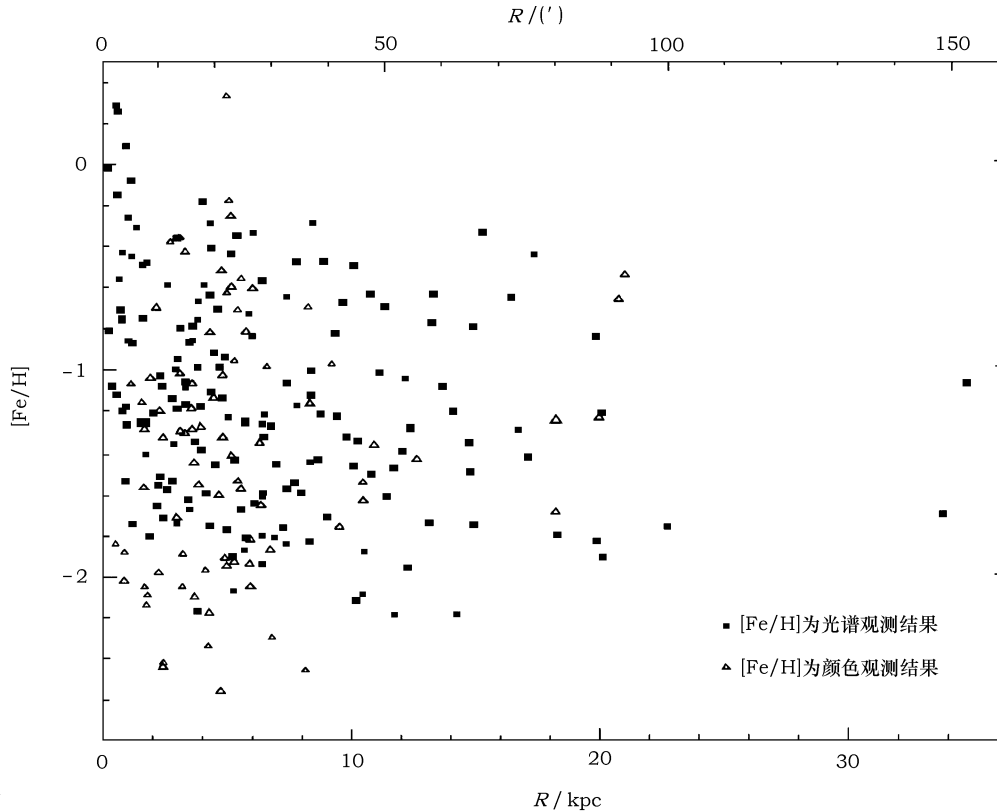


图 4 M31 球状星团金属丰度梯度^[73]

在恒星密度分布上, Harris (1991)^[98] 认为银河系的晕星和球状星团有着相同的密度分布。而 Pritchett 和 van den Bergh (1994)^[99] 则发现 M31 晕的密度分布情况很复杂: 外晕中恒星的径向密度分布可以用指数律 $\rho(R) \propto R^{-5}$ ($R > 10$ kpc) 来拟合, 而晕外部的球状星团的分布则可以用 $\rho(R) \propto R^{-3}$ 来表示, 这表明球状星团分布比场星分布更为延伸。由于银河系的密度分布是通过观测天琴 RR 型变星的密度分布得到的, 而天琴 RR 型变星的密度分布在不同半径处会有所变动 (由于年龄和金属丰度不同的缘故); 同时, 在银河系中可观测到的球状星团仅约为 150 个, 所以得到的 $R > 10$ kpc 的星团密度分布不完全正确。因此, 银河系中星团和晕星密度分布还不能完全确定。分布在离中心 200 pc 一直到 20 kpc 范围内的 M31 晕星都可以用 de Vaucouleurs $R^{1/4}$ 规律来近似表示。但是对银河系, Bahcall 和 Soneira (1984)^[100] 通过恒星计数发现, 只有暗星较好地符合 $R^{1/4}$ 规律, 然而他们的暗星数目并不反映晕的密度分布律, 这是因为他们的恒星计数工作仅仅基于一个有限范围的样本 ($4 \text{ kpc} < R < 12 \text{ kpc}$)。M31 晕的扁度在不同半径处几乎为常数, 约 0.55。而 Freeman (1987)^[101] 和 Gilmore 等人

(1989)^[102] 认为银河系晕的扁度有一个很大的范围。Wyse 和 Gilmore (1988)^[103] 所做的恒星计数工作表明, 在一个特征半径处 (银心距大约 10 kpc 处) 银河系晕的扁度约为 0.6, 也就是说 M31 和银河系晕的扁度在离星系中心 10 kpc 处很相似。

3 M31 和银河系的形成机制: 吸积和并合

在探索银河系的形成机制上, 形成时标问题曾经是争论的焦点。代表这一争论的两篇最著名的论文是 Eggen、Lynden-Bell 和 Sandage (1962, 简称 ELS)^[104] 及 Searl 和 Zinn (1978, 简称 SZ)^[105]。ELS 研究了晕中高速恒星的运动, 发现当金属丰度降低时, 恒星的轨道能和偏心率增大, 而它们的轨道角动量则减小。他们推断, 贫金属恒星位于晕中, 是在相对均匀、孤立的原银河系云从宇宙膨胀过程中退耦阶段之后不久的快速坍缩 (约 0.3 Gyr) 期间生成的。这暗示了银河系球状星团应该不具有年龄的弥散。而 SZ 指出, 银河系球状星团的金属丰度有很大的分布范围, 它们基本上与离开银心的距离无关, 因为晕是在很长时期内 (大于 1 Gyr) 由一些质量约为 $10^8 M_{\odot}$ 的独立碎块构建起来的。Berman 和 Suchkov (1991)^[106] 认为一个初始的星暴过程产生了强烈的星风, 从而抑制了这之后几个 Gyr 内的恒星形成。随后, 这个原初星系的遗迹收缩、冷却而形成现在观测到的银河系的主要恒星成分。通过分析一组球状星团样本的年龄, Chaboyer 等人 (1996)^[107] 认为银河系晕的形成时标大约是 5 Gyr, 或者说是银河系年龄的 30%~40%。目前普遍认为银河系的内晕是快速坍缩形成的, 其时标为 0.5~1 Gyr; 而外晕是吸积银河系的伴星系或者并合小的团块形成的, 其时标要长得多^[108]。

M31 是本星系群中最亮的天体, 因此它可能是由较小的星系并合形成的^[74]。Pritchett 和 van den Bergh (1994)^[109] 的恒星计数工作表明, M31 椭球的光度径向轮廓在很大的半径范围内可以由 de Vaucouleur $R^{1/4}$ 定律拟合。而具有相当质量的较小星系的并合, 可产生这样的光度轮廓^[110,111]。M31 中晕的密度比银河系高一个量级, 这意味着银河系的形成可能开始于单一原初星系的坍缩, 随后气体的内落和俘获则对银河系晕的形成和演化起一定的作用 (SZ 机制)。同银河系相比, M31 的球状星团和晕星的平均金属丰度很高^[7,112,113], 这表明 M31 中的晕星和重元素产生在很久以前。对 M31 星团的测光表明 M31 中的红色星团 ($B - V > 0.6$) 占主要部分, 原因可能是大部分星团年龄很老, 或者由于其金属丰度很高 (M31 晕中的富金属也可能起源于核球中富金属风)。因此相比于银河系, M31 可能有着更为活跃的早期演化历史, 而现在它则相对比较平静。M31 和银河系不同的总体平均恒星形成率亦表明了这一点^[114,67]。

根据现代流行的冷暗物质宇宙学模型, 星系的形成开始于早期小尺度的团块, 这些团块通过自身引力作用实现位力化, 然后进一步并合形成更大的引力束缚系统, 即星系或星系团。这一思想很容易与 SZ 由小碎块形成银晕的观点合拍。但是在早期, 无论是 ELS 还是 SZ, 他们的银河系形成模型都没有在宇宙学框架下进行考虑, 因此都是不全面的。在目前的星系形成理论中, 像银河系和 M31 这样的盘状星系被认为是由暗晕中的重子物质冷却并坍缩而成的。虽然在具体的形成过程中存在许多问题, 如角动量失配 (mismatch of angular momentum profile)、角动量灾难 (angular momentum catastrophe) 以及过冷 (over-cooling) 等^[115], 但是这一图像已经能够成功地解释大量的观测现象, 其基本框架是非常成功的。近年来高精度的 N 体数值模拟也提供了非常有用的线索, 如 Chen 等人 (2003)^[116]、Zhao 等人 (2003)^[117] 的

研究表明,暗晕中的重子可以分为冷相和热相,冷相气体具有较低的转动参量,可能对应着晕的快速吸积,并与星系核球的形成有关;热相气体则具有比暗晕更高的转动参量和更大的单位质量角动量 (specific angular momentum),它可能对应着晕的慢速吸积,与星系盘的形成有关。所以无论是 M31 还是银河系,它们的形成机制很可能需要结合 ELS 和 SZ 理论,而详细的观测数据则为以上理论提供了严格的约束。

观测表明,在许多盘状星系中存在着厚盘(如银河系的厚盘以及 M31 可能存在的厚盘)。银河系的厚盘质量大约是薄盘的 10%,球状星团与厚盘几乎有相同的丰度范围,但是它们的具体丰度分布则并不相同。在年龄上,球状星团的年龄范围是 12~14 Gyr,而厚盘看来至少有 12 Gyr 的年龄。从宇宙演化的观点看,厚盘和球状星团的年龄显然都要回退到红移为 1~5 时的重子耗散时期。厚盘的存在表明在星系形成的早期,小团块或小星系之间的并合和相互作用是不可忽略的。近年来,通过大样本的恒星视向速度和金属丰度巡天观测发现了越来越多的星系并合或相互作用的证据。例如人马座矮星系与银河系核球的相互作用遗迹^[118]; SDSS 巡天发现的离银河系中心 18 kpc 处银盘上大约 5 kpc 宽的恒星和星团环等^[119,120]。对 M31,最近的 21 cm 射电谱线观测发现在离中心大约 50 kpc 处,存在着非常弱但是延伸的围绕 M31 晕的中性氢云^[121]。这一特征非常类似于在银河系周围观测到的高速中性氢云 (HVCs),其最可能的起源就是最近的一次或数次伴星系并合事件。Brown (2003)^[122] 用 HST 上的高级巡天照相机详细研究了 M31 晕的恒星形成历史。他对 M31 短轴方向离开中心大约 11 kpc 处的一个区域进行了深度测光(大约包含了 300000 颗恒星),通过与银河系球状星团的比对发现,在所测光的区域中,除了与银河系类似的大量老年贫金属成分外,另有大约 30% 的恒星是中等年龄 (6~8 Gyr) 和富金属丰度的 ($[Fe/H] > -0.5$)。如此大的年龄弥散意味着 M31 晕可能经历了一个比银河系晕更激烈的早期并合过程。

4 结 束 语

确定旋涡星系中不同恒星成分和恒星形成历史是星系形成和演化理论的一个重要约束^[123,124]。银河系、M31 和 M33 是 3 个最重要的本地星系样本,但是由于我们位于银河系盘上,要很好地理解银河系本身的恒星形成历史十分困难,因此对 M31 盘和晕的观测就显得非常重要。由于缺少对盘和晕恒星的深度测光数据,目前对 M31 盘和晕的了解仍然十分肤浅。HST 虽然具有高的分辨率,但是它有限的视场限制了对 M31 大尺度恒星形成的研究。当然,最近几年的测光和分光工作已经提供了许多有关 M31 核、核球、盘和晕的数据,使得更详细地比较 M31 与银河系的性质成为可能。通过这样的比较可以更好地理解旋涡星系的早期形成历史和演化过程,例如晕的坍缩史、并合过程、星系相互作用、厚盘的起源等。

最后,我们在表 1 中给出目前所知的银河系和 M31 的大部分观测特征。

表 1 M31 与银河系基本观测特性的比较

观测特征或参数	M31	参考文献	银河系	参考文献
光谱型	SbI-II	[1]	SbcI-II	[1]
V 波段光度 / L_{\odot}	2.6×10^{10}	[1]	2.1×10^{10}	[1]
距离 /kpc	760 ± 35 (离银心)	[1]	8.5 ± 0.5 (离太阳)	[1]
转动速度 / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	260	[1]	220	[1]
半径 R 内总质量 / M_{\odot}	$1.4R \times 10^{10}$	[74]	$1.1R \times 10^{10}$	[74]
盘平均 SFR / $M_{\odot} \cdot \text{yr}^{-1}$	1.0	[67]	2~6	[125]
	0.2~0.5	[54]		
中性氢质量 / M_{\odot}	$(4 \sim 6) \times 10^9$	[1,51]	4.0×10^9	[126]
分子氢质量 / M_{\odot}	0.25×10^9	[51]	1.2×10^9	[127]
气体面密度 / $M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-2}$	4~6 (10 kpc 附近)	[51]	13.0 (太阳附近)	[125]
核球速度弥散度 / $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	155	[1]	130	[1]
核球有效半径 /kpc	2.4	[1]	2.5	[1]
核心质量 / M_{\odot}	7.0×10^7	[1]	0.25×10^7	[1]
核球质量 / M_{\odot}	3.6×10^{10}	[74]	2.0×10^{10}	[74]
盘质量 / M_{\odot}	15×10^{10}	[74]	11×10^{10}	[74]
30 kpc 以内总质量 / M_{\odot}	37×10^{10}	[74]	30×10^{10}	[74]
盘的标长 /kpc	U 6.8	[32]		
	B 5.8	[32]	4.0~5.0	[125]
	V 5.3	[32]		
	R 5.2	[32]		
	K 4.1	[33]	2.3~2.8	[125]
颜色梯度 / $\text{mag} \cdot \text{kpc}^{-1}$	$U - B$ 0.03	[32]		
	$B - V$ 0.018	[32]		
	$B - R$ 0.019	[32]		
丰度梯度 / $\text{dex} \cdot \text{kpc}^{-1}$	-0.035	[40]	-0.07	[43]
球状星团平均金属丰度 [Fe/H]	-1.21	[75]	-1.40	[87]
球状星团比频	4.7 ± 1.0	[74]	4.9 ± 0.8	[74]
球状星团数目	700 ± 10	[74]	162 ± 15	[74]

致谢 本文写作过程中得到了王家骥、傅承启两位老师的帮助和有益讨论, 特此表示感谢。

参考文献:

- [1] van den Bergh S. *Astron. Astrophys. Rev.*, 1999, 9: 273
- [2] Rosemary F G W. 2002, preprint (astro-ph/0204190)
- [3] Gebhardt K, Kormendy J, Ho L C *et al.* *ApJ*, 2000, 543: L5
- [4] Kormendy J, Richstone D. *ARA&A*, 1995, 33: 581
- [5] Kormendy J, Bender R. *ApJ*, 1999, 522: 772
- [6] Tremaine S D, Ostriker J P, Spitzer L. *ApJ*, 1975, 196: 407

-
- [7] van den Bergh S. *ApJS*, 1969, 19: 145
- [8] Sandage A R, Becklin E E, Neugebauer G. *ApJ*, 1969, 157: 55
- [9] Spillar D J, Canterna R, Carels K G *et al.* *ApJ*, 1990, 349: L13
- [10] Welch G A. *ApJ*, 1982, 259: 77
- [11] Dressler A, Richstone D O. *ApJ*, 1988, 324: 701
- [12] Kormendy J. *ApJ*, 1988, 325: 128
- [13] Light E S, Danielson R F, Schwarzschild M. *ApJ*, 1974, 194: 257
- [14] Laucer T R, Faber S M, Groth E J. *AJ*, 1993, 106: 1436
- [15] Tremaine S. *AJ*, 1995, 110: 628
- [16] Sambhus N, Sridhar S. *A&A*, 2002, 388: 766
- [17] Mould J, Graham J, Matthews K *et al.* *ApJ*, 1989, 339: L21
- [18] Laucer T R, Tremaine S, Ajhar E A. *ApJ*, 1996, 471: 79
- [19] Fukugita M, Hogan C J, Peebles P J E. *ApJ*, 1998, 503: 518
- [20] de Vaucouleurs G. *ApJS*, 1961, 5: 233
- [21] Ferreras I, Wyse R F G, Silk J. *MNRAS*, 2003, 345: 1381
- [22] Jacobi G H, Ciardullo R. *ApJ*, 1999, 515: 169
- [23] Fabbiano G, Trinchier G, van Speybroeck L S. *ApJ*, 1987, 316: 127
- [24] Makishima K, Ohashi T, Hayashida K. *PASJ*, 1989, 41: 697
- [25] Trudolyubov S, Borozdin K N, Pridehorsky W C *et al.* *ApJ*, 2002, 571: L17
- [26] Grimm H J, Gilfanov M, Sunyaev R. *A&A*, 2002, 391: 923
- [27] Soria R, Wu K. *A&A*, 2002, 384: 99
- [28] Baade W. *ApJ*, 1944, 100: 137
- [29] Babcock H W. *Lick Obs. Bull.*, 1939, 498: 41
- [30] Hodge P W, Kennicutt R C. *AJ*, 1982, 87: 264
- [31] Kent S M. *AJ*, 1987, 94: 306
- [32] Walterbos R A M, Kennicutt R C. *A&A*, 1988, 198: 61
- [33] Hiromoto N, Maihara T, Oda N. *PASJ*, 1983, 35: 413
- [34] Walterbos R A M, Kennicutt R C. *A&A*, 1987, 69: 311
- [35] Koper E, Dame F P, Israel T P. *ApJ*, 1991, 383: L14
- [36] Loinard L, Allen R J, Lequeux J. *A&A*, 1995, 301: 68
- [37] van den Bergh S. *ApJS*, 1964, 9: 65
- [38] Walterbos R A M, Braun R. *ApJ*, 1994, 431: 156
- [39] Dame T M, Koper E, Israel F P *et al.* *ApJ*, 1993, 418: 730
- [40] Blair W P, Kirshner R P, Chevalier R A. *ApJ*, 1982, 254: 50
- [41] Dennis Z. *ApJ*, 1992, 390: L73
- [42] Vila-Costas M B, Edmunds M G. *MNRAS*, 1992, 259: 121
- [43] 侯金良, 常瑞香. *天文学进展*, 2001, 19(1): 68
- [44] Chang R X, Shu C G, Hou J L. 2004, in preparation
- [45] Braun R, Walterbos R A M. *ApJ*, 1992, 386: 120
- [46] Innanen K A, Kamper K W, Papp K A *et al.* *ApJ*, 1982, 254: 515
- [47] Casoli F, Combes F. *A&A*, 1988, 198: 43
- [48] Reed B C. *AJ*, 1996, 111: 804
- [49] Gyuk G, Flynn C, Evans N. *ApJ*, 1999, 521: 190
- [50] Sanchez-Saavedra M L, Battaner E, Guijarro A *et al.* *A&A*, 2003, 399: 457
- [51] Tshetnikov V, Combes F. *A&A*, 1998, 337: 9
- [52] Battaner E, Jimenez-Vicente J. *A&A*, 1998, 332: 809
- [53] Garcia-Ruiz I, Kuijken K, Dubiuski J. *MNRAS*, 2002, 337: 459
- [54] Hunter C, Toomer A. *ApJ*, 1969, 155: 747

-
- [55] Weinberg M D. MNRAS, 1998, 299: 499
- [56] Binney J. ARA&A, 1992, 30: 51
- [57] Lopez-Corredoira M, Betancort-Rijo J, Beckman J E. A&A, 2002, 386: 169
- [58] Verdes-Montenegro L, Bosma A, Athanassoula E. A&A, 1997, 321: 754
- [59] Griv E, Gedalin M, Yuan C. ApJ, 2002, 580: L27
- [60] Kodaira K, Vasevicius V, Taumr M. ApJ, 1999, 519: 153
- [61] Williams B F, Hodge P W. ApJ, 2001, 548: 190
- [62] Williams B F, Hodge P W. ApJ, 2001, 559: 851
- [63] Ferguson A M N, Johnson R A. ApJ, 2001, 559: 13
- [64] Sarajedini A, van Duyne J. AJ, 2001, 122: 2444
- [65] Williams B F. MNRAS, 2002, 331: 293
- [66] Bellazzini M, Cacciari C, Federici L *et al.* A&A, 2003, 405: 867
- [67] Williams B F. AJ, 2003, 126: 1312
- [68] Hodge P, Lee M G. ApJ, 1988, 329: 651
- [69] Morris P W, Reid I N, Griffiths W K *et al.* MNRAS, 1994, 271: 852
- [70] 王家骥. 天文学进展, 2002, 20(1): 74
- [71] Hubble E P. ApJ, 1932, 76: 44
- [72] Fusi Pecci F, Cacciari C, Federici L *et al.* ASP Conf. Ser., 1993, 48: 410
- [73] Barmby P, Huchra J, Brodie J P *et al.* AJ, 2000, 119: 745
- [74] Freeman K C. IAU Symp. 192, San Francisco: ASP, 1999: 383
- [75] Spinrad H, Schweizer F. ApJ, 1972, 171: 403
- [76] Huchra J, Stauffer J, van Speybroeck L. ApJ, 1982, 259: 57
- [77] Freeman K C. IAU Colloq. 88, Schenectady: L Davis Press, 1985: 241
- [78] Elson R A, Walterbos A M. AJ, 1988, 96: 1383
- [79] Huchra J P, Brodie J P, Kent S M. ApJ, 1991, 370: 495
- [80] van den Bergh S. ApJ, 2003, 590: 797
- [81] Mould J R, Oke J B, de Zeeuw P T *et al.* AJ, 1990, 99: 1823
- [82] Rubin V C, Ford W K. ApJ, 1970, 159: 379
- [83] Roberts M S, Whitehurst R N. ApJ, 1975, 201: 327
- [84] Perrett K M, Bridges T J, Hanes D *et al.* AJ, 2002, 123: 2490
- [85] 林清, 赵君亮, 宋国玄. 天文学进展, 2002, 20(1): 84
- [86] 林清, 赵君亮, 宋国玄. 天文学进展, 2001, 19(4): 477
- [87] Salaris M, Weiss A. A&A, 2002, 388: 492
- [88] Ponder J M, Burstein D, O'Connell R W *et al.* AJ, 1998, 116: 2297
- [89] Worthy G. PASP, 1998, 110: 888
- [90] Woosely S E, Weaver A. ApJS, 1995, 101: 181
- [91] Ashman K M, Zepf S E. ApJ, 1992, 384: 50
- [92] Holland S, Fahlman G G, Richer H. AJ, 1996, 112: 1035
- [93] Rich R M, Mighell K J, Neiu J D. ASP Conf. Ser., 1996, 92: 544
- [94] van den Bergh S. PASP, 2000, 112: 4
- [95] van den Bergh S, Pritchett C J. IAU Symp. 149, Dordrecht: Reidel, 1992: 161
- [96] Wyse R F G, Gilmore G. AJ, 1998, 95: 1404
- [97] Durrell P R, Harris W E, Pritchett C J. AJ, 1994, 108: 2114
- [98] Harris W E. ARA&A, 1991, 29: 543
- [99] Pritchett C J, van den Bergh S. AJ, 1994, 107: 1730
- [100] Bahcall N A, Soneira R M. ApJS, 1984, 56: 67
- [101] Feeman K C. ARA&A, 1987, 25: 603
- [102] Gilmore G, Wyse R F G, Kuijken K. ARA&A, 1989, 27: 555

- [103] Wyse R F G, Gilmore G. *AJ*, 1988, 95: 1404
- [104] Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A. *ApJ*, 1962, 136: 748
- [105] Searl L, Zinn R. *ApJ*, 1978, 225: 357
- [106] Berman B G, Suchkov A. *Ap&SS*, 1991, 184: 169
- [107] Chaboyer B B, Demarque P, Sarajedini A. *ApJ*, 1996, 459: 558
- [108] Matteucci F. *The Chemical Evolution of the Galaxy*, Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2001
- [109] Pritchett C J, van den Bergh S. *AJ*, 1994, 107: 1730
- [110] White S D M. *MNRAS*, 1979, 189: 831
- [111] Barnes J. In: Wielen R ed. *Dynamics and Interactions of Galaxies*, Berlin: Springer, 1990: 186
- [112] Mould J R, Kristian J. *ApJ*, 1986, 305: 591
- [113] Pritchett C, van den Bergh S. *ApJ*, 1988, 331: 135
- [114] Waltherbos R A M. In: Berkhuijsen E M, Beck R, Waltherbos R A M eds. *The Interstellar Medium in M31 and M33*, Proc. 232, WE-Heraeus-Seminar, Bad Honnef, Germany, 2000: 99
- [115] 罗智坚, 束成钢. *天文学进展*, 2004, 22(2): 152
- [116] Chen D N, Jing Y P, Yoshikawa K. 2003, preprint (astro-ph/0307270)
- [117] Zhao D H, Mo H J, Jing Y P *et al.* *MNRAS*, 2003, 339: 12
- [118] Ibata R, Gilmore G, Irwin M J. *Nature*, 1994, 370: 194
- [119] Yanny B, Newberg H, Grebel E *et al.* *ApJ*, 2003, 588: 824
- [120] Frinchaboy P M, Majewski S R, Crane J D *et al.* 2003, preprint (astro-ph/0311101)
- [121] Thilker D A, Braun R, Waltherbos R A M *et al.* 2003, preprint (astro-ph/0311571)
- [122] Brown T M. 2003, preprint (astro-ph/0308298)
- [123] Freeman K C. *ARA&A*, 2002, 40: 487
- [124] Grebel E K. *IAU Joint Discussion*, 2003, 13: 27
- [125] Boissier S, Prantzos N. *MNRAS*, 1999, 307: 857
- [126] Sparke L S, Gallagher J S. *Galaxies in the Universe*, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000
- [127] Bronfman L, Cohen R S, Alvarez H *et al.* *ApJ*, 1988, 324: 248

Observational and Research Progress of the M31 Galaxy

SUN Zhen-na, HOU Jin-liang, CHANG Rui-xiang, CHEN Li

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

Abstract: Observational properties of the largest Local Group spiral M31 (Andromeda galaxy) are presented. Similar to the Milky Way Galaxy, the main components of M31 are nucleus, bulge, disc and halo. In this paper, we have summarized the most recent observational and research progress for each component. It is concentrated on the M31 disk stellar population and star formation history, the globular clusters distribution and the halo properties. Finally, a detailed comparison for the observed values of each component and formation mechanism between M31 and our Galaxy is given.

Key words: astrophysics; M31 (Andromeda); review; observations; the Milky Way