

银河系科学进展

黄 样

(1. 中国科学院大学天文与空间科学学院 100049; 2. 中国科学院国家天文台 100101)

作为宇宙的基本结构单元,阐释星系的集成和演化历史,理解星系形态、结构以及化学运动学性质的规律性和多样性,是21世纪天体物理学面临的最富挑战的基本问题之一。银河系作为我们的家园星系,是唯一可以将其海量恒星进行多维度观测并加以细致研究的星系,对阐释星系形成和演化意义重大。由于我们身处银河系之中,要看清银河系的全貌反而比其他星系更加困难,银河系的研究进展必须依赖大规模巡天的开展。大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, 简称 LAMOST, 被冠名为郭守敬望远镜^[1])正是凭借其独一无二的光谱获取率,获取并发布了2000多万条天体光谱数据,包括测得了接近1000万颗恒星的大气参数,为系统而全面地认知银河系打下了坚实的数据基础。本文将简述包括LAMOST巡天在内的银河系巡天,着重介绍LAMOST巡天在理解银河系形成和演化上取得的突出贡献。

一、方兴未艾的银河系巡天

银河系巡天一般分为测光、天测和光谱巡天。测光巡天可以获取恒星的多波段星等,天测巡天可以测量恒星的精确位置、自行以及三角视差,而光谱巡天则可以取得恒星视向速度、大气参数、元素丰度乃至年龄的测量结果,这些巡天信息的结合则组成了恒星的完备相空间信息(即三维位置、三位速度、年龄和金属丰度 Z ;见图1),进而为探究银河系的集成历史奠定了基础。

过去的二十年,针对银河系的各类大型巡天项目方兴未艾。本世纪初,“日内瓦-哥本哈根巡天”

(GCS)利用欧洲南方天文台CORAVEL光谱仪的高分光谱和uvby测光数据并结合依巴谷天测数据第一次系统获得了太阳200秒差距邻域内约15000颗F/G型恒星的完备相空间信息^[2],据此对银河系的金属丰度分布、年龄金属丰度以及年龄速度弥散关系进行了细致研究,极大地推动了对银盘的化学增丰及加热历史的认知。自此之后,各类巡天开始接力,天测上,欧空局于2013年发射了“盖亚”卫星,分别在2016、2018和2022年释放了三版数据^[3-5],取得了银河系约1%恒星(数十亿颗)的高精度位置、自行和三角视差信息以及光学波段三色测光信息;光谱上,RAVE^[6]、斯隆项目^[7]在GCS后,率先将银河系恒星光谱观测数目从万条提升到了接近百万条,在此之后,LAMOST从2012年开始正式巡天,凭借其世界领先的光谱获取率,每年可以观测接近200万恒星光谱,经过十余年的努力,LAMOST观测并发布了超过2000万条天体光谱(其中接近1000万有恒星视向速度和大气参数测量),是目前人类最大的天文光谱数据库。凭借LAMOST和Gaia这两大当前最为强大的银河系巡天提供的海量恒星的多维相空间信息,银河系研究迎来了黄金时代。下面将着重介绍下我国LAMOST巡天在银河系研究领域取得的一系列突破性进展。

二、守敬巡天断绛河

作为家园星系,我们对银河系的认知却远远滞后于对宇宙整体的认知,当前宇宙学的核心参数已经测到1%的超高精度,而在大规模巡天开展前我们对银河系的质量、尺寸等基本性质的测量精度误差却高达100%甚至更大^[8],更不用说对银河系集成

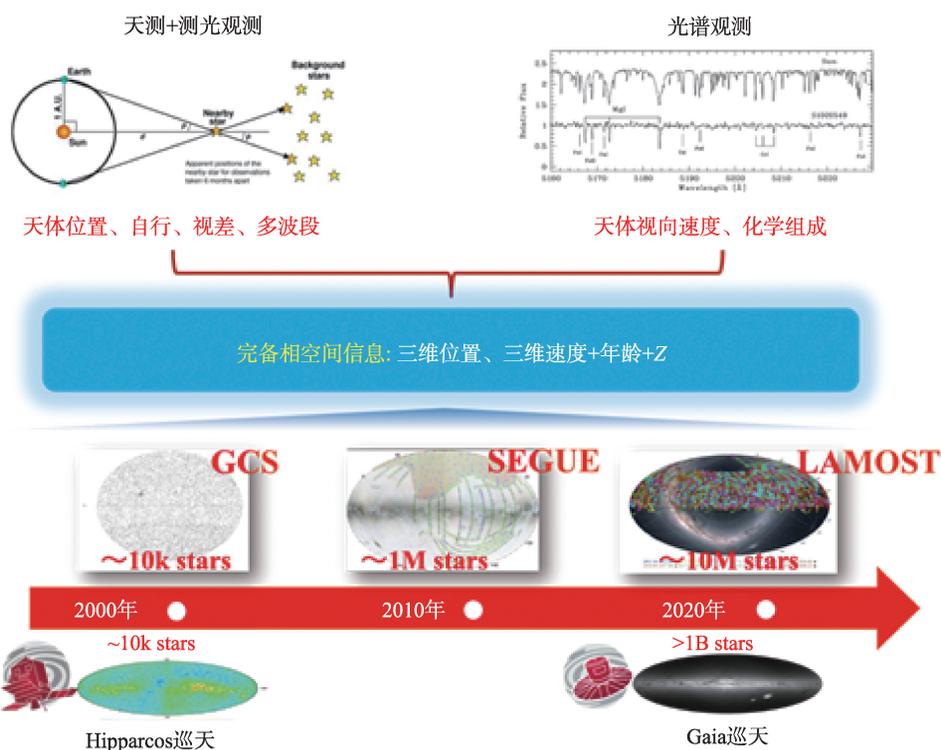


图1 银河系巡天种类及进展

历史的全面理解。近几年,正是借助LAMOST和Gaia等大型巡天数据的帮助,银河系的这些基本参数的测量才得到长足的改进,“她”悠久的演化历史也才慢慢被揭开“面纱”。

2.1 银河系重量

作为银河系最基本的物理性质之一,对银河系总质量(及质量分布)的测量一直是银河系研究的主旋律之一。在Gaia数据释放前,我们就借助LAMOST等光谱巡天数据遴选了一批特色样本,测定出了当时最高精度的远至100千秒差距的银河系旋转曲线(图2),并以此限定了银河系的总质量约为 $0.9 \times 10^{12} M_{\odot}$ (M_{\odot} 表示太阳质量)。随着Gaia巡天数据的释放和LAMOST巡天数据的不断积累,这一旋转曲线无论是盘区还是晕区的测量精度都得到了进一步的提高^[10-11],特别是最近利用LAMOST等巡天遴选的亮红巨星样本更是将银盘的旋转速度测到了km/s的超高精度,被评价为目前最好的盘区旋转曲线^[11]。这些测量也进一步提高了对银河系

总质量的限定,基于LAMOST的这些测量可以明确银河系没有早期测量的 $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{12} M_{\odot}$ 那么重。近期,借助包括LAMOST在内的巡天数据,我们更是在仙女座大星系的质量测量上作出了突破^[12],基于构建的旋转曲线(图2)发现其总质量约为 $1.1 \times 10^{12} M_{\odot}$ 。毫不夸张地说,正是在LAMOST光谱巡天的数据帮助下,国内团队正在引领银河系及近邻星系旋转曲线及其总质量的测量。

2.2 银河系大小与样貌

在LAMOST数据的帮助下,我们对于银河系所改变的一个基础性认知是它的大小。之前普遍认为银河系盘的直径大约只有10万光年,但现在已经清晰地观测银河系盘至少扩展至20万光年之外^[13-14],银盘的疆界比教科书中的足足大了一倍(见图3)。同时,银盘也并非是一个像光碟一样的平坦盘,相反,它在受外力矩扭曲下表现为像“薯片”一样的翘曲,通过LAMOST和Gaia数据,翘曲的结构和运动学性质得到了细致的研究^[15-16],极大地促

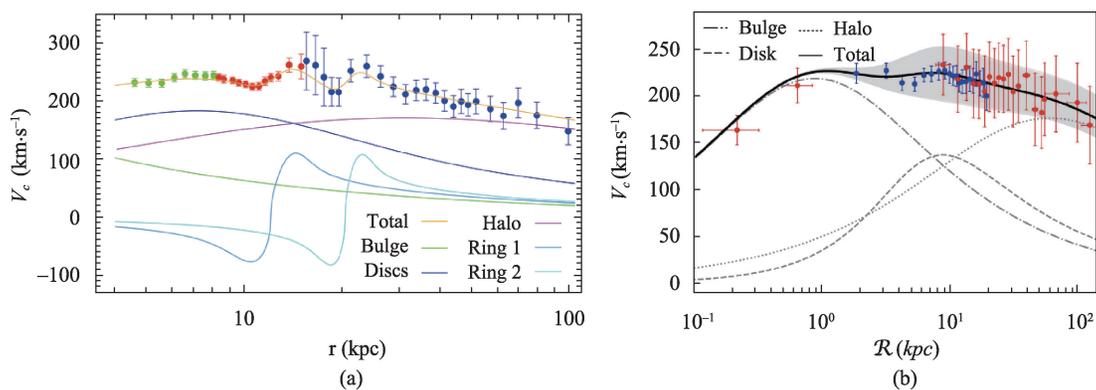


图2 基于LAMOST和其他巡天数据构建的银河系(a)和仙女座大星云(b)的旋转曲线

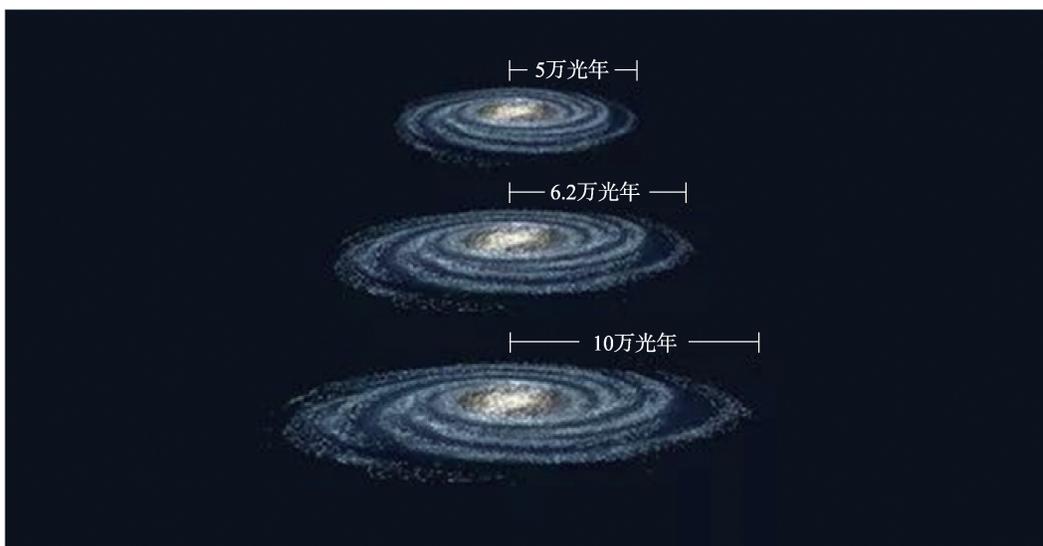


图3 基于LAMOST巡天对银盘大小认知的持续更新

进了对其成因的理解。此外,除了这些大的特征外,银盘在精细结构上也是“沟壑丛生,暗流涌动”(如相空间上发现的“蜗牛壳”状结构以及“银心距-旋转速度”图上发现的“屋脊”状结构),这些相空间上的子结构主要由于来自外部卫星星系(如人马座矮星系)或内部非轴对称结构(如旋臂、中心棒等)抑或是两者结合的扰动所致。得益于LAMOST海量恒星的速度、年龄和元素丰度信息,“蜗牛壳”状结构产生的时间被限制在最近5亿年内^[17],通过研究其缠绕紧致程度随银心距的变化表明该结构起源于外部矮星系穿盘产生的扰动^[18],这些结果全面地揭示了该结构的形成与演化。此外,同样的LAMOST数据也助力发现“屋脊”状结构的角动量有的随星族显著演化而有的则始终保持不变,这表明该结构有着更加复

杂的起源,很可能是内外部扰动共同作用的结果^[19]。

最后,LAMOST数据不仅颠覆着我们对银盘的认知,利用LAMOST光谱遴选的晕族K巨星样本发现银河系的恒星晕不是像前人认为的是一个轴比不变的扁球体,而是一个内扁外圆的新结构^[20],这一结构其实就是后来Gaia发现的银河系早期经历的主并合事件导致的。

2.3 银河系的演化

这些LAMOST和Gaia巡天测得的多维相空间信息不仅在革新着我们对银河系整体面貌的认知,也在逐渐解剖银河系的演化历史,特别是使用其中的准确的恒星年龄信息。最近,天文学家利用LAMOST构建了由25万颗亚巨星组成的黄金样本,获

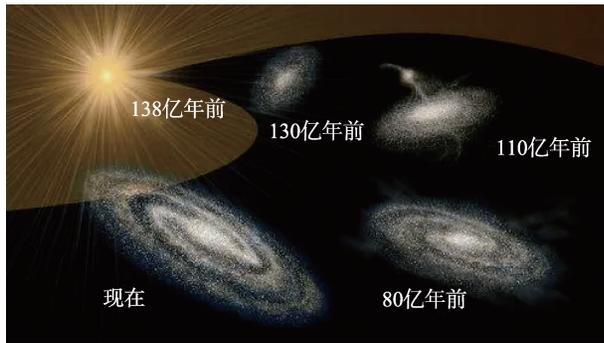


图4 银河系形成历史示意图

取了它们的化学元素丰度,并结合 Gaia 数据测定了它们的年龄和轨道参数,平均年龄误差仅为 7% 左右,为揭示银河系早期形成历史提供了关键数据^[21]。银河系包含银盘、银晕、核球等几个主要结构,其中银盘又包括厚盘和薄盘。根据传统星系形成模型,一般认为银河系早期最先形成的结构是银晕,而银盘在银晕形成之后才出现。然而,通过对 LAMOST 亚巨星样本年龄-金属元素丰度关系的研究改写了这一银河系早期形成的传统图像。研究发现,以 80 亿年前作为分界,银河系的结构形成历史经历了两个不同的阶段:130 亿年前到 80 亿年前的早期阶段和 80 亿年前至今的晚期阶段。早期阶段形成了厚盘和银晕,晚期阶段形成了薄盘。其中,银河系厚盘恒星的形成始于 130 亿年前,比银河系晕的形成早了 10 到 20 亿年。这一发现改变了关于银河系早期结构形成历史的传统认知,新的图像对已有银河系乃至一般盘星系的形成和演化理论提出了挑战。

三、总结

经过几十年的努力, LAMOST 和 Gaia 两大重器正在深刻影响着我们对银河系的研究,不断涌现出关于银河系认知的新结果。更加令人憧憬的是,随着 LAMOST 三期巡天(2023 年 09 月至 2028 年 06 月)的正式开启, Gaia 卫星将在 2025 年底释放新一期更高精度的数据,我国下一代光学巡天的旗舰型项目中国载人空间站工程巡天空间望远镜(CSST)也预计于 2026 年择期发射,未来几年内银河系巡天必将迎来新一波高潮,在这些数据的助力下我们对

银河系的认知也必将达到一个新高度!

参考文献

- [1] Cui, X.-Q. et al. 2012, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 12, 1197. doi:10.1088/1674-4527/12/9/003
- [2] Nordström, B. et al. 2004, *Astronomy and Astrophysics*, 418, 989. doi:10.1051/0004-6361:20035959
- [3] Gaia, Collaboration et al. 2016, *Astronomy and Astrophysics*, 595, A2. doi:10.1051/0004-6361/201629512
- [4] Gaia, Collaboration et al. 2018, *Astronomy and Astrophysics*, 616, A1. doi:10.1051/0004-6361/201833051
- [5] Gaia, Collaboration et al. 2023, *Astronomy and Astrophysics*, 674, A1. doi:10.1051/0004-6361/202243940
- [6] Steinmetz, M. et al. 2006, *Astronomical Journal*, 132, 1645. doi:10.1086/506564
- [7] Yanny, B. et al. 2009, *Astronomical Journal*, 137, 4377. doi:10.1088/0004-6256/137/5/4377
- [8] Wang, W., Han, J., Cautun, M., Li, Z. Z., Ishigaki, Miho N. 2020, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 63, 109801. doi:10.1007/s11433-019-1541-6
- [9] Huang, Y., et al. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 463, 2623. doi:10.1093/mnras/stw2096
- [10] Bird, S. A., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516, 731. doi:10.1093/mnras/stac2036
- [11] Zhou, Y., Li, X., Huang, Y., Zhang H. W. 2023, *Astrophysical Journal*, 946, 73. doi:10.3847/1538-4357/acadd9
- [12] Zhang, X., Chen, B., Chen, P., Sun J. R., Tian Z. J. 2024, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528, 2653. doi:10.1093/mnras/stae025
- [13] Liu, C. et al. 2017, *Research in Astronomy and Astrophysics*, 17, 096. doi:10.1088/1674-4527/17/9/96
- [14] López-Corredoira, M., Allende Prieto, C., Garzón, F., Wang H. F., Liu C., Deng L. C. 2018, *Astronomy and Astrophysics*, 612, L8. doi:10.1051/0004-6361/201832880
- [15] Huang, Y., et al. 2018, *Astrophysical Journal*, 864, 129. doi:10.3847/1538-4357/aad285
- [16] Li, X.-Y., et al. 2020, *Astrophysical Journal*, 901, 56. doi:10.3847/1538-4357/aba61e
- [17] Tian, H.-J., Liu, C., Wu, Y., Xiang M. S., Zhang Y. 2018, *Astrophysical Journal Letters*, 865, L19. doi:10.3847/2041-8213/aaef13
- [18] Wang, C., et al. 2019, *Astrophysical Journal Letters*, 877, L7. doi:10.3847/2041-8213/ab1fdd
- [19] Wang, H. F., et al. 2020, *Astrophysical Journal*, 902, 70. doi:10.3847/1538-4357/abb3c8
- [20] Xu, Y., et al. 2018, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 473, 1244. doi:10.1093/mnras/stx2361
- [21] Xiang, M. and Rix, H.-W. 2022, *Nature*, 603, 599. doi:10.1038/s41586-022-04496-5