基于LAMOST巡天的银河系结构演化研究新进展

刘超^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

E-mail: liuchao@nao.cas.cn

2020-12-15 收稿, 2021-01-26 修回, 2021-02-01 接受, 2021-02-02 网络版发表

国家重点研发计划(2019YFA0405500)资助

摘要 银河系至少是目前唯一能够获得单个恒星三维空间和运动信息的星系, 这使得它成为我们得以详细研究的最重要的星系. 更好地了解银河系的组成及其演化在星系天文学中起着至关重要的作用. 自Hipparcos时代以来, 人们开始以数以万计的恒星为样本研究银河系, 这使我们能够在太阳附近发现许多新现象. SDSS和2MASS等巡天将我们的视野扩展到银河系的更大体积, 在恒星晕中发现了丰富的子结构. LAMOST巡天提供了1000多万颗恒星光谱, 极大地推动了对银河系的了解. 本文综述了近年来基于LAMOST巡天观测数据开展的银河系研究新进展, 特别是在银河系恒星晕的结构与演化、银河系外盘的形态与非稳态运动, 以及银河系动力学质量和本地暗物质密度等方面进行了重点介绍.

关键词 银河系, 银河系结构, 银河系运动学和动力学, 星系形成和演化

银河系的结构和演化研究严重依赖于大样本恒星的观测数据, 这在20世纪90年代以前是异常困难的. 尽管Eggen等人^[1]及Searle和Zinn^[2]分别给出了银河系年老晕族恒星形成的假说, Mo等人^[3]在理论上指出了像银河系这样的盘星系是如何形成的, 但是观测证据稀缺, 很多细节不甚了了. 小规模观测在当时确实发挥了一定作用, 例如Gilmore和Reid^[4]从南银极天区的测光观测中发现了银河系厚盘, 但对银河系的认识有显著突破是在若干个大规模巡天项目之后.

Hipparcos天体测量卫星的数据首次将银河系研究带入精细化研究阶段, 主要更新了人们对太阳附近恒星运动学的认识. Dehnen和Binney^[5]揭示了邻近恒星在 U - V 速度平面上的速度分布中存在很多子结构, 暗示银盘中恒星轨道受到某些非轴对称引力势的扰动. 其中被称为Hercules stream的速度子结构可能与中心转

动的棒状结构相关^[6], 而其他相对较弱的结构则可能与旋臂产生的引力扰动相关^[7,8].

2MASS(Two Micron All-Sky Survey)^[9]观测了全天47亿颗天体的红外图像, SDSS(Sloan Digital Sky Survey)提供了数亿颗恒星的高精度多波段光学测光数据以及60万条低分辨率恒星光谱^[10,11], 它们以及近年来越来越多的多色测光巡天项目带来了银河系研究的第二波新突破. 在银晕中发现了大量来自矮星系和球状星团瓦解的潮汐星流^[12~20](更多星流的发现参见Helmi^[21]的综述文章). 此外, 还发现了很多仍然存活的极暗矮椭圆星系^[22~25]. 这些都有力支持了冷暗物质宇宙模型. 对银河系的研究也因此逐渐被放置在近场宇宙学的大框架中. 在低银纬区发现的高密度区则对银盘的形成和演化提出了挑战^[12,19,26]. 而Widrow等人^[27]和Xu等人^[28]对银盘恒星计数呈现波动现象的发现提出了

引用格式: 刘超. 基于LAMOST巡天的银河系结构演化研究新进展. 科学通报, 2021, 66: 1346–1362

Liu C. Progress on the structure and evolution of the Milky Way based on LAMOST survey (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1346–1362, doi: 10.1360/TB-2020-1596

新问题: 在宇宙学的大背景下, 即在不断受到并合吸积的矮星系的动力学扰动以后, 银盘如何生存并演化?

对银河系动力学质量的测量自Oort^[29]起从未中断, 特别是在暗物质晕被揭示以后, 银河系中暗物质质量及其分布不仅对银河系形成, 对宇宙学也是重要问题. Xue等人^[30]使用SDSS的蓝水平分支星(blue horizontal star, BHB)得到银河系总质量为 $1.0 \times 10^{12} M_{\odot}$, 但不同人采用不同数据得到的结果相差很大^[31].

在SDSS等大型巡天项目获得一系列重大进展之后, 各国对银河系的研究迅速蓬勃发展起来. 大型测光和光谱巡天项目陆续开展, 不断给银河系研究增加新的高精度、海量的观测数据. 在这一过程中, 我国自主研制的首个天文大科学工程项目郭守敬望远镜(the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)不仅没有缺席, 还在这一领域做出了非常突出的工作. LAMOST在巡天开始之前即详细讨论了银河系巡天的主要科学目标^[32], 其中多数目标后来都逐步得到了实现.

本文主要综述LAMOST在银晕、银盘(特别是银盘外围)和动力学质量方面取得的一系列新进展.

1 恒星参数和选择效应改正

开展基于海量数据的银河系研究的基础是获得LAMOST数以百万计的恒星光谱的各项参数, 包括恒星大气参数、距离和视向速度, 同时, 对观测的选择函数给出清晰定义, 并由此获得准确的选择效应改正.

LAMOST数据处理软件基于Ulyss方法给出了所有光谱的视向速度、有效温度为4000~8500 K的恒星大气参数(包括有效温度、表面重力和金属丰度)^[33,34]. Ulyss方法将光谱的每个像素作为恒星参数的高阶多项式函数, 建立向前模型. 这一建模思路十分先进, 后来的多种恒星参数方法都遵循了类似思路^[35~37]. 但是, 由于Ulyss采用复杂的高阶多项式建模, 它的通用性受到一定影响. LAMOST数据处理软件估计的有效温度(T_{eff})、表面重力(logg)、金属丰度([Fe/H])精度分别在120 K、0.25 dex和0.15 dex^[38]. 同时, 数据处理软件对这类恒星的视向速度估计精度约为4 km/s^[39], 并存在约5 km/s的系统误差^[40]. 除此以外, 采用核主成分分析(KPCA)、The Cannon、Stellar Label Machine(SLAM)等方法也获得了同类参数, 精度有所提高^[37,41~43]. 特别地, 利用Kepler星震学数据, 可以有效改进红巨星表面重力(logg)的测量精度^[44,45]. 上述参数的估计结果可以

给出恒星的距离、年龄等信息^[41,46~48]. 其中, 距离估计的精度在20%左右, 经与Gaia得到的距离进行比对, 发现一致性很好.

在此基础上, 红巨星支(red giant branch, RGB)、红团簇巨星(red clump, RC)、主序拐点星(turn-off)以及M型巨星等类恒星成为研究银河系结构的主要示踪天体^[49~54], 并在银河系结构研究中发挥了重要作用.

光谱巡天通常难以保证对不同类型、不同光度恒星观测的完备性, 需要进行选择效应改正. LAMOST观测选源遵循相对简单的选择函数^[55,56]. 尽管如此, 由于受到10%左右的不稳定工作光纤、光纤定位精度、天气、数据处理、观测人为选择等影响, 实际选择函数非常复杂. 为了实现光谱巡天数据的统计分析, 需要对LAMOST进行选择效应改正. Liu等人^[57]建立了贝叶斯模型, 实现了每个天区的选择效应的改正; 而Chen等人^[58]则实现了更小观测单元——每个光谱仪观测天区的选择效应改正.

至此, LAMOST已经为探索银河系结构做好了数据准备.

2 银晕

银晕的恒星虽然只占整个银河系重子物质质量的1/100, 但由于它们是示踪暗物质晕结构的几乎唯一的探针, 因此关于它们空间分布(银晕的形态)、运动学和化学丰度的研究对理解暗物质晕的分布、起源和演化都有至关重要的意义.

2.1 银晕的形态

一直以来, 对银晕形状测量只是依靠少数特殊类型恒星(如天琴座RR变星、BHB等). 这类恒星很可能存在星族和观测上的选择效应, 且数量稀少, 仅能通过向前建模方式, 在给定银河系恒星晕的径向轮廓数学形式情况下对参数给出约束. 很多前人工作认为, 银晕的径向轮廓应该是双幂律分布(broken power law)形式, 并获得了较好的观测数据拟合结果^[59,60]. Xue等人^[61]在引入更多SDSS光谱观测的RGB以后发现, 观测数据无法约束径向轮廓, 无论是用双幂律形式还是用随半径改变椭圆轴比的单幂律形式, 都可以很好拟合观测数据.

基于LAMOST观测的5000多颗低金属丰度([Fe/H] < -1.0 dex)RGB恒星的三维空间位置, Liu等人^[57]直接描绘出银晕恒星密度的剖面图(图1). 可以看出, 银晕

图1 LAMOST晕族RGB巨星在 R - Z 平面上的恒星数密度剖面图^[57], 颜色是按照对数计算的相对数密度, 归一化到任意数上
Figure 1 Tomographic map of the stellar density of RGB halo-like stars selected from LAMOST catalog^[57]. The colors code the arbitrarily normalized stellar densities

恒星数密度轮廓在半径较小时呈现扁球形, 而当半径超过30 kpc之后变成球形. 这直接证明了银河系晕的密度轮廓是内扁外圆的, 即等密度椭球的轴比($q=c/a$)是随半径变化的. Xu等人^[62]对数十个等密度轮廓进行拟合, 以非参数方法获得了40 kpc以内银晕的径向轮廓, 显示 q 从0.5逐步变化到1.0左右, 同时单幂律可以很好描述径向轮廓变化. 这是首次获得银河系恒星晕精确的几何形态和轮廓. 几乎同时, Iorio等人^[63]使用天琴座RR变星作为示踪体, 假设银晕轮廓为三轴椭球体, 得到了非常相近的结果.

恒星在银晕的这一分布特征有多种可能的解释. 一种是内晕(半径小于20 kpc)恒星主要由吸积并合的矮星系组成, 特殊的矮星系轨道造成了相对较扁的空间分布^[64,65]. 另一种可能的解释是银晕和银盘的长期相互作用, 导致银晕内部的恒星分布在更扁的等密度椭球上, 而外部则基本不受银盘影响, 呈现球对称的分布.

2.2 银晕的运动学

除了银晕恒星的空间分布轮廓, 它们的运动学特征也是重要的观测量. 银晕恒星三维平均速度(速度一阶矩)反映了银晕整体运动. 一般来说, 银晕是一个纯粹压力支撑的恒星系统, 即速度弥散很大, 但是基本没有整体转动, 净角动量为0. 借助Gaia天体测量巡天的自行和三角视差数据, 结合LAMOST挑选的 $[\text{Fe}/\text{H}]$

<-1 dex的RGB星样本的视向速度, 可以重构距离太阳4~5 kpc之内银晕的三维平均速度. Tian等人^[68]采用最大似然方法估计了不同金属丰度太阳附近晕族恒星的平均周向速度. 研究发现, 这些RGB星速度分布由三个成分组成: 周向速度在180~200 km s^{-1} 的是厚盘成分, 在20 km s^{-1} 的是银晕, 还存在一个周向速度逆转的吸积并合星系残骸. 晕族恒星周向速度是同银盘转动速度相一致的. 晕族恒星存在的20 km/s 净转动速度在统计上是显著的, 且不随金属丰度而变化. 由此确认, 银晕在太阳附近的转动应该不是由吸积并合矮星系残骸的残余角动量贡献的.

仅仅观察太阳附近恒星晕的运动并不能厘清银晕净角动量的起因, 需要扩大研究的体积. Tian等人^[69]比较了在6 kpc $<R<12$ kpc和12 kpc $<R<20$ kpc两处的银晕恒星净转动速度, 发现周向速度在半径更小处更大一些, 同时, 随垂直于盘的高度 Z 的变化梯度分别为 (-3.07 ± 0.63) 和 (-1.89 ± 0.37) $\text{km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$. 这一现象说明, 银晕的净角动量在内晕更大, 在外晕更小. 通过与宇宙学模拟的星系运动特征进行对比, 他们发现, 具有扁球形恒星晕的模拟星系具有显著的周向速度垂直方向梯度, 而具有球形恒星晕的模拟星系没有显著的周向速度梯度. 这说明银河系恒星晕的净角动量与其空间分布轮廓是相关联的, 因为刚好内晕恒星的分布也是扁球形的, 而外晕恒星的分布则是球形的^[62]. 来自恒星数密度的统计与运动学结果的这一相关性暗示二者有共同的动力学起源. 我们猜测, 它可能跟银河系恒星盘与内晕长期动力学相互作用相关. 银盘上面的非轴对称结构(棒、旋臂)可以将部分角动量转移给银晕恒星, 使其改变轨道性质, 不仅获得一定角动量, 也通过轨道的改变在整体上改变了整个星族的空间分布轮廓. 当然, 这一假设还需要更多的观测数据分析和理论模拟来证实.

银晕恒星的速度椭球(速度二阶矩)也反映了银晕恒星的轨道特征及其所受到的引力势场的分布情况. 一直以来, 由于自行观测数据的贫乏, 对晕星速度椭球的测量非常受限, 仅仅限制在太阳附近^[70]. 部分工作曾经尝试使用特殊方法获得较远距离上速度椭球各向异性的测量, 但受方法、样本等限制, 误差较大^[71,72]. Gaia DR2^[67]提供的高精度自行信息, 结合根据LAMOST恒星光谱大气参数估算的距离^[73]和视向速度, 使得我们可以直接得到很大体积范围内晕族恒星的三维运动速度并直接计算速度椭球. Bird等人^[74]使用LAMOST晕族RGB星, 在假设速度椭球没有交叉项的前提下, 测量

得到了三个速度弥散成分沿银心距的变化趋势. 他们获得的最有意思的结果是速度椭球的各向异性参量 β 沿银心距的变化. β 的定义为

$$\beta = 1 - (\sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2) / (2\sigma_r^2), \quad (1)$$

其中, σ_r 是径向速度弥散, σ_θ 和 σ_ϕ 是两个切向速度弥散. 在小心去除潮汐子结构的影响之后, 各向异性参量在25 kpc之内仍然为0.8左右, 即25 kpc之内的恒星晕普遍处于径向拉伸的轨道上. 距离超过25 kpc之后, β 值逐渐下降, 在100 kpc处达到0.2左右. 他们进一步发现, 当选取更低金属丰度晕星时($-2.5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.8$), 在25 kpc之内 β 值下降到0.6左右, 说明金属丰度大于-1.8时, 晕星轨道沿径向拉长得更严重, 而更低金属丰度的晕星轨道则没有拉得很长. 这一现象很好印证了银河系内晕可能主要来自矮星系吸积并合这一基于冷暗物质宇宙模型的假说^[64]. Bird等人^[75]利用LAMOST和SEGUE数据的最新工作进一步证实了上述趋势.

2.3 银晕中的子结构

像LAMOST这样的光谱巡天不仅适合对现有的银晕结构开展运动学和化学丰度的测量, 也适合寻找新的潮汐子结构. 银晕中的潮汐子结构通常都是矮星系或球状星团受到银河系潮汐力瓦解而形成的. 寻找它们的方法无外乎在空间分布、速度分布和轨道分布函数空间中寻找成团结构.

由于Sagittarius星流^[13]非常显著, 横跨整个星空, LAMOST非常容易对其进行采样, 并对星流的运动和金属丰度性质开展研究. Li等人^[76]利用LAMOST的M巨星追踪Sagittarius星流的三维结构, 在给出M巨星距离估计方法之后, 发现探测的最远的Sagittarius星流距离银心130 kpc左右, 这也是目前对这一星流探测的最远记录. 与利用测光巡天数据获得的RRLy探测结果^[77]相比, Li等人^[76]不仅证明了这些距离遥远的恒星是Sagittarius星流的成员星, 还根据它们接近0的视向速度判断这是星流的远银心点所在, 从而有力限制了Sagittarius星流的轨道特征. 通过与数值模拟进行比较, 这一结果更倾向于银河系有一个较轻的暗物质晕^[78]. 另一个有意思的结果是目前对Sagittarius星流模拟最好的两个模型, 一个只能与实测星流的空间位置吻合较好, 另一个则只能与实测星流的三维速度吻合较好, 没有一个模型能够同时吻合观测得到的Sagittarius星流的空间分布和速度结构. 除了Li等人^[76]的工作, Yang等人^[79]

则利用LAMOST数据研究了Sagittarius星流的金属丰度特征.

在寻找新的隐藏在相空间中的潮汐子结构方面, LAMOST凸显了其能力. 这类子结构通常因弛豫无法再在空间分布上保持成团性, 但在相空间仍然保留一定成团性. LAMOST展示了两类不同方法寻找潮汐子结构, 一类是直接在相空间中进行成团性分析, 另一类则是在太阳附近的恒星速度结构中寻找成团性.

Carlin等人^[80]仅使用LAMOST观测的晕族红巨星的位置-距离-视向速度分布研究子结构对恒星晕的影响. 他们发现, 在位置-距离-视向速度空间, 当前的晕星分布并不均匀, 除了Sagittarius星流的主要贡献以外, 其他晕族恒星的成团性特征与基于 Λ CDM宇宙学模拟产生的纯吸积并合起源的模拟恒星晕非常相似, 因此判断银河系恒星晕可能完全产生自矮星系的不断吸积和并合.

Yang等人^[81]利用13000多颗LAMOST晕族巨星结合Gaia的自行, 获得了这些恒星的6维相空间坐标. 这些恒星覆盖了5~120 kpc广大的银晕空间. 利用成团性方法, 他们认证了所有显著的已知潮汐子结构, 同时发现了近20个新的未知子结构(图2).

在太阳附近天区, 使用速度分布也可以很好地识别矮星系吸积残骸^[82]. 由于LAMOST观测了数以百万计的太阳邻近主序星, 因此非常适合搜寻这些年老的并合成分. Zhao等人对LAMOST数据进行了系统搜寻, 发现了9个新的星流候选体^[83,84]. 通过对其中一个星流LAMOST-N1的高分辨率光谱研究, 发现它们的化学元素丰度更接近于吸积并合的矮星系^[85].

银晕中还有一些古老的吸积成分由于非常零散, 甚至无法有效地从相空间成团性中识别出来, 但是仍然有迹可循, 那就是通过分析恒星的化学元素丰度获得它们起源的相关信息. Xing等人^[86]找到了一颗LAMOST观测的低 α 丰度的恒星样本, 并经过了高分辨率光谱的确认. 这类恒星经历过非常缓慢的恒星形成过程, 以致铁增丰过程主要由Ia型超新星主导, 因此具有极低的 α 元素丰度. 有意思的是, 它的Eu和Fe的丰度相比较太阳高出10倍. 这样的化学元素丰度特征只在矮星系中发现过, 这是一个清晰证据, 证明这些晕星来自并合的矮星系.

3 银盘

银河系的恒星盘是整个星系最为显著的结构, 绝

图2 LAMOST晕族巨星揭示的18个新的潮汐子结构成员恒星在相空间的分布((a)–(d))以及其中5个星群的金属丰度分布((e), (f))^[81]
 Figure 2 The phase space distributions of 18 new identified star groups, which may belong to accreted dwarf galaxies, in the Galactic halo ((a)–(d)), and the metallicity distributions of 5 among 18 new identified star groups ((e), (f))^[81]

大多数恒星都位于银盘之上。银盘并非轴对称的结构,其上有类似刚体转动的中心棒结构和暂现的旋臂结构^[87]。近年来对银盘的研究多关注其中心区和外围的结构、动力学不稳定等问题。以往研究对银盘的探测主要还是集中在太阳附近,最近LAMOST数据可以覆盖比较远的银河系外围区域。

3.1 太阳附近的恒星运动学

由于太阳就处于银盘之上,因此太阳附近的恒星也绝大多数属于银盘。它们的运动学也能反映银盘的大致情况。相比Hipparcos大约100 pc的探测体积, LAMOST观测的F、G、K、M等类型的主序星则可以覆盖数千kpc的空间,这是在Gaia数据大规模释放(2018年)之前观测太阳邻域恒星运动学的最佳样本。Xia等人^[88]使用早期LAMOST先导巡天数据对太阳邻域恒星的速度分布展开研究,借助基于多高斯成分分解的极端退卷积算法,他们重现了Hercules stream等已知速度子结

构,并发现了数条角动量各有不同的弧形速度结构。这些新揭示的弧形结构可能与棒引起的共振相关,并在后来的Gaia数据中得到证实^[89]。

与此同时, Tian等人^[40]则更加关注太阳附近500 pc内不同光谱型主序星的平均三维速度以及速度椭圆。尽管当时尚没有可靠的自行数据,但借助速度反投影方法,他们获得了太阳近邻不同光谱型恒星三维运动学特征数据。他们发现,不同光谱型的恒星平均速度有统计学显著的差异,这可能是年龄效应,早型主序星更年轻,可能尚未处于动力学平衡状态。借助晚型恒星的平均速度,他们给出了太阳相对于本地静止框架的速度为 $(9.58 \pm 2.39, 10.52 \pm 1.96, 7.01 \pm 1.67)$ km/s。现在,借助Gaia数据我们已经知道,早型星非对称速度主要是由并合的矮星系带来的动力学扰动所致^[90,91]。此外, Huang等人^[92]采用其他方法测量了太阳的本地速度为 $(7.01 \pm 0.20, 10.13 \pm 0.12, 4.95 \pm 0.09)$ km/s。由于他们选择了近圆轨道的恒星作为探针,更多地受到非对称运动

的影响, 因此其太阳本地速度与Tian等人^[40]的结果有2 km/s左右的差异。

Carlin等人^[93]在早期LAMOST数据中发现, 平均速度会随着空间位置发生变化。他们采用主序星作为探针, 发现银盘之上的恒星($Z>0$)平均向下运动, 而银盘之下的恒星($Z<0$)平均向上运动。虽然这个运动偏离0 km/s(轴对称引力势场情况下稳定的恒星轨道预期值)只有几km/s, 但统计学上是显著的。此外, 他们发现, 径向速度也明显偏离零, 在银心距约9 kpc处, 恒星的净径向运动朝向银心的速度大约有10 km/s。Sun等人^[94]使用更多的LAMOST观测数据证实了这些非对称运动。这一发现具有重要意义, 是继Bond等人^[95]和Siebert等人^[96]发现太阳附近存在径向非对称运动之后, 首次展示了非对称运动存在所有三维速度分量中, 从而开启了全面揭示银盘动力学不稳定现象研究的热潮(参见3.3节)。

3.2 银盘外围的形态

由于地理上的特点, LAMOST巡天特别适宜在银河系外围(反银心方向上)进行大规模巡天观测, 因此对银河系外围形态和运动学的观测约束是其重要的科学结果之一。

Liu等人^[57]在修正了LAMOST数据中的观测选择效应之后, 直接对恒星在外围的数密度分布进行统计分析。他们看到了更大的盘, 即银盘星族在距离银心20 kpc处仍然具有显著的结构(图3)。这更新了一直以来认为恒星盘半径为14~15 kpc的传统主流认识^[97]。

图3 LAMOST盘族巨星揭示的银盘恒星数密度在 R - Z 截面的分布^[57]。颜色表示恒星的数密度分布(单位随机归一化到某个值), 显示至少在银心距20 kpc处, 仍然可以看到显著的银盘结构

Figure 3 The tomographic map in R - Z plane of the stellar density of the disk RGB stars^[57]. The colors code the arbitrarily normalized stellar density. It is clearly seen that the disk extends beyond 20 kpc

Wang等人^[98]在此基础上进一步测量了银盘的形态。不同于前人的方法, 这些研究者采用非参数方法, 即没有预设银盘径向数密度轮廓的解析形式, 沿着银心距一个点一个点地测量银盘恒星数密度, 并最终联系起来获得了数密度和银心距的函数, 同时也获得了银盘标高(厚度的度量)和银心距的关系。图4(a)展示了银河系恒星数密度随 R 以指数下降过程中分别在11和14 kpc两处呈现两个折断, 这被称为Type II+III型恒星盘。在

图4 从LAMOST盘族巨星中测量的银盘恒星数密度随 R 的变化(a)以及薄盘和厚盘成分的标高随 R 的变化(b)。图(a)显示银盘数密度在11和14 kpc处存在两个折断。图(b)展示了恒星盘的边缘增厚现象

Figure 4 The stellar density radial profile, traced by the LAMOST observed RGB stars, as a function of R (a), and the scale heights as functions of R for thin and thick disk populations, respectively (b). Figure (a) shows two breaks at 11 and 14 kpc, respectively. Figure (b) displays clear flaring in the outer-disk

河外星系中也发现了类似结构,通常都会发现这些星系受到矮星系并合的影响.这暗示着银盘也可能在最近受到了矮星系并合的动力学扰动.图4(b)展示了作为银盘厚度度量的标高如何随着 R 而增加,这一现象被称为边缘增厚(flare).以往在银河系的气体盘中也发现了这一现象,Wang等人^[98]再次清晰展示了无论薄盘还是厚盘都出现了边缘增厚现象.这一现象产生的原因还不是很清楚,尽管数值模拟显示矮星系并合过程可以激发星系盘的边缘增厚,银盘的自加热过程也有类似效果.

各团组一直在寻找银河系恒星盘的翘曲现象.人们很早就认识到,翘曲是盘星系中非常普遍的结构.银河系的中性氢盘被证明具有显著的翘曲结构,第二象限的HI盘向北翘起,第三象限的HI盘向南翘下去^[99].López-Corredoira等人^[100]早在2002年就发现恒星盘应该存在翘曲,但是对翘曲形态的揭示是间接的;直到Chen等人^[101]使用造父变星才首次清晰地展示出银盘的翘曲结构(图5).他们同时展示了翘曲会随着银心距而进动,这似乎支持了翘曲现象主要是由内盘的动力学影响而产生.Huang等人^[102]和Wang等人^[103]利用LAMOST和Gaia共同观测的红团簇巨星,从速度空间也展

示了翘曲结构的影响.

3.3 动力学扰动对银盘结构的影响

银盘的非对称运动及其起源是近10年来最为热门的研究问题之一.前文介绍了太阳附近发现的恒星非对称运动情况.仅仅在太阳附近恒星中观察这些奇怪的运动,很难对它的产生机制做出正确的结论.Siebert等人^[104]以及很多其他工作^[89](包括作者的工作之一^[105])在这个很小体积内考察非对称运动时,常常将之归因于附近旋臂的扰动作用.只有将探测体积扩大到更广阔的银河系外围区域,非对称运动的产生机制才能得到有效限制.本节我们将恒星运动学研究扩展到银河系外围,展示动力学扰动对银盘结构与运动的深刻影响.

Antoja等人^[91]发现相空间的螺旋状结构之后,将之与最近发生的矮星系并合事件((3~9)亿年之前矮星系穿越银盘)联系起来,认为这是由矮星系穿过银盘时产生的扰动而形成.Binne和Schönrich^[106]很快给出了更加清晰的理论解释,并预测这样的扰动不仅出现在垂直方向运动中,也应该出现在沿银盘平面的运动中.由于矮星系穿过银盘的位置是在外围银盘,这样的扰动影响对银盘应该是全局性的.在更大范围考察恒星的

图5 由造父变星(蓝点)示踪的银河系恒星盘翘曲的三维结构^[101]

Figure 5 The 3D structure of the Galactic warp traced by the Cepheid stars (blue dots)^[101]

非对称运动有助于解开其产生机制这个谜团。

在Antoja等人^[91]的工作发表之前, Tian等人^[107]就尝试仅使用LAMOST的视向速度, 借助速度反投影的方法探索反银心方向的径向和周向非对称运动, 他们发现, 镜像和周向平均速度都会沿着银盘半径产生类似正弦波的波动, 二者的相位差了约1/4. 他们将此非对称运动解释为银河系中心棒转动时产生的扰动^[108]. 但是, Antoja等人^[91]发现的相空间螺旋状结构很难由中心棒的扰动产生. 因此, 主流观点倾向于认为这是矮星系并合产生的扰动现象. Tian等人^[90]将太阳附近的恒星按年龄分组, 发现即便是他们样本中最年轻的恒星(年龄小于5亿年)也呈现相空间螺旋状结构, 但是年老的恒星(>60亿年)则没有呈现这样的结构(图6). 这个结果实际上已经排除了中心棒扰动的假设. 因为中心棒存在的时间非常久, 若其能够产生扰动, 应该在最年老的恒星中都可以看到. 稍后, Li和Shen^[109]发现了螺旋状结构与恒星轨道冷热度(类似于轨道椭圆率)的关系, 发现这种独特的相空间结构仅在动力学冷的恒星(近圆轨道)中存在, 而动力学热的恒星却呈现平滑的相空间分布, 说明它们已经完成了相角混合. 基于此, 他们进一步限制了银盘的扰动时间至少在5亿年以前, 并支持了Tian等人^[90]的判断.

Wang等人^[110]尝试使用LAMOST和Gaia的恒星样本从太阳附近扩展到半径12 kpc的空间, 发现螺旋状结构仍然存在. 近期, Li^[111]基于LAMOST Dr6和Gaia DR2的交叉样本研究也支持了这一结果, 并发现将恒星按照不同引导中心半径分类后, 能够体现出更清晰的螺旋状结构, 显示引导中心半径是反映这一螺旋特征的更基本的参数. 这也基本排除了旋臂的扰动, 因为旋臂扰动往往在某一个半径处, 不会覆盖到银盘很大的半径范围上.

相空间呈现的螺旋状结构是矮星系并合过程中因穿越银盘而引起的扰动这个假设得到了理论模拟的支持^[112,113], 但至此我们仍然不知道这样的扰动范围有多大, 除了螺旋状结构之外还有哪些影响.

最近, Xu等人^[114]利用LAMOST在反银心方向上观测的红巨星提供了有力的观测证据, 将螺旋状结构和其他的恒星非对称运动有力地联系起来. 首先, 他们发现, 螺旋状结构会随着半径的增加而缠绕得愈发松散, 直到在 $R=17$ kpc左右消失(图7). 螺旋状结构消失说明在更大半径处受到矮星系扰动的恒星还没有转动到反银心方向, 由此可以对矮星系的扰动时标给出约束. 其

图6 径向速度(左列)和周向速度(右列)在相平面 $Z-V_z$ 中的螺旋状结构随年龄的变化^[90]. 自上至下, 恒星年龄逐渐增加. Ga=10亿年

Figure 6 How the spiral patterns in $Z-V_z$ plane change with the ages of stars (from top to bottom, the ages of stars increase)^[90]. The left and right columns demonstrate the mean radial and azimuthal velocities in $Z-V_z$ plane, respectively. Ga=billion years

次, 当他们把螺旋状结构按照半径顺序排列在一起后(图8(a)), 发现刚好与 $R-Z$ 平面上周向运动的不对称结构对应起来(图8(b)). 这说明恒星受到扰动以后, 其轨道在6维相空间发生了重新分布, 螺旋状结构实际上就是这种重新分布在某个相空间切面的反映, 当然与其他相空间切面应该是对应的. 不仅如此, 他们通过数值模拟展示了矮星系穿越银盘以后不仅激发了在相空间的螺旋状结构, 也在 $R-Z$ 平面上激发了复杂的非对称运动, 恒星在空间分布上也呈现出很多波浪状的密度不均匀现象, 同时银盘因此产生边缘增厚的现象. 这一工

图 7 不同半径处周向速度(颜色表示)显示在 Z - V_z 相平面中的螺旋状结构如何变化, 它会随半径增加而变松散, 直到在 $R=17$ kpc左右消失^[114]
 Figure 7 How the spiral patterns traced by azimuthal velocity in Z - V_z plane change with R ^[114]. When R increases, the spiral patterns tend to be more loosely wrapped and fade away at around $R=17$ kpc

图 8 将不同半径的螺旋状结构按照半径从小到大进行排序(a), 其平均周向速度(颜色表示)正好与 R - Z 平面中周向速度(颜色表示)的结构(b)相对应^[114]

Figure 8 Rearrange the spiral patterns in the order of increasing R (a), and the color coded mean azimuthal velocity shows the same feature as the azimuthal velocity map in R - Z plane (b)^[114]

作将很多以前对银盘密度波动^[27,28]、速度不对称^[93~96]的观测现象统一起来, 认为这些现象均是由过去数亿年之前的一次矮星系穿越银盘而产生的动力学扰动。

另一个有意思的结果是Cheng等人^[115]利用LA-

MOST观测年轻的OB型星发现的。图9展示了他们的发现: OB型星的平均径向速度(颜色表示)在银盘面上呈现出水波状的波动效应。这样的波动结构同旋臂(图9中彩色线条所示)在空间上并不相关, 因此可以排除是

图9 图中颜色为OB型星的平均径向速度, 显示了沿银盘半径的波动^[115]. 蓝色速度为负, 红色为正
Figure 9 The colors in the figure indicate the mean radial velocities of the OB stars^[115]. They show clear ripple along the Galactic plane. Blue indicates negative and red indicates positive velocities

旋臂的动力学影响. OB型星的年龄通常只有几百万到几千万年, 无法在其运动学性质中体现出几亿年之前矮星系穿越银盘时带来的扰动. 作者认为, 这是因为几亿年之前矮星系在穿越银盘时不仅给恒星带来了扰动, 也给气体盘带来了类似的扰动. 气体盘的扰动在垂直方向上很快耗散, 但在银盘面上的扰动因为耗散时标较长而没有消失, 并由在这些气体中诞生的年轻OB型星所继承, 最终呈现在它们的速度场中. 这一工作给这次矮星系并合事件带来了不同的视角, 这样的并合是否会在一个很短时间内在银盘上激发起较为激烈的恒星形成呢? 这个问题有待更多的观测证据去解决.

4 银河系动力学质量及本地暗物质密度

银河系中不仅有恒星、气体、尘埃等重子物质, 还包括大量的暗物质. 实际上, 暗物质占银河系总质量的90%以上. 可以利用动力学模型的方法探测暗物质带来的引力效应, 并进而推测暗物质的总质量. 通常来说有两类方法, 一类是利用自转曲线直接估算物质在径向方向的引力, 进而推断贡献引力的动力学质量. 这一方法主要通过解算3维Jeans方程实现. 这类方法往往需要恒星三维运动的观测数据以及恒星的三维空间分布才可以实现, 对观测而言难度较大. 当然, 也可以利用部分数据进行质量估计, 但需要较多模型假设^[30]. 另一类方法是通过太阳附近恒星的垂向运动测量本地暗物质质量密度, 这仅需要一维的速度和数密度分布并利用简化的1维Jeans方程. 尽管看上去问题得到了简化, 但实际上由于太阳附近暗物质密度占比仅有10%左右,

因此极度依赖测量的精度^[116].

LAMOST等数据可以用来支持上述两类方法测量银河系的动力学质量. Huang等人^[117]利用LAMOST观测的红团簇巨星结合其他观测的更远恒星, 给出了银河系自转曲线并估计了动力学质量, 结果为 $0.90^{+0.07}_{-0.08} \times 10^{12} M_{\odot}$, 同Xue等人^[30]的结果非常接近.

Garbari等人^[118]优化了传统上采用1维垂直方向Jeans方程估计本地暗物质密度的模型, 弱化了若干假设并引入了贝叶斯方法, 得到了太阳附近暗物质密度为 $0.022^{+0.015}_{-0.013} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ 的结果. 这一结果与以前的测量相比, 暗物质密度高了约1倍, 但同时其误差也变得十分大. 为了进一步缩小误差, Xia等人^[119]使用LAMOST北银极方向的1400多颗主序星采用1维Jeans方程, 得到本地暗物质密度为 $(0.018 \pm 0.0054) M_{\odot} \text{pc}^{-3}$. 这一结果比Garbari等人^[118]的略小, 但误差仍然较大. Xia等人^[119]通过蒙特卡洛模拟认为, 增加参与计算的恒星样本数是降低暗物质密度估计误差的重要途径.

最近, Guo等人^[120]使用90000多颗LAMOST和Gaia观测的主序星数据, 在银盘南北两侧限制暗物质密度. 他们得到了精度显著提升的测量结果 $0.0133^{+0.0024}_{-0.0022} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$ (图10), 这一结果相比Garbari等人^[118]和Xia等人^[119]的又

图10 Guo等人^[120]得到的不同成分——气体盘(绿色, 固定值)、恒星盘(红色)、暗物质(蓝色)以及总物质(黑色)在垂直方向上产生的引力随银盘高度Z的变化, 虚线是1 σ 误差范围

Figure 10 The K_z force as a function of Z derived by Guo et al.^[120] for different components: Gaseous disk (green, fixed value), stellar disk (red), dark matter (blue), and total mass (black). The dashed lines indicate the 1 σ errors

有了进一步降低,但仍然属于暗物质密度偏高的结果。Guo等人^[120]通过对比恒星在银盘南北的运动学性质,发现前述的恒星非对称运动确实会对本地暗物质测量产生一定影响。未来,需要进一步考察能够容忍一定数量处于动力学不稳定状态的恒星样本的动力学模型,以便进一步缩小本地暗物质密度的误差。

5 总结与展望

最近30年以来,人们对银河系的研究进入了快速发展时期。这主要得益于全世界的天文学界投入了大量精力和资源开展了众多银河相似巡天观测,包括我国主导的LAMOST银河系巡天项目。海量的观测数据、更深的探测空间使得我们已经掌握了大量关于银河系结构和运动学的观测信息,大致勾勒出来银河系的基本形状、组成、运动、质量和演化。银河系正在成为人类了解最为透彻和全面的一个星系。这对人们更加深入理解一般星系的结构形成与演化具有不可替代的作用。

LAMOST巡天经过7年多的观测,提供了目前地面巡天样本最大的1000多万个恒星光谱库,这极大地推动了对银河系的了解。我们发现,恒星晕内侧恒星密度轮廓是扁平的,而外侧则是球形轮廓,恒星内晕以大约20 km/s的速度旋转。这些特征很可能与银河盘和晕之间的长期演化有关。在相空间,新发现了数十组来自合并矮星系的潮汐碎片。这意味着恒星晕可能由潮汐碎片主导,并倾向于恒星晕具有纯粹的合并起源。得益于LAMOST对银河反中心方向开展的丰富观测,我们能够探测到银盘边缘地带的恒星。银盘至少在距离

银心20 kpc处仍没有显示出结束或截断,因而银河系可能有一个非常大的恒星盘。通过仔细测量外盘的径向恒星密度轮廓,我们发现,径向轮廓显示两个断裂。这可能暗示银河系盘结构受到了合并事件的影响。从恒星密度和运动学中揭示的大量证据证明,恒星盘远非动态平衡。事实上,它可能被几亿年前一个穿越而过的矮星系严重干扰。这一事件给许多恒星的轨道注入了能量和角动量。因此,这些恒星在所有三个维度上都表现出显著的不对称运动。此外,在 Z - V_z 相平面上,盘星的数密度和周向速度显示出螺旋式结构。这种螺旋状结构以及其他投影相平面上复杂的不对称运动都可能是通过矮星系引起的扰动,尽管这个矮星系还尚未得到证认。最后,测量银河系的暗物质质量及本地暗物质密度是一项非常艰难的任务。我们试图用附近恒星的垂直运动和垂直分布来锁定当地的暗物质密度。经过几次尝试,我们将局部暗物质密度的不确定性从50%左右降低到20%左右。

近年来,随着LAMOST一期巡天成功完成观测任务,16台光谱仪得到了升级,将分辨本领从一期的 $R \sim 1800$ 提高到7500。在中等分辨率下,LAMOST在20 min曝光时间内可以有效观测极限星等为14等左右的恒星光谱。其波长覆盖了495~535和630~680 nm。在这一波长范围内,LAMOST可以观测恒星大气中氢的巴尔末线($H\alpha$ 线)、镁的吸收线,以及大量的 α 元素和铁峰元素的吸收线。理论上,LAMOST可以对15~20种元素的化学丰度进行测量^[121],这为进一步对银河系开展以化学元素丰度为主要观测目标的银河系星系考古研究奠定了重要的观测基础^[122]。

参考文献

- 1 Eggen O J, Lynden-Bell D, Sandage A R. Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed. *Astrophys J*, 1962, 136: 748
- 2 Searle L, Zinn R. Compositions of halo clusters and the formation of the galactic halo. *Astrophys J*, 1978, 225: 357–379
- 3 Mo H J, Mao S, White S D M. The formation of galactic discs. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1998, 295: 319–336
- 4 Gilmore G, Reid N. New light on faint stars—III. Galactic structure towards the South Pole and the Galactic thick disc. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1982, 202: 1025–1047
- 5 Dehnen W, Binney J J. Local stellar kinematics from HIPPARCOS data. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1998, 298: 387–394
- 6 Dehnen W. The effect of the outer Lindblad resonance of the galactic bar on the local stellar velocity distribution. *Astron J*, 2000, 119: 800–812
- 7 Antoja T, Figueras F, Fernández D, et al. Origin and evolution of moving groups. *Astron Astrophys*, 2008, 490: 135–150
- 8 Quillen A C, Dougherty J, Bagley M B, et al. Structure in phase space associated with spiral and bar density waves in an N -body hybrid galactic disc. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 417: 762–784
- 9 Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astron J*, 2006, 131: 1163–1183
- 10 Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2009, 182: 543–558
- 11 Yanny B, Rockosi C, Newberg H J, et al. SEGUE: A spectroscopic survey of 240,000 stars with $g = 14$ –20. *Astron J*, 2009, 137: 4377–4399

- 12 Newberg H J, Yanny B, Rockosi C, et al. The ghost of Sagittarius and lumps in the halo of the Milky Way. *Astrophys J*, 2002, 569: 245–274
- 13 Majewski S R, Skrutskie M F, Weinberg M D, et al. A Two Micron All Sky Survey view of the Sagittarius dwarf galaxy. I. Morphology of the Sagittarius core and tidal arms. *Astrophys J*, 2003, 599: 1082–1115
- 14 Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. The field of streams: Sagittarius and its siblings. *Astrophys J*, 2006, 642: L137–L140
- 15 Grillmair C J, Dionatos O. Detection of a 63° cold stellar stream in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J*, 2006, 643: L17–L20
- 16 Belokurov V, Evans N W, Bell E F, et al. The Hercules-Aquila cloud. *Astrophys J*, 2007, 657: L89–L92
- 17 Newberg H J, Yanny B, Cole N, et al. The overdensity in Virgo, Sagittarius debris, and the asymmetric spheroid. *Astrophys J*, 2007, 668: 221–235
- 18 Newberg H J, Yanny B, Willett B A. Discovery of a new, polar-orbiting debris stream in the Milky Way stellar halo. *Astrophys J*, 2009, 700: L61–L64
- 19 Yanny B, Newberg H J, Grebel E K, et al. A low-latitude halo stream around the Milky Way. *Astrophys J*, 2003, 588: 824–841
- 20 Bonaca A, Geha M, Kallivayalil N. A cold Milky Way stellar stream in the direction of Triangulum. *Astrophys J*, 2012, 760: L6
- 21 Helmi A. Streams, substructures, and the early history of the Milky Way. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2020, 58: 205–256
- 22 Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. A curious Milky Way satellite in Ursa Major. *Astrophys J*, 2006, 650: L41–L44
- 23 Zucker D B, Belokurov V, Evans N W, et al. A new Milky Way dwarf satellite in Canes Venatici. *Astrophys J*, 2006, 643: L103–L106
- 24 Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. A faint new Milky Way satellite in Bootes. *Astrophys J*, 2006, 647: L111–L114
- 25 Belokurov V, Zucker D B, Evans N W, et al. Cats and dogs, hair and a hero: A quintet of new Milky Way companions. *Astrophys J*, 2007, 654: 897–906
- 26 Rocha-Pinto H J, Majewski S R, Skrutskie M F, et al. Exploring halo substructure with giant stars: A diffuse star cloud or tidal debris around the Milky Way in Triangulum-Andromeda. *Astrophys J*, 2004, 615: 732–737
- 27 Widrow L M, Gardner S, Yanny B, et al. Galactoseismology: Discovery of vertical waves in the Galactic disk. *Astrophys J*, 2012, 750: L41
- 28 Xu Y, Newberg H J, Carlin J L, et al. Rings and radial waves in the disk of the Milky Way. *Astrophys J*, 2015, 801: 105
- 29 Oort J H. The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1932, 6: 249
- 30 Xue X X, Rix H W, Zhao G, et al. The Milky Way's circular velocity curve to 60 kpc and an estimate of the dark matter halo mass from the kinematics of ~2400 SDSS blue horizontal-branch stars. *Astrophys J*, 2008, 684: 1143–1158
- 31 Wang W, Han J, Cooper A P, et al. Estimating the dark matter halo mass of our Milky Way using dynamical tracers. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 453: 377–400
- 32 Deng L C, Newberg H J, Liu C, et al. LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration (LEGUE)—The survey's science plan. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 735–754
- 33 Wu Y, Luo A L, Li H N, et al. Automatic determination of stellar atmospheric parameters and construction of stellar spectral templates of the Guoshoujing Telescope (LAMOST). *Res Astron Astrophys*, 2011, 11: 924–946
- 34 Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. The first data release (DR1) of the LAMOST regular survey. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1095–1124
- 35 Ness M, Hogg D W, Rix H W, et al. The Cannon: A data-driven approach to stellar label determination. *Astrophys J*, 2015, 808: 16
- 36 Ting Y S, Conroy C, Rix H W, et al. *The Payne*: Self-consistent *ab initio* fitting of stellar spectra. *Astrophys J*, 2019, 879: 69
- 37 Zhang B, Liu C, Deng L C. Deriving the stellar labels of LAMOST spectra with the Stellar LAbel Machine (SLAM). *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 246: 9
- 38 Gao H, Zhang H W, Xiang M S, et al. Validation of LAMOST stellar parameters with the PASTEL catalog. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 2204–2212
- 39 Gao S, Liu C, Zhang X, et al. The binarity of Milky Way F, G, K stars as a function of effective temperature and metallicity. *Astrophys J*, 2014, 788: L37
- 40 Tian H J, Liu C, Carlin J L, et al. The stellar kinematics in the solar neighborhood from LAMOST data. *Astrophys J*, 2015, 809: 145
- 41 Xiang M S, Liu X W, Shi J R, et al. Estimating stellar atmospheric parameters, absolute magnitudes and elemental abundances from the LAMOST spectra with Kernel-based principal component analysis. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 464: 3657–3678
- 42 Ho A Y Q, Ness M K, Hogg D W, et al. Label transfer from APOGEE to LAMOST: Precise stellar parameters for 450,000 LAMOST giants. *Astrophys J*, 2017, 836: 5
- 43 Ho A Y Q, Rix H W, Ness M K, et al. Masses and ages for 230,000 LAMOST giants, via their carbon and nitrogen abundances. *Astrophys J*, 2017, 841: 40
- 44 Liu C, Fang M, Wu Y, et al. Asteroseismic-based estimation of the surface gravity for the LAMOST giant stars. *Astrophys J*, 2015, 807: 4
- 45 Wang L, Wang W, Wu Y, et al. Calibration of LAMOST stellar surface gravities using the Kepler asteroseismic data. *Astron J*, 2016, 152: 6
- 46 Carlin J L, Liu C, Newberg H J, et al. Estimation of distances to stars with stellar parameters from LAMOST. *Astron J*, 2015, 150: 4
- 47 Xiang M S, Liu X W, Yuan H B, et al. LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anticentre (LSS-GAC): The second release of value-added catalogues. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 467: 1890–1914
- 48 Xiang M, Liu X, Shi J, et al. The ages and masses of a million Galactic-disk main-sequence turnoff and subgiant stars from the LAMOST Galactic

- spectroscopic surveys. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 232: 2
- 49 Liu C, Deng L C, Carlin J L, et al. The K giant stars from the LAMOST survey data. I. Identification, metallicity, and distance. *Astrophys J*, 2014, 790: 110
 - 50 Wan J C, Liu C, Deng L C, et al. Red clump stars from the LAMOST data I: Identification and distance. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1166–1181
 - 51 Huang Y, Liu X W, Zhang H W, et al. On the metallicity gradients of the Galactic disk as revealed by LSS-GAC red clump stars. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1240–1263
 - 52 Huang Y, Schönrich R, Zhang H, et al. Mapping the Galactic disk with the LAMOST and Gaia red clump sample. I. Precise distances, masses, ages, and 3D velocities of $\sim 140,000$ red clump stars. *Astrophys J Suppl Ser*, 2020, 249: 29
 - 53 Xiang M S, Liu X W, Yuan H B, et al. The evolution of stellar metallicity gradients of the Milky Way disk from LSS-GAC main sequence turn-off stars: A two-phase disk formation history? *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1209
 - 54 Zhong J, Li J, Carlin J L, et al. Value-added catalogs of M-type stars in LAMOST DR5. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 244: 8
 - 55 Carlin J L, Lépine S, Newberg H J, et al. An algorithm for preferential selection of spectroscopic targets in LEGUE. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 755–771
 - 56 Yuan H B, Liu X W, Huo Z Y, et al. LAMOST Spectroscopic Survey of the Galactic Anticentre (LSS-GAC): Target selection and the first release of value-added catalogues. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 448: 855–894
 - 57 Liu C, Xu Y, Wan J C, et al. Mapping the Milky Way with LAMOST I: Method and overview. *Res Astron Astrophys*, 2017, 17: 096
 - 58 Chen B Q, Liu X W, Yuan H B, et al. The selection function of the LAMOST spectroscopic survey of the Galactic anti-centre. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 476: 3278–3289
 - 59 Watkins L L, Evans N W, Belokurov V, et al. Substructure revealed by RR Lyraes in SDSS Stripe 82. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2009, 398: 1757–1770
 - 60 Deason A J, Belokurov V, Evans N W. The Milky Way stellar halo out to 40 kpc: Squashed, broken but smooth. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 416: 2903–2915
 - 61 Xue X X, Rix H W, Ma Z, et al. The radial profile and flattening of the Milky Way's stellar halo to 80 kpc from the SEGUE K-giant survey. *Astrophys J*, 2015, 809: 144
 - 62 Xu Y, Liu C, Xue X X, et al. Mapping the Milky Way with LAMOST–II. The stellar halo. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 473: 1244–1257
 - 63 Iorio G, Belokurov V, Erkal D, et al. The first all-sky view of the Milky Way stellar halo with *Gaia*+2MASS RR Lyrae. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 474: 2142–2166
 - 64 Belokurov V, Erkal D, Evans N W, et al. Co-formation of the disc and the stellar halo. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 478: 611–619
 - 65 Helmi A, Babusiaux C, Koppelman H H, et al. The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk. *Nature*, 2018, 563: 85–88
 - 66 Prusti T, de Bruijne J H J, Brown A G A, et al. The *Gaia* mission. *Astron Astrophys*, 2016, 595: A1
 - 67 Brown A G A, Vallenari A, Prusti T, et al. *Gaia* Data Release 2. *Astron Astrophys*, 2018, 616: A1
 - 68 Tian H, Liu C, Xu Y, et al. Rotating halo traced by the K-giant stars from LAMOST and *Gaia*. *Astrophys J*, 2019, 871: 184
 - 69 Tian H, Liu C, Xu Y, et al. Tracing the rotational velocity of the halo with K-giant stars in LAMOST-Gaia era. In: Proceedings of the International Astronomical Union, 2020, 353: 57–58
 - 70 Smith M C, Wyn Evans N, An J H. The tilt of the halo velocity ellipsoid and the shape of the Milky Way halo. *Astrophys J*, 2009, 698: 1110–1116
 - 71 Kafle P R, Sharma S, Lewis G F, et al. Kinematics of the stellar halo and the mass distribution of the Milky Way using blue horizontal branch stars. *Astrophys J*, 2012, 761: 98
 - 72 Deason A J, Belokurov V, Evans N W. Rotation of halo populations in the Milky Way and M31. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 411: 1480–1494
 - 73 Xue X X, Ma Z, Rix H W, et al. The SEGUE K giant survey. II. A catalog of distance determinations for the SEGUE K giants in the Galactic halo. *Astrophys J*, 2014, 784: 170
 - 74 Bird S A, Xue X X, Liu C, et al. Anisotropy of the Milky Way's stellar halo using K giants from LAMOST and *Gaia*. *Astron J*, 2019, 157: 104
 - 75 Bird S A, Xue X X, Liu C, et al. Constraints on the assembly history of the Milky Way's smooth, diffuse stellar halo from the metallicity-dependent, radially-dominated velocity anisotropy profiles probed with K giants and BHB stars using LAMOST, SDSS/SEGUE, and *Gaia*. 2020, arXiv: 2005.05980
 - 76 Li J, Fellow L, Liu C, et al. Detecting the Sagittarius stream with LAMOST DR4 M giants and *Gaia* DR2. *Astrophys J*, 2019, 874: 138
 - 77 Sesar B, Hernitschek N, Mitrović S, et al. Machine-learned identification of RR Lyrae stars from sparse, multi-band data: The PS1 sample. *Astron J*, 2017, 153: 204
 - 78 Dierickx M I P, Loeb A. Predicted extension of the Sagittarius stream to the Milky Way virial radius. *Astrophys J*, 2017, 836: 92
 - 79 Yang C, Xue X X, Li J, et al. Tracing kinematic and chemical properties of Sagittarius stream by K-giants, M-giants, and BHB stars. *Astrophys J*, 2019, 886: 154
 - 80 Carlin J L, Liu C, Newberg H J, et al. Characterizing the SHARDS of disrupted Milky Way satellites with LAMOST. *Astrophys J*, 2016, 822: 16

- 81 Yang C, Xue X X, Li J, et al. Identifying Galactic halo substructure in 6D phase space using $\sim 13,000$ LAMOST K giants. *Astrophys J*, 2019, 880: 65
- 82 Klement R J. Halo streams in the solar neighborhood. *Astron Astrophys Rev*, 2010, 18: 567–594
- 83 Zhao J K, Zhao G, Chen Y Q, et al. Three moving groups detected in the LAMOST DR1 archive. *Astrophys J*, 2014, 787: 31
- 84 Zhao J K, Zhao G, Chen Y Q, et al. Halo stream candidates in the LAMOST DR2. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1378–1391
- 85 Zhao J K, Zhao G, Aoki W, et al. Tracing the origin of moving groups. II. Chemical abundance of six stars in the halo stream LAMOST-N1. *Astrophys J*, 2018, 868: 105
- 86 Xing Q F, Zhao G, Aoki W, et al. Evidence for the accretion origin of halo stars with an extreme r-process enhancement. *Nat Astron*, 2019, 3: 631–635
- 87 Bland-Hawthorn J, Gerhard O. The galaxy in context: Structural, kinematic, and integrated properties. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2016, 54: 529–596
- 88 Xia Q, Liu C, Xu Y, et al. The velocity distribution in the solar neighbourhood from the LAMOST pilot survey. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 447: 2367–2377
- 89 Katz D, Antoja T, Romero-Gómez M, et al. *Gaia* Data Release 2. *Astron Astrophys*, 2018, 616: A11
- 90 Tian H J, Liu C, Wu Y, et al. Time stamps of vertical phase mixing in the Galactic disk from LAMOST/*Gaia* stars. *Astrophys J*, 2018, 865: L19
- 91 Antoja T, Helmi A, Romero-Gómez M, et al. A dynamically young and perturbed Milky Way disk. *Nature*, 2018, 561: 360–362
- 92 Huang Y, Liu X W, Yuan H B, et al. Determination of the local standard of rest using the LSS-GAC DR1. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 449: 162–174
- 93 Carlin J L, DeLaunay J, Newberg H J, et al. Substructure in bulk velocities of Milky Way disk stars. *Astrophys J*, 2013, 777: L5
- 94 Sun N C, Liu X W, Huang Y, et al. Galactic disk bulk motions as revealed by the LSS-GAC DR2. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1342–1363
- 95 Bond N A, Ivezić Ž, Sesar B, et al. The Milky Way tomography with SDSS. III. Stellar kinematics. *Astrophys J*, 2010, 716: 1–29
- 96 Siebert A, Famaey B, Minchev I, et al. Detection of a radial velocity gradient in the extended local disc with RAVE. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 412: 2026–2032
- 97 Minniti D, Saito R K, Alonso-García J, et al. The edge of the Milky Way stellar disk revealed using clump giant stars as distance indicators. *Astrophys J*, 2011, 733: L43
- 98 Wang H F, Liu C, Xu Y, et al. Mapping the Milky Way with LAMOST–III. Complicated spatial structure in the outer disc. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 478: 3367–3379
- 99 Levine E S, Blitz L, Heiles C. The vertical structure of the outer Milky Way HI disk. *Astrophys J*, 2006, 643: 881–896
- 100 López-Corredoira M, Betancort-Rijo J, Beckman J E. Generation of galactic disc warps due to intergalactic accretion flows onto the disc. *Astron Astrophys*, 2002, 386: 169–186
- 101 Chen X, Wang S, Deng L, et al. An intuitive 3D map of the Galactic warp’s precession traced by classical Cepheids. *Nat Astron*, 2019, 3: 320–325
- 102 Huang Y, Schönrich R, Liu X W, et al. On the kinematic signature of the Galactic warp as revealed by the LAMOST-TGAS data. *Astrophys J*, 2018, 864: 129
- 103 Wang H F, López-Corredoira M, Huang Y, et al. Mapping the Galactic disk with the LAMOST and *Gaia* red clump sample. VI. Evidence for the long-lived nonsteady warp of nongravitational scenarios. *Astrophys J*, 2020, 897: 119
- 104 Siebert A, Famaey B, Binney J, et al. The properties of the local spiral arms from RAVE data: Two-dimensional density wave approach. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2012, 425: 2335–2342
- 105 Liu C, Wang Y G, Shen J, et al. The local spiral arm in the LAMOST-*Gaia* common stars? *Astrophys J*, 2017, 835: L18
- 106 Binney J, Schönrich R. The origin of the *Gaia* phase-plane spiral. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 481: 1501–1506
- 107 Tian H J, Liu C, Wan J C, et al. Peculiar in-plane velocities in the outer disc of the Milky Way. *Res Astron Astrophys*, 2017, 17: 114
- 108 Liu C, Xu Y, Wang H, et al. Rediscovering the Galactic outer disk with LAMOST data. In: Proceedings of the International Astronomical Union, 2018, 334: 109–115
- 109 Li Z Y, Shen J. Dissecting the phase space snail shell. *Astrophys J*, 2020, 890: 85
- 110 Wang C, Huang Y, Yuan H B, et al. The Galactic disk phase spirals at different Galactic positions revealed by *Gaia* and LAMOST data. *Astrophys J*, 2019, 877: L7
- 111 Li Z Y. Vertical phase mixing across the Galactic disk. 2020, arXiv: 2011.11250
- 112 Bland-Hawthorn J, Sharma S, Tepper-García T, et al. The GALAH survey and *Gaia* DR2: Dissecting the stellar disc’s phase space by age, action, chemistry, and location. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 486: 1167–1191
- 113 Laporte C F P, Minchev I, Johnston K V, et al. Footprints of the Sagittarius dwarf galaxy in the *Gaia* data set. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 485: 3134–3152
- 114 Xu Y, Liu C, Tian H, et al. Exploring the perturbed Milky Way disk and the substructures of the outer disk. 2020, arXiv: 2010.14096
- 115 Cheng X, Liu C, Mao S, et al. Ripple patterns in in-plane velocities of OB stars from LAMOST and *Gaia*. *Astrophys J*, 2019, 872: L1

- 116 Read J I. The local dark matter density. [J Phys G-Nucl Part Phys](#), 2014, 41: 063101
- 117 Huang Y, Liu X W, Yuan H B, et al. The Milky Way's rotation curve out to 100 kpc and its constraint on the Galactic mass distribution. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2016, 463: 2623–2639
- 118 Garbari S, Liu C, Read J I, et al. A new determination of the local dark matter density from the kinematics of K dwarfs. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2012, 425: 1445–1458
- 119 Xia Q, Liu C, Mao S, et al. Determining the local dark matter density with LAMOST data. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2016, 458: 3839–3850
- 120 Guo R, Liu C, Mao S, et al. Measuring the local dark matter density with LAMOST DR5 and *Gaia* DR2. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2020, 495: 4828–4844
- 121 Zhang B, Liu C, Li C Q, et al. Exploring the spectral information content in the LAMOST medium-resolution survey (MRS). [Res Astron Astrophys](#), 2020, 20: 051
- 122 Liu C, Fu J, Shi J, et al. LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan. 2020, arXiv: [2005.07210](#)

Summary for “基于LAMOST巡天的银河系结构演化研究新进展”

Progress on the structure and evolution of the Milky Way based on LAMOST survey

Chao Liu^{1,2}¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, ChinaE-mail: liuchao@nao.cas.cn

The Milky Way is, at least for now, the only galaxy that we can obtain the full 3 dimensional spatial and kinematical information of individual stars. This makes it the most important galaxy sample that we can study in details. In principle, better understanding on how the Milky Way ensembles and how it evolves plays a vital role in Galactic astronomy. Since Hipparcos ages, people started to study the Galaxy with tens of thousands of stars as samples. The observations allow us to discover a lot of new phenomena in the solar neighborhood. SDSS and 2MASS surveys extend our vision to a larger volume of the Galaxy, in which rich substructures in the stellar halo have been unveiled. LAMOST survey provides 10 more million stellar spectra, substantially pushes our knowledge of the Milky Way forward. In this article, we briefly review the substantial progress on several fields, including the structure and evolution of the stellar halo, the structure and non-equilibrium kinematics of the Galactic outer disk, and the dynamical mass and local dark matter density of the galaxy, based on the LAMOST survey data. We know that the stellar halo has a complicated shape with oblate stellar density profile in the inner part and spherical profile in the outer part. We find that the inner stellar halo rotates with a velocity of around 20 km/s, which is very likely associated with the secular evolution between the Galactic disk and the halo. New tidal debris originated from merged dwarf galaxies has been found in the phase space rather than in the physical space. This implies that the stellar halo may be dominated by the tidal debris and favor a pure merged origin of the stellar halo. Thanks to the deep survey of LAMOST in the Galactic anti-center direction, we are able to detect the edge of the disk. We find that the Galactic stellar disk does not show end or truncation at least at the galactocentric distance of 20 kpc. This means that the Milky Way must have a quite large disk. By carefully measuring the radial stellar density profile of the outer Galactic disk, we found that the radial profile shows two breaks. This may be evident that the Milky Way disk is affected by the merging event some years ago. Tons of evidences have been revealed from stellar density and kinematics to support that the stellar disk is far from dynamical equilibrium. In fact, it may be severely perturbed by a passing-by dwarf satellite a few hundred million years ago. This event injected energy and angular momenta to the orbits of many stars. As a consequence, these stars show significant asymmetric motion in all three dimensions. Moreover, the mean velocity of the disk stars shows spiral patterns in Z - V_Z phase plane. This spiral pattern and complicated asymmetric motions in other projected phase plane, may be all the results of the perturbation induced by the passing-by dwarf satellite, although the identification of these dwarf galaxies is still unclear. Finally, measuring the dark matter mass of the Milky Way is a non-trivial task. We tried to lock down the local dark matter density using the vertical motion and vertical distribution of nearby stars. After a few tries, we reduced the uncertainty of the local dark matter density from around 50% to about 20% and obtained that the dark matter density at solar vicinity is $0.0133^{+0.0024}_{-0.0022} M_{\odot} \text{pc}^{-3}$.

Galaxy, Galactic structure, Galactic kinematics and dynamics, galaxy formation and evolutiondoi: [10.1360/TB-2020-1596](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1596)