

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.04.01

银河系旋臂结构研究进展

徐 烨¹, 刘德剑^{2,3}

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210023; 2. 三峡大学 数理学院, 宜昌 443002; 3. 三峡大学 天文与空间科学研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 银河系旋臂结构是天文学的核心课题之一, 长期以来面临着巨大的挑战。系统回顾了该领域的研究历程, 梳理了银河系旋臂结构研究的历史脉络与最新进展。在过去的 200 年里, 银河系旋臂结构逐渐从猜想到被真实观测到, 从太阳附近的旋臂段到覆盖银河系的旋臂全貌, 人类对银河系旋臂结构的认识取得了突破性进展。银河系旋臂结构呈现出复杂的特征, 在整体形态上主要存在四旋臂与两旋臂模型的争议; 在局部区域, 邻近太阳的旋臂框架已基本确立, 但不同研究描绘的精细结构仍存在诸多矛盾。新兴的运动学参数分析和恒星化学丰度测量方法为旋臂研究提供了新的视角。

关键词: 银河系; 旋臂结构; VLBI; Gaia

中图分类号: P156.5 **文献标识码:** A

1 引 言

银河系作为人类在宇宙中的家园, 是已知唯一存在智慧生命的星系, 也是宇宙中上万亿星系中的普通一员。尽管人类对银河系的研究已持续四百余年, 其旋臂结构的精确构建始终是天文学领域的重大挑战。这一难题源于太阳系位于银河系盘面内, 沿视线方向的各种结构特征相互叠加, 使得旋臂识别变得异常复杂。2021 年, “我们银河系特别吗?” 被 Science 杂志列为 125 个前沿科学问题之一。

银河系研究的科学历程可追溯至 17 世纪初, 伽利略首次通过望远镜观测证实银河系由密集恒星组成, 这一开创性发现标志着人类对银河系科学研究的开端。而关于银河系旋臂结构的研究则始于 19 世纪: 19 世纪中叶, Rosse 伯爵在河外星系 M51 中发现了旋涡结构后, 天文学家开始推测银河系可能具有类似的结构, 并根据想象建立了早期的旋臂猜想模型^[1-3]。真正的突破出现在 20 世纪中叶, Morgan 团队^[4, 5]通过大质量恒星观测首次证实太阳附近存在三条旋臂片段, 标志着人类认识到银河系确实存在旋臂结构。受限于光学波段观测的星际消光效应, 该研究仅能描绘太阳附近约 3 kpc 范围内的旋臂结构。与此同时, Oort

收稿日期: 2025-08-29; 修回日期: 2025-10-11

资助项目: 平方公里阵列射电望远镜 (SKA) 专项 (2022SKA0120103); 国家自然科学基金 (12503071, 12203104, 12403041)

通讯作者: 徐烨, xuye@pmo.ac.cn

团队^[6,7]利用不受消光影响的射电观测数据,通过分析中性氢(HI)分布的运动学距离,首次绘制了尺度达数十 kpc 的银河系全貌图景。

20 世纪 70 年代,天文学家们逐渐认识到运动学距离存在显著的不确定性,因此 Oort 团队^[6,7]基于此方法构建的银河系 HI 分布图可靠性存疑。1976 年,Georgelin 等人^[8]通过整合测光距离与改进的运动学距离测定方法,对 260 余个电离氢(HII)区进行了精确定位,由此提出了具有里程碑意义的四旋臂模型,并指出太阳附近不存在旋臂结构。此后直至 21 世纪,该模型通过多种旋臂示踪体不断得到修正和完善,包括 HII 区^[9-13]、分子云^[14,15]、HI^[16,17]、大质量恒星形成区脉泽^[18-21]、OB 星^[22-24]、疏散星团^[25-27]、造父变星^[28-30]等观测数据,这些研究显著深化了人类对银河系旋臂结构的认识。

2013 年 Xu 等人^[31]利用甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术对太阳附近一批大质量恒星形成区脉泽进行了精确的三角视差测量,结果表明太阳附近存在旋臂,即本地臂。更关键的是,该研究表明本地臂很可能是一条主旋臂,而并非传统认为的次级结构(如刺状结构或旋臂分支),这一发现对经典的四旋臂模型的可靠性提出了挑战。2023 年, Xu 等人^[32]进一步整合了所有具备三角视差精确距离的观测样本,包括大质量恒星形成区脉泽、OB 星、年轻疏散星团,首次提出全新的银河系旋臂结构模型:银河系是一个具有内部两条主旋臂,外部多条不规则旋臂的旋涡星系。值得注意的是,对河外星系形态的统计研究表明,新的旋臂模型在宇宙中更为普遍,而河外星系中几乎没有四条旋臂从内向外延伸的形态^[33]。

十余年来,射电波段 VLBI 测量技术的突破性进展,结合盖亚天体测量卫星(Gaia^[34])在光学波段提供的海量高精度数据,为银河系旋臂结构研究注入了新的活力。这些新的观测数据不仅带来诸多创新性认识,更推动了银河系旋臂结构研究的迅速发展。值得期待的是,包括中国贵州 500 m 射电望远镜的核心阵列(FAST Core Array^[35])及其与国内其他百米级射电望远镜一起组成的射电望远镜阵列(FAST Array^①)、位于南非和澳大利亚的平方公里阵列(Square Kilometre Array, SKA^②)、位于北美的下一代甚长基线望远镜阵列(Next Generation Very Large Array, ngVLA^③)等新一代观测设施都将在未来十年内陆续投入使用。这些具有革命性观测能力的设备,必将为揭开银河系旋臂结构之谜提供关键支撑。

本文系统梳理银河系旋臂结构研究的科学进程:首先回顾历史发展脉络,阐述天文学家探索和建立旋臂结构模型的演进过程;其次重点评述 21 世纪以来新型观测设备带来的研究进展;最后展望该领域的未来发展方向和科学前景。

^①fast.bao.ac.cn

^②<https://www.skao.int/en>

^③<https://ngvla.nrao.edu>

2 银河系旋臂结构的研究历史

1610 年, 伽利略首次将望远镜对向银河系, 观测到其由密集恒星组成的本质, 这一发现开启了人类对银河系科学研究的先河。1850 年, Rosse 伯爵在河外星系 M51 中发现了旋涡结构后, Alexander^[1] 率先提出银河系有可能具有类似旋涡结构的假说; 1900 年前后, Easton^[2, 3] 尝试构建了初步的银河系旋臂模型, 但由于太阳系深嵌于银盘内部, 这些早期模型因缺乏直接观测证据而长期停留在理论猜想阶段。当时天文学家们对银河系中心位置、尺度等基本问题产生了激烈争论^[36]。即使当时已观测到若干旋涡星云, 天文学家们仍无法确认这些结构是银河系的子结构还是独立星系, 导致银河系真实结构的研究陷入停滞。这一困局直到 1926 年才被 Hubble^[37] 通过测定仙女座大星云的距离所打破, 他确定仙女座一定位于银河系之外。1930 年, Trumpler^[38] 通过疏散星团的观测首次发现星际介质消光效应, 为早期银河系尺度的错误估值给出了合理解释。这些突破性的工作使天文学家们最终确认一些之前发现的旋涡星云实为独立星系, 并推测银河系可能是与 M51 类似结构的旋涡星系。

同一时期, Lindblad^[39] 开创性地采用恒星多普勒速度分析, 建立了首个银河系运动学模型。Oort^[40, 41] 随后完善了该模型, 并且根据银河系恒星的运动学特征解释了银河系的旋转。利用银河系旋转模型, 可以将观测到的天体的多普勒位移转换为距离, 即运动学距离, 该方法能较精确地确定遥远天体的距离。

射电天文学的兴起为银河系大尺度结构研究带来了革命性突破。1932 年, Jansky^[42] 首次探测到了银河系 21 cm 射电辐射; 1944 年, van de Hulst^[43] 理论预言该辐射来自星际介质中 HI 气体的精细结构跃迁, 这一预言于 1951 年被 Ewen 和 Purcell^[44] 证实。与传统光学观测相比, HI 21 cm 辐射不受星际消光影响, 结合运动学距离, 使天文学家们得以突破性地研究更大尺度的银河系。由于 HI 气体主要分布于银盘且与旋臂结构密切相关, 其成为研究银河系旋臂的理想示踪物^[45]。

20 世纪 50 年代, 银河系旋臂的研究取得了一系列重大进展。Morgan 团队^[4, 5] 通过大质量恒星的测光距离, 首次在太阳附近 3 kpc 范围内发现了三条明确的旋臂片段 (如图 1a) 所示)。然而, 受限光学波段的星际消光效应, 该研究未能揭示更大尺度的旋臂结构。与此同时, Christiansen 和 Hindman^[46] 从 HI 的银经-速度 ($l-v$) 分布图中发现了两个延伸的分离结构, 为旋臂的存在提供了新的证据。随着 HI 巡天范围的扩展, 天文学家们基于银河系旋转模型将 HI 观测数据转换为空间分布, 发现从银心距约 3 kpc 延伸到大于 10 kpc 的旋臂特征片段^[47-49]。1958 年, Oort 团队^[6, 7] 使用运动学距离方法, 首次绘制了尺度达数十 kpc 的银河系 HI 全貌分布图 (如图 1b) 所示)。这一里程碑式成果看似解决了旋臂结构问题, 却引发了新的争议: 内银河区域的数据解读存在显著分歧, 即便基于相同观测数据, 所导出的 HI 分布图在旋臂位置和数量上也显示出明显差异^[48, 50]。

20 世纪 60 年代, 随着观测技术的进步和示踪天体的多样化, 银河系旋臂的研究逐渐丰富了起来。1963 年, Kraft 和 Schmidt^[51] 通过对长周期经典造父变星的研究发现, 它们在太阳附近区域的分布可能存在类似旋臂的结构。同年, Becker^[52] 基于 156 个具有测光距离的疏散星团的空间分布, 发现太阳附近存在三条旋臂片段。1964 年, Becker^[53] 进一步将研究对象

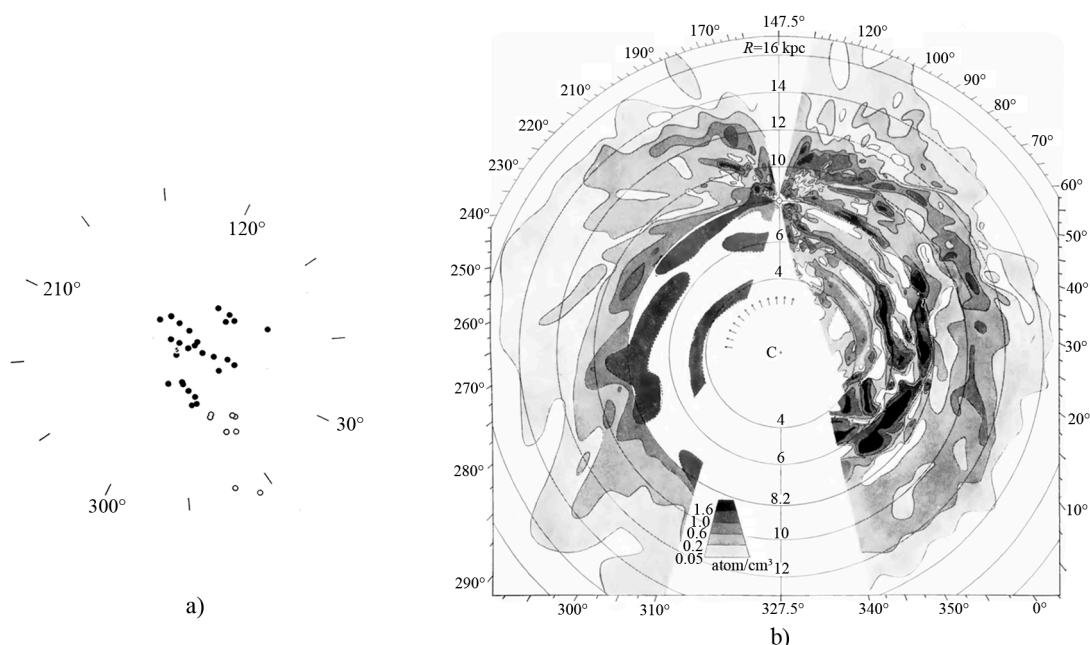
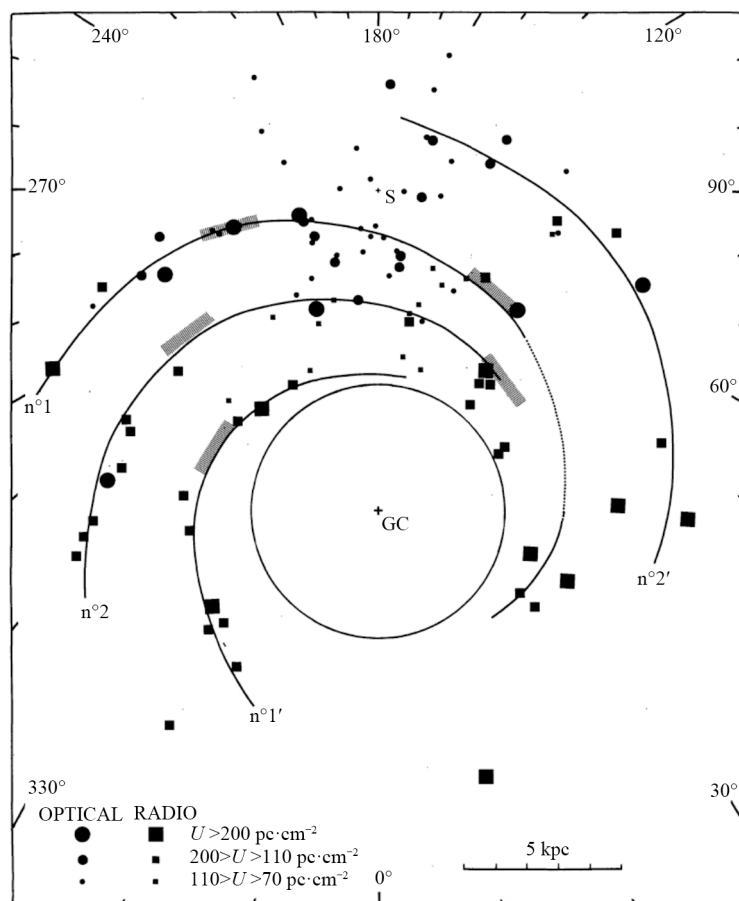


图 1 a) 利用大质量恒星示踪的太阳附近旋臂结构^[4,5]；b) 利用 HI 示踪的银河系旋臂结构全貌^[6,7]

拓展到年轻疏散星团和 HII 区，其研究结果揭示的太阳附近的三条旋臂结构与 HI 气体示踪结果不一致，再次对 HI 的银河系旋臂结构模型提出了新挑战。1968 年，Ferne^[54] 利用造父变星的空间分布发现太阳位于旋臂的外侧，而非当时利用 OB 星得到的结果所指出的太阳位于旋臂的内侧^[53]。其实两者结果都没有问题，Ferne^[54] 描绘出的最突出的旋臂是人马臂，而当时利用 OB 星示踪得到的最突出的旋臂是英仙臂。这些研究成果不仅丰富了我们对于银河系旋臂结构的认识，更揭示了不同天体在旋臂示踪中的特异性，为后续研究提供了重要的方法论启示。这一时期的工作奠定了多示踪天体比较研究的基础，推动银河系旋臂结构研究向更精细化的方向发展。

20 世纪 70 年代，天文学家们逐渐意识到运动学距离其实具有很大的不确定性，因为运动学距离严重依赖银河系运动学模型，如旋转曲线。天体除了绕银河系旋转的系统运动之外，还存在本征运动，这种运动对运动学距离的估计也会产生极大的影响。另外，对于内银河系区域的源，同一个视向速度 (V_{LSR}) 可能对应两个运动学距离，因此需要结合其他方法进行区分，这为距离带来了更多的不确定性。上述几种因素导致的距离误差通常远大于旋臂之间的距离，因此利用 HI 构造的银河系旋臂结构并不准确。相比之下，Morgan 团队^[4,5] 的旋臂模型虽然只覆盖了太阳附近有限区域，但由于采用测光距离而保持较高的可靠性。然而，受观测手段和设备技术的限制，测光距离难以应用于遥远的天体，迫使研究者仍然广泛依赖运动学方法研究银河系旋臂整体结构。1976 年，Georgelin 等人^[8] 在银河系结构方面取得重要突破，他们创新性地结合测光距离和改进的运动学方法比较准确地定位了 260 余个 HII 区的空间分布，发现它们主要聚集于四条主旋臂上，即英仙臂、人马-船底臂、盾牌-南

十字-半人马臂和矩尺臂。这一系统性研究确立了经典的银河系四旋臂模型 (如图 2 所示), 为后续研究提供了重要框架。



注: 从上到下依次是英仙臂、人马-船底臂、盾牌-南十字-半人马臂、矩尺臂。

图 2 依据 HII 区的分布提出的经典四旋臂模型^[8]

20 世纪 80 年代后, 银河系旋臂结构的研究进入了一个蓬勃发展的时期。随着观测技术和研究方法的多元化, 天文学家们开始对旋臂结构进行更为精细的探究。CO 分子气体因其独特的分布特性被确认为理想的旋臂示踪体^[55, 56]。凭借身处银河系内部的优势, 科学家得以开展高灵敏度、高分辨率的分子气体巡天。例如: 基于哥伦比亚 CO 巡天数据, Dame 团队^[57] 证认了 26 个分子云, 发现它们在银盘上的分布与 HII 区高度一致, 并在第一象限清晰地描绘出了三条旋臂片段, 特别是清晰且连续的人马臂。与此同时, Cohen 等人^[15] 通过 37 个分子云的定位, 首次完整呈现了跨越 30 kpc 的人马-船底臂结构。Solomon 等人^[58] 通过统计 ^{12}CO 数据在 $20^\circ < \ell < 50^\circ$ 范围内的数量, 发现了盾牌臂与人马臂的旋臂切点。Grabelsky 等人^[59] 通过分子云示踪了长度超过 23 kpc 的船底臂。随后, 位于如南十字臂和矩尺臂上的

更多分子云也被逐步证认出来^[60]。除此之外,研究旋臂的方法也逐渐丰富了起来,通过分子云统计分析和 ℓ - v 空间内分子气体的分布与终端速度的偏移,天文学家们成功确定了多条旋臂的切点位置^[61, 62],这些切点成为了限制和验证旋臂结构的重要手段。

除分子气体外, HII 区、造父变星、疏散星团和射电连续谱等不同示踪天体为旋臂研究提供了多维视角。例如:1988 年, Opolski^[28]通过造父变星的空间分布发现了与射电观测数据吻合的旋臂特征; Taylor 和 Cordes^[11]通过结合 Downes 等人^[9]与 Caswell 和 Haynes^[10]的数据对 Georgelin 等人^[8]提出的经典四旋臂模型进行了更新。另外, Beuermann 等人^[63]利用 408 MHz 射电连续谱源沿银经方向的分布特征,成功识别出多个旋臂切点位置。Janes 和 Adler^[64]与 Lynga^[65]的研究结果显示,疏散星团呈现块状复合体分布而不具有旋臂结构,这一发现引发了关于疏散星团作为旋臂示踪天体适用性的争议。这些研究不仅实现了不同示踪天体间的交叉验证,更推动了旋臂结构研究方法的多元化发展。

3 银河系旋臂结构研究的现状

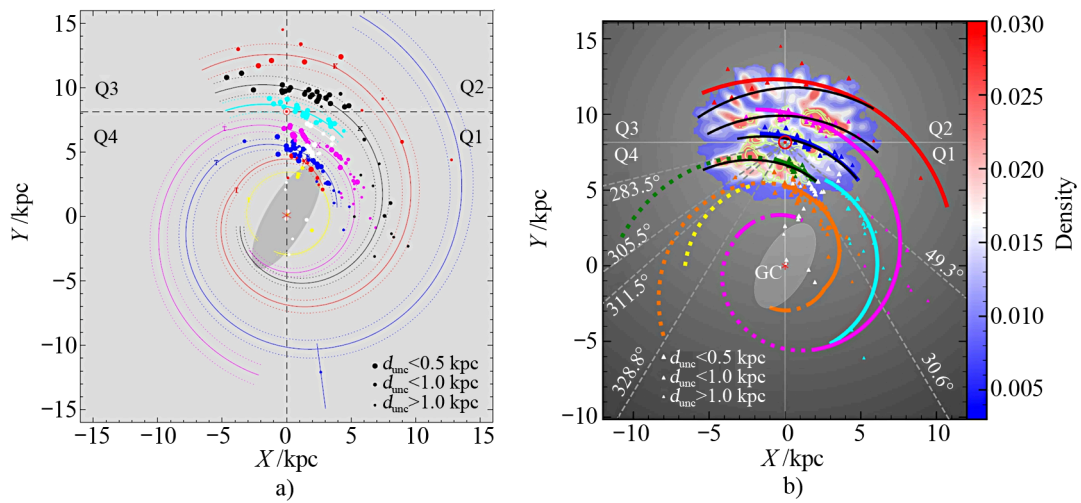
21 世纪,银河系旋臂研究迎来了革命性的突破,研究范式从单一示踪天体转向多波段数据交叉验证。天文学家们确立了新一代旋臂示踪体的两大标准:首先必须克服星际消光效应以实现大尺度观测,其次需要具备独立于运动学模型的精确距离测定能力。基于恒星形成区与旋臂的强相关性,大质量恒星形成区脉泽、OB 星、HII 区、年轻疏散星团等年轻天体,以及原子/分子气体成为理想示踪体。2013 年, Gaia 卫星的发射^[34]带来了重要进展,其提供的海量天体测量数据和天体物理参数为旋臂研究开辟了新维度。运动学特征(如速度场结构)和化学特征(如元素丰度)的引入,使得研究者能够通过多种独立手段相互验证旋臂结构。这种多示踪天体研究框架显著提升了结果的可靠性,接下来本文将通过不同示踪体分别综述银河系旋臂研究的现状。

3.1 大质量恒星形成区脉泽

2003 年, Xu 等人^[66]发现脉泽是银河系旋臂极好的示踪天体,它具有很高的亮温度、很小的空间尺度,并且与正在形成恒星的分子云成协。脉泽辐射可以穿透银盘上气体和尘埃的遮挡而被地球上的射电望远镜探测到,因此利用 VLBI 技术可以精确测定其三角视差距离。该方法的成功应用为银河系旋臂结构的研究带来了革命性的突破。2006 年, Xu 等人^[18]利用甚长基线干涉阵(Very Long Baseline Array, VLBA)首次精确测定英仙臂的三角视差距离为 1.95 ± 0.04 kpc,彻底解决了天文学界关于英仙臂位置的长期争论。这项工作成功推动了美国国立射电天文台的银河系棒和旋臂结构(Bar and Spiral Structure Legacy, BeSSeL, 简称贝塞尔)巡天项目。该项目对银河系旋臂结构的研究具有重要意义^[19]。

2013 年, Xu 等人^[31]利用贝塞尔数据在太阳附近发现了本地臂,其长度超过 5 kpc,螺旋距角约为 10° ,这些特征与其周围的人马臂和英仙臂特征类似,因此他们指出本地臂可能是一条主旋臂,而非人们普遍认为的本地臂是介于人马臂与英仙臂之间的刺状结构。2014 年, Reid 等人^[20]汇编了当时贝塞尔计划所有已观测的脉泽,并绘制了第一、二象限及第三象限

部分区域内的五条旋臂段的精细结构, 即盾牌臂、人马臂、本地臂、英仙臂与外臂。2016 年, Xu 等人^[67]利用脉泽进一步证实了本地臂是一条主旋臂, 并且首次发现了位于本地臂与人马臂之间的次结构, 表明银河系旋臂结构并不是如密度波理论预测的那样只有平滑的宏象旋臂结构。2019 年, Reid 等人^[21]汇编了贝塞尔计划、日本 VERA (VLBI Exploration Radio Astrometry) 项目、欧洲 VLBI 网和澳大利亚长基线干涉阵观测的 199 个具有精确三角视差距离的脉泽数据, 以及旋臂切点等辅助数据, 绘制了完整的银河系旋臂结构, 该结构继承了 Georgelin 等人^[8]的经典四旋臂模型, 即银河系具有四条从内向外的主旋臂, 分别是英仙臂、人马臂、盾牌臂和矩尺臂 (如图 3a) 所示)。



注: a) 黄色表示 3 kpc 臂, 红色表示矩尺-外臂, 蓝色表示盾牌-半人马臂, 品红色表示人马-船底臂, 青色表示本地臂, 黑色表示英仙臂, 白色表示次级结构。b) 品红色表示英仙臂, 橙色表示矩尺臂, 黄色表示半人马臂, 青色表示人马臂, 绿色表示船底臂, 蓝色表示本地臂, 红色表示外臂, 黑色表示利用 Gaia 年轻星示踪的位于太阳附近的旋臂结构, 从外到内依次为外臂、英仙臂、本地臂和船底臂。

图 3 a) 利用脉泽示踪的四旋臂模型^[21]; b) “内两臂 (英仙臂与矩尺臂)、外多臂” 的新旋臂模型^[32]

2023 年, Xu 等人^[32]利用当时可获取的全部具有精确三角视差的脉泽, 并且结合来自 Gaia 的 OB 星和年轻疏散星团, 重新塑造了银河系旋臂结构。首次提出银河系是一个内部两旋臂 (英仙臂和矩尺臂), 外部多旋臂的多旋臂旋涡星系^①。新模型指出英仙臂会在第一象限分叉出人马臂, 矩尺臂会在第四象限分叉出半人马臂 (如图 3b) 所示)。2024 年, Bian 等人^[69]利用新的脉泽观测数据发现, 人马臂和英仙臂可能会在第一象限内相交。Nakanishi 等人^[70]利用水脉泽研究旋转曲线发现, 两旋臂和四旋臂分别在银河系内部和外部占主导地位, 支持内部两旋臂和外部多旋臂的模型。

^①旋臂结构根据其形态特征可以分为宏象旋涡星系、多旋臂旋涡星系、絮状旋涡星系。其中宏象旋涡星系表示星系包含两条宏伟壮观的旋臂结构, 絮状旋涡星系表示星系只有短的旋臂段, 多旋臂旋涡星系介于两者之间^[68]。

3.2 OB 星与 HII 区

进入 21 世纪以来, 利用 OB 星研究银河系旋臂结构的进展主要得益于 Gaia 卫星数据。2018 年, Gaia 第二批数据集 (Data Release 2, DR2^[71]) 释放之后, Xu 的团队^[22]将 Reed^[72]汇编的 OB 星目录与 Gaia DR2 进行交叉匹配, 首次在 3 kpc 范围内绘制出了与当时贝塞尔计划结果高度一致的旋臂结构, 并发现了位于本地臂与人马臂之间的新次级结构。随后 Chen 等人^[23]利用来自 Gaia DR2 的 OB 星视差数据绘制了太阳附近的旋臂结构, 并且指出 OB 星所绘制的旋臂结构是絮状的。2021 年, 基于 Gaia EDR3 中所挑选的 OB 星, Xu 等人^[24]进一步绘制了太阳附近 5 kpc 以内的旋臂结构, 并且发现 OB 星所描绘的旋臂结构是不均匀的 (如图 4a) 所示)。2021 年, Poggio 等人^[73]综合利用从 Gaia EDR3 中挑选的上主序恒星、疏散星团和经典造父变星数据, 通过核密度估算方法和小波变换方法绘制了太阳附近的旋臂结构, 他们发现上主序星得到的人马臂长度与前人的模型一致, 而英仙臂和本地臂长度与前人的研究结果 (如 Reid 等人^[21]的工作) 有很大差异, 并且指出本地臂的长度至少是 8 kpc。

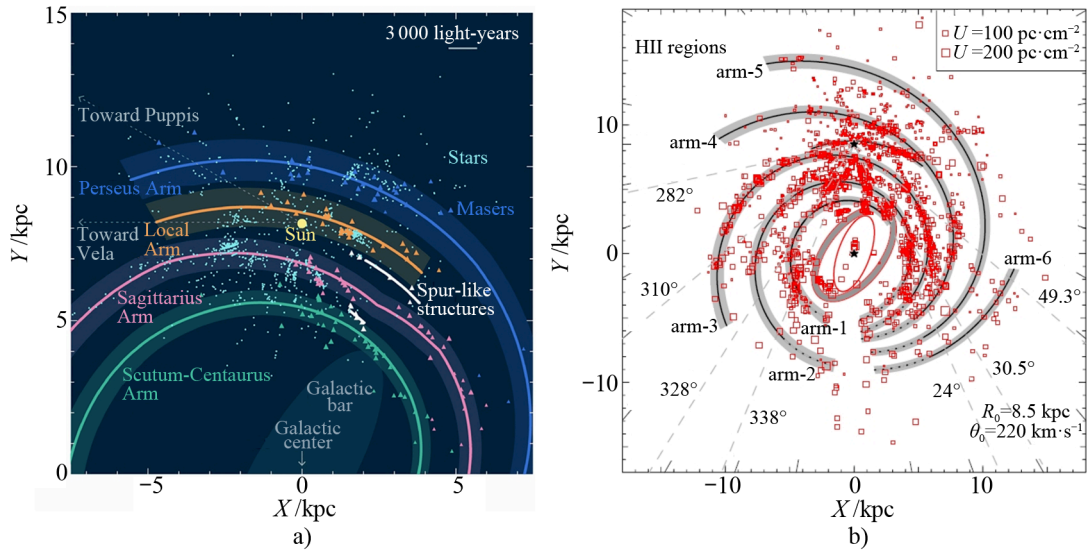
除了可以利用 OB 星的空间分布直接描绘银河系旋臂之外, 还可以利用其运动学特征研究旋臂的运动学和演化。2021 年, Gaia 团队^[74]发现太阳附近 OB 星的速度场结构与旋臂结构一致。2023 年, Liu 等人^[75]基于 Gaia DR3 数据中挑选的 OB 星和年轻疏散星团, 揭示出太阳附近不同旋臂具有独特的运动学特征。2024 年, Ge 等人^[76]利用从 Gaia DR3 中挑选的年龄分层的 OB 星, 研究了太阳附近几条旋臂的演化特征, 发现英仙臂随年龄增长呈现向反银心方向的系统性偏移, 船底臂的螺旋角随时间演化而逐渐变小。

由于受消光影响, 利用 OB 星无法示踪更远处的旋臂结构, 而与 OB 星成协的 HII 区可以有效弥补这一缺陷。HII 区在射电波段很亮, 几乎不受消光影响, 是示踪远距离旋臂结构的关键探针。目前 HII 区的距离测定主要依赖三种方法: 运动学距离、测光距离及通过成协脉泽或 OB 星的三角视差距离。HII 区的研究主要是对旋臂模型的验证和完善。

2003 年, Russeil^[12]利用不同旋臂模型对 HII 区的分布进行拟合, 结果表明银河系可能是一个四旋臂的宏象旋涡星系, 新的旋臂模型不仅支持 Georgelin 等人^[8]提出的经典四旋臂模型, 而且将旋臂长度加倍。2004 年, 基于 180 个 HII 区的空间分布, Paladini 等人^[13]进一步验证了经典四旋臂模型的普适性。Hou 等人^[77, 78]分别于 2009 和 2014 年利用超过 800 个和 2500 个 HII 区的多方法距离测定描绘银河系全貌, 发现三旋臂或四旋臂模型可以串联大部分 HII 区, 一定程度上支持了经典旋臂模型。图 4b) 展示了 Hou 等人^[78]于 2014 年利用 HII 区绘制的旋臂结构。2025 年, Shen 等人^[79]利用超过 570 个 HII 区重新描绘了本地的银河系旋臂结构, 其结果表明年轻天体示踪的本地臂具有较大的螺旋角, 为 $25.2^\circ \pm 2^\circ$, 与老年恒星^[80]示踪的结果一致。因此他们指出, 年轻天体与老年恒星示踪的旋臂结构之间不存在偏移。

3.3 原子/分子气体

尽管运动学距离存在不确定性, 原子气体与分子气体仍然是研究银河系大尺度旋涡结构不可或缺的示踪体, 其射电辐射不受消光影响, 可以揭示银河系遥远区域的结构特征。21 世纪以来, 随着原子和分子气体的巡天数据质量和灵敏度的显著提升, 我们对银河系旋臂



注: a) 从上到下分别是英仙臂 (蓝色)、本地臂 (橙色)、人马臂 (粉色)、盾牌-半人马臂 (绿色)。

图 4 a) 利用来自 Gaia 的 OB 星和脉泽示踪的太阳附近的旋臂结构^[24]; b) 利用 HII 区示踪的银河系旋臂结构的全貌^[78]

结构的认知范围得到了前所未有的扩展。

2006 年, Levine 等人^[16]利用 HI 气体的运动学距离绘制了从太阳圈到银河系 25 kpc 范围内的四旋臂结构, 并且确定旋臂的最佳拟合螺距角为 $20^\circ \sim 25^\circ$ (如图 5a) 所示)。2008 年, Dame 和 Thaddeus^[81]利用 CO 数据首次探测到银河系内部 3 kpc 臂的远端部分, 这一对称结构的发现为银河系中心棒的存在提供了重要支持。2009 年, Roman-Duval 等人^[82]通过估算 Galactic Ring Survey (GRS) 的 $^{13}\text{CO} (J = 1 - 0)$ 数据中分子云的运动学距离, 定位了第一、二象限内的盾牌-南十字臂和英仙臂。2011 年, Dame 和 Thaddeus^[83]结合甚大阵的银盘巡天 (Very Large Array Galactic Plane Survey, VGPS) 观测的 HI 和哈佛-史密松天体物理中心 (Center for Astrophysics, CfA) 1.2 m 望远镜观测的 CO 数据, 在第一象限内发现了距离银心约 15 kpc 处, 位于外臂之外的旋臂, 他们指出该旋臂可能是船底-半人马臂的延伸。2015 年, Sun 等人^[84]利用 HI 和“银河画卷”^[85] CO 分子巡天数据, 将 Dame 和 Thaddeus^[83]在第一象限内发现的船底-半人马臂延伸结构进一步拓展到了第二象限, 旋臂最远距离银心约 20 kpc。2024 年, Sun 等人^[86]进一步将其延伸至第三象限, 距离银心约 22 kpc (如图 5b) 所示)。与此同时, 第二、三象限内的分子云被不断证认, 本地臂、英仙臂、外臂的结构越来越清晰^[87, 88]。这些研究成果不仅将银河系旋臂结构的已知尺度推向新量级, 更为理解银河系外围的宏观结构提供了重要观测基础。尽管目前的运动学方法存在局限, 气体示踪体在揭示银河系大尺度结构时仍凸显不可替代的价值。

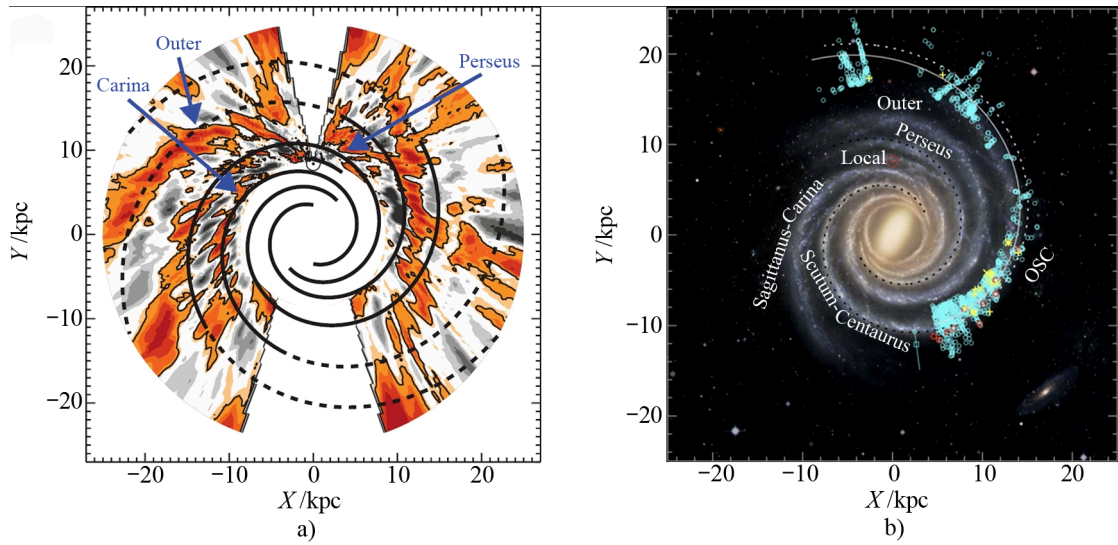
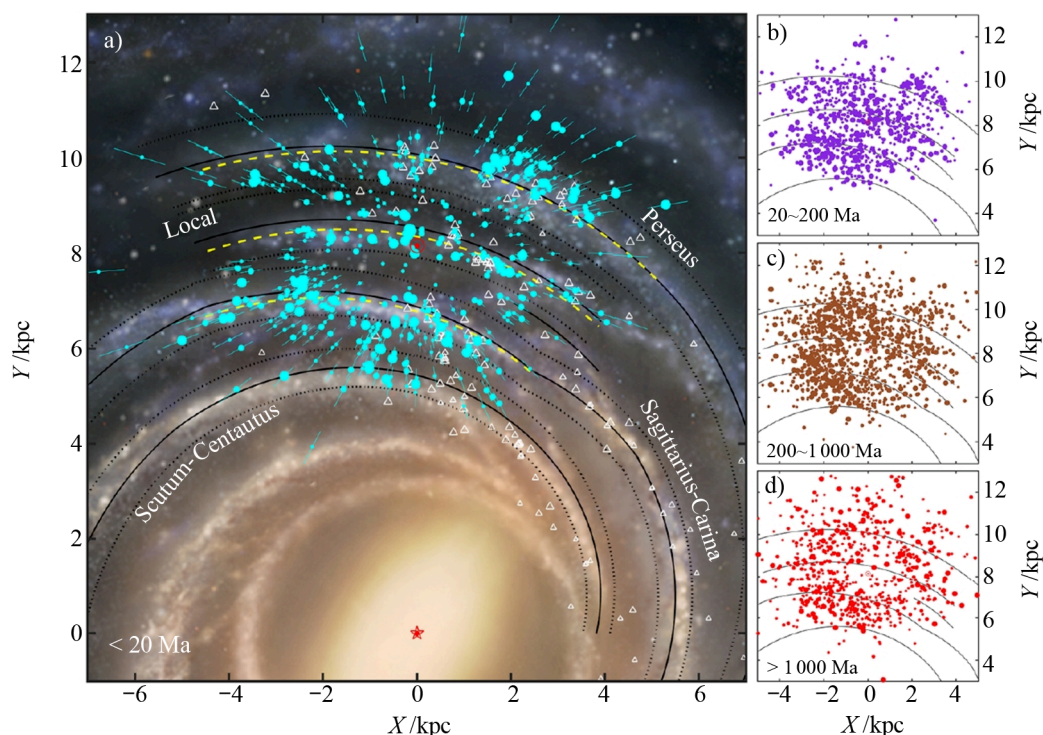


图 5 a) 利用 HI 示踪的延伸到大约 25 kpc 处的银河系旋臂结构^[16]；b) 利用“银河画卷”的 CO 分子气体拓展到大约 22 kpc 处的银河系旋臂结构^[86]

3.4 疏散星团

21 世纪以来, 疏散星团作为银河系旋臂示踪体的研究取得了突破性进展。早期关于其适用性的争议, 随着 Dias 和 Lépine^[25] 的研究而得到解决: 他们研究发现年龄小于 1.2 Ma 的疏散星团仍然分布在太阳附近的三条旋臂上, 即英仙臂、本地臂、人马-船底臂; 年龄超过 20 Ma 的疏散星团正在离开旋臂进入臂间区域; 年龄超过 30 Ma 的疏散星团的分布没有呈现出明显的旋臂结构或聚集成团。星团随年龄变化与空间分布的关系被后续多项研究证实^[26, 89], 因此, 通常认为年轻的疏散星团是可靠的银河系旋臂示踪天体, 而较老的疏散星团呈现更弥散的分布。

Gaia 数据的发布进一步促进了利用疏散星团研究旋臂的工作, 不仅为已知星团提供了更准确的天体测量参数^[90-92], 还证认了一大批新的疏散星团^[93-95]。基于这些星团数据, 研究者们不仅描绘了太阳附近多条旋臂结构^[90, 96], 还取得了一些新的重要发现。利用 Gaia 提供的星团运动学信息, Castro-Ginard 等人^[97] 借助最年轻的疏散星团发现, 不同旋臂具有不同的图案速度, 支持旋臂是瞬态结构而非长时间存在的理论。由于星团的年龄跨度很广, 往往从百万年到百亿年, 因此它们可以用于刻画旋臂的演化特征。Hao 等人^[27] 利用超过 3 000 个疏散星团对银河系的旋臂结构进行研究, 其结果表明太阳附近的旋臂结构至少在过去的 80 Ma 内可能是基本稳定的。这一结论并不支持前文中 Castro-Ginard 等人^[97] 的结论。同时揭示了太阳附近的旋臂演化特征与密度波理论预期的结果相符, 但密度波理论需要改进。图 6 展示了不同年龄疏散星团示踪的旋臂结构。



注: a) 小于 200 Ma 的疏散星团所示踪的旋臂结构。从外到内分别为英仙臂、本地臂、人马-船底臂、盾牌-半人马臂。b), c), d) 分别为 20~200 Ma、200~1000 Ma 和大于 1000 Ma 的疏散星团所示踪的旋臂。

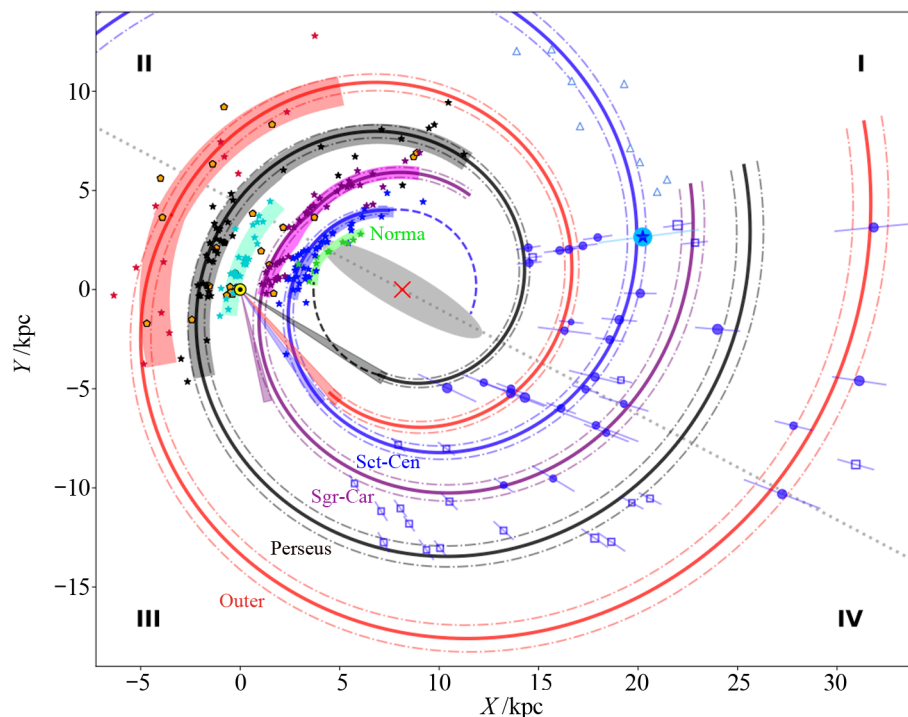
图 6 利用不同年龄疏散星团示踪的旋臂结构^[27]

3.5 造父变星与主序后星^①

作为一类年轻的脉动变星,经典造父变星凭借其精确的周光关系,成为研究银河系旋臂结构的示踪天体。多项研究证实了造父变星在示踪旋臂结构中的独特价值。2009 年, Majaess 等人^[29] 利用造父变星示踪的旋臂结构与星团示踪的结构一致, 并且指出人马-船底臂是一条主旋臂。2015 年, Dambis 等人^[30] 利用经典造父变星的空间分布, 绘制了太阳附近 5 kpc 范围的旋臂结构, 并且拟合得到的旋臂螺距角为 $9^{\circ} \sim 10^{\circ}$, 与四旋臂模型相似。2019 年, Skowron 等人^[98] 利用造父变星绘制了银河系的三维结构, 通过模拟发现造父变星诞生于旋臂上。2021 年, Minniti 等人^[99] 利用造父变星推出银河系结构倾向于一个有两条主旋臂的模型, 然后在银心距 5~6 kpc 附近分成四条旋臂(如图 7 所示)。2022 年, Lemasle 等人^[100] 利用造父变星数据在太阳附近发现了与 OB 星和脉泽一致的旋臂结构。2024 年, Funakoshi 等人^[101] 发现英仙臂与外臂上的造父变星的运动特征不一致, 并且指出英仙臂似乎正在被破坏, 而外臂正在生长, 因此认为银河系的这两条相邻旋臂可能处于完全相反的演化阶段。同时, Trentin 等人^[102] 发现, 远端的造父变星能够很好地示踪 Reid 等人^[21] 模型中第二和第三象限的外臂

^① evolved star

和盾牌-半人马臂。



注：从内到外分别是矩尺臂（绿色）、盾牌-半人马臂（蓝色）、人马-船底臂（紫色）、本地臂（青色）、英仙臂（黑色）、外旋臂（红色）。其中五角星与五边形均表示脉泽，带误差棒的散点均表示经典造父变星，三角形表示分子气体。详见 Minniti 等人^[99]的文章。

图 7 利用经典造父变星与大质量恒星形成区脉泽示踪的银河系旋臂结构^[99]

2009 年, Churchwell 等人^[103]通过统计红团簇星沿银经方向的数量, 发现了英仙臂与盾牌-半人马臂的旋臂切点, 而没有发现矩尺臂与人马臂的切点。因此他们指出, 银河系是一个拥有两条主旋臂（英仙臂和盾牌-半人马臂）, 以及至少两条次旋臂（矩尺臂和人马臂）的宏象旋涡星系（如图 8 所示）。2022 年, Lin 等人^[80]从 Gaia DR3 中挑选了典型年龄为 2 Ga 的红团簇星, 并描绘了银河系本地结构, 发现本地臂在老年恒星中也存在, 从 90° 延伸到 243° 左右, 与年轻恒星示踪的本地臂存在明显的偏移。

3.6 其他手段

银河系旋臂切点是研究其旋涡结构的重要手段。目前认为内银河系的旋臂切点分别对应人马臂、盾牌臂、英仙臂、矩尺臂、南十字-半人马臂、船底臂, 另外在第一象限内还存在 3 kpc 旋臂的近侧切点^[104]。Hou 和 Han^[105]利用不同年龄的示踪体对旋臂切点进行系统分析, 发现不同年龄示踪体所确定的旋臂切点存在偏移, 这为理解旋臂的长期演化提供了重要证据。

近年来, 基于 Gaia 数据的运动学研究为银河系旋臂结构观测提供了新的视角。继 Gaia

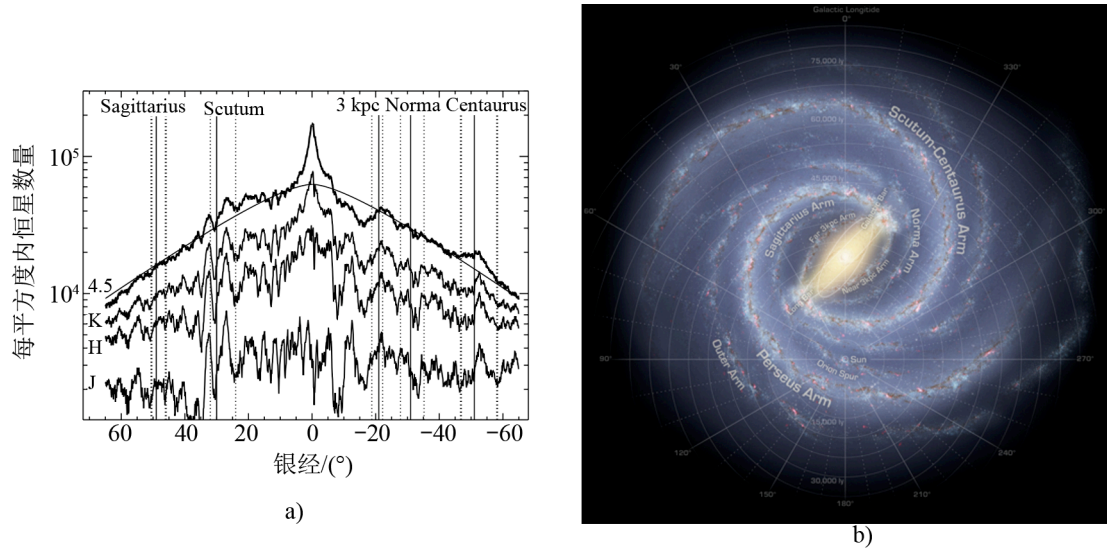


图 8 a) 统计沿银经方向每平方度内在 $4.5 \mu\text{m}$ 、K、H 和 J 波段的恒星数量, 没有发现人马臂的切点^[103]; b) 依据图 a) 的旋臂切点, 提出的老年星旋臂是一个拥有两条主旋臂 (英仙臂与盾牌-半人马臂), 以及至少两条次旋臂 (矩尺臂与人马臂) 的宏象旋涡星系

团队^[74]在 OB 星的速度场中发现旋臂结构之后, 多项研究通过不同运动学参数成功重现了旋臂结构。Palicio 等人^[106]在径向作用量 J_R 的空间分布中清晰地看到英仙臂、本地臂、人马臂和盾牌臂, 其空间位置与脉泽和 OB 星等传统示踪体的结果一致。Denyshchenko 等人^[107]在亮星 ($M_G < 4 \text{ mag}$) 的运动学参数的空间分布图中发现了四条旋臂, 与 Reid 等人^[21]提出的四旋臂模型比较吻合。

恒星化学特征作为新兴的旋臂示踪手段, 近年来取得了突破性进展。旋臂是恒星形成活跃区, 其化学特征蕴含着重要的结构信息, 但是由于银盘上沿径向的大尺度金属梯度掩盖了旋臂上金属丰度的微弱变化, 所以难以区分噪声与波动。这一局面随着 Gaia DR3 等大样本数据的发布得以改观。Poggio 等人^[108]通过扣除银盘径向的金属丰度之后, 在 $[M/H]$ 残差分布图中检测到更加清晰的旋臂特征。Hawkins^[109]通过对 LAMOST 和 Gaia DR3 数据中沿银河系径向和垂向金属梯度进行计算, 在径向梯度中发现了类似旋臂结构的残差。Hackshaw 等人^[110]利用 AstroNN^[111]星表计算了金属梯度, 并扣除均值后得到残差, 发现 $[\text{Fe}/H]$ 中的旋臂结构最明显; 同时旋臂结构的强度在其他 α 元素 (O、Mg、Si、S) 中也有约 0.1 dex 的量级。Barbillon 等人^[112]利用 α 元素揭示银河系旋臂的历史, 研究发现位于旋臂上的恒星要比位于旋臂间的恒星具有更高的金属丰度。Viscasillas 等人^[113]首次利用化学丰度揭示了内部旋臂 (盾牌臂和人马臂) 的图案, 并且发现了连接旋臂的刺结构, 他们认为这是旋臂分裂的结果, 支持 Xu 等人^[32]提出的多旋臂旋涡星系图案。这些研究表明, 恒星化学特征已成为研究银河系旋臂结构的重要维度, 为理解旋臂形成和演化机制提供了独特视角。

4 总结与展望

几百年来,科学家们从简单到复杂,从整体到细节,孜孜不倦地绘制着银河系的图像。本文系统梳理了银河系旋臂结构研究的历史脉络与最新进展,表 1 总结了该领域具有里程碑意义的重要研究成果。纵观研究历程,银河系结构的每一次重大认知突破都与观测技术的革新密不可分:射电天文学的发展首次揭示了银河系的全貌,高精度天体测量技术的突破实现了旋臂结构的精确刻画,而多波段海量观测数据的积累则使我们得以描绘出越来越精细的旋臂特征。这些技术进步共同推动着人类对银河系结构的认知不断深化。

表 1 银河系旋臂结构研究的大事记

作者	年份	数据	主要贡献
Alexander ^[1]	1852	—	提出银河系具有旋涡结构假说
Hubble ^[37]	1926	—	彻底解决银河系大小之争
Lindblad ^[39]	1927	—	建立银河系运动学模型
Morgan 等人 ^[4, 5]	1952	大质量恒星	首次发现银河系存在旋臂结构
Oort 等人 ^[6]	1958	HI	首次完整描绘银河系结构
Georgelin 等人 ^[8]	1976	HII 区	提出经典的银河系四旋臂模型
Xu 等人 ^[18]	2006	脉泽	彻底解决英仙臂位置的长期争论
Levine 等人 ^[16]	2006	HI	将银河系旋臂描绘至距离银心约 25 kpc 处
Churchwell 等人 ^[103]	2009	红团簇星	老年恒星只有两条主旋臂而非四旋臂
Xu 等人 ^[31]	2013	脉泽	首次发现本地臂
Sun 等人 ^[84]	2015	CO	将银河系旋臂结构拓展至距银心约 20 kpc 处
Reid 等人 ^[21]	2019	脉泽	绘制完整的银河系四旋臂结构
Xu 等人 ^[32]	2023	脉泽/OB 星/星团	首次提出银河系是一个“内两臂、外多臂”的旋涡星系

通过对银河系旋臂结构研究历程的梳理,我们发现不同旋臂示踪天体各具特色,为理解银河系结构提供了多维度的研究视角。随着观测数据的不断积累和研究方法的持续创新,该领域已呈现出研究内容日益深化、技术手段日趋多样的发展态势。各类示踪天体在研究中的独特贡献可归纳如下:原子和分子气体凭借其高灵敏度优势,在拓展银河系旋臂结构的观测尺度方面发挥着关键作用;OB 星和 HII 区的数量优势,主要贡献于旋臂细节特征的描绘和模型完善;大质量恒星形成区脉泽凭借精确的距离测量能力,在构建银河系旋臂结构的精确三维图像方面具有不可替代的作用;主序后星和星团的年龄优势为研究旋臂的长期演化过程提供了独特窗口;经典造父变星是一个很有前途的工具,可以补充基于其他旋臂示踪体的研究,将它们扩展到银河系的远端。除了传统示踪体之外,恒星的运动学参数、金属丰度、三维尘埃消光等也能够追踪旋臂的结构。这种多示踪体协同研究的范式,极大地推动了对银河系旋臂结构的全面认识。

银河系旋臂结构研究已发展出多种互补的示踪方法,虽然不同方法得到的结果存在一定差异,但主要研究范式可系统归纳为以下四类:(1)直接测距法。作为最可靠的旋臂示踪手段,该方法通过精确测定脉泽、造父变星等示踪天体的三角视差或光度距离,直接在银盘坐标系中构建其三维空间分布,从而描绘出最真实的旋臂结构特征。(2)运动学距离法。基

于银河系旋转曲线模型, 将 HI 气体或分子云等天体的视向速度转换为运动学距离。尽管受非圆周运动影响存在系统误差, 但该方法在远银心区域 (大于 10 kpc) 仍具有不可替代的作用。(3) 速度场分析法。利用 $l-v$ 空间内旋臂物质的特征速度分布模式, 通过示踪气体 (如 CO、HI) 或恒星的系统速度偏移来识别旋臂结构, 这种方法对研究银河系大尺度动力学和旋臂稳定性具有重要意义。(4) 旋臂切点统计法。基于视线方向与旋臂相切时物质柱密度增大的原理, 通过分析天体 (如红团簇星、HII 区) 在银经方向的数密度分布来定位旋臂切点。该方法特别适用于内银河区域旋臂结构的探测。这些方法各具优势: 直接测距法精度最高, 但受距离限制; 运动学距离法范围最广, 但系统误差较大; 速度场分析法擅长示踪气体动力学特征; 切点统计法则对旋臂方位角约束最佳。现代研究往往需要多方法交叉验证, 以全面揭示银河系旋涡结构的真实面貌。

由于太阳系位于银盘内部, 这一特殊位置严重限制了我们对银河系整体结构的观测, 导致其旋臂结构的完整图像至今仍不明确。目前学界提出的旋臂模型已经超过百种^[114], 但尚未达成共识。主流模型仍是 Georgelin 等人^[8]于 1976 年提出的四旋臂模型, 该模型虽在银河系内得到广泛验证, 但河外星系的观测表明, 此类结构极其罕见^[33, 115, 116]。Xu 等人^[32]提出的“内二外多”旋臂模型 (内部两条旋臂, 外部多旋臂) 已经获得了多项观测证据支持^[69, 70, 113], 且与河外星系研究的多旋臂星系结构特征一致^[117, 118]。这一发现促使我们重新思考“银河系特殊吗?” 这个问题被 Science 列为前沿科学的重要问题。

在局部结构方面, 太阳系邻近区域的旋臂特征研究已取得重要进展。多种示踪手段均证实了英仙臂、本地臂和人马臂的存在, 但在细节特征上仍存在诸多争议。老年恒星^[80]与 HII 区^[79]示踪的本地臂结构是否存在偏移; 英仙臂在第二象限的断裂现象^[119]; 本地臂与英仙臂是否分别处于形成和消亡阶段^[120]。这些争议问题反映了当前研究的深度和复杂性。

除旋臂形态外, 本文未探讨的旋臂形成与演化机制也是旋臂研究中的关键问题。银河系旋臂究竟是符合密度波理论预测的长周期结构, 还是具有瞬态特性? 运动学特征能否为旋臂演化研究提供新视角? 恒星金属丰度分布又能否开辟新的研究途径? 这些问题都需要更深入的观测和理论研究来解答。

值得期待的是, 新一代观测设施的建设将极大推动研究进展: 中国已建成的 FAST 望远镜和规划中的 FAST 阵列、北美的下一代甚长基线干涉阵 (ngVLA), 以及位于南非与澳大利亚的平方公里阵列 (SKA) 等, 都将在未来十年内陆续投入使用。这些设施的超高分辨率和超高定位精度, 将帮助天文学家们突破现有观测限制, 最终揭开银河系旋臂结构的“庐山真面目”。随着观测技术的进步和理论研究的深入, 我们对银河系这一“家园星系”的认识必将迎来新的飞跃。

参考文献:

- [1] Alexander S. AJ, 1852, 2: 97
- [2] Easton C. ApJ, 1900, 12: 136
- [3] Easton C. ApJ, 1913, 37: 105
- [4] Morgan W W, Sharpless S, Osterbrock D. AJ, 1952, 57: 3

- [5] Morgan W W, Whitford A E, Code A D. *ApJ*, 1953, 118: 318
- [6] Oort J H, Kerr F J, Westerhout G. *MNRAS*, 1958, 118: 379
- [7] Oort J H. *IAU Symposium*, 1959, 9: 416
- [8] Georgelin Y M, Georgelin Y P. *A&A*, 1976, 49: 57
- [9] Downes D, Wilson T L, Bieging J, et al. *A&AS*, 1980, 40: 379
- [10] Caswell J L, Haynes R F. *A&A*, 1987, 171: 261
- [11] Taylor J H, Cordes J M. *ApJ*, 1993, 411: 674
- [12] Russeil D. *A&A*, 2003, 397: 133
- [13] Paladini R, Davies R D, De Zotti G. *MNRAS*, 2004, 347(1): 237
- [14] Cohen R S, Cong H, Dame T M, et al. *ApJL*, 1980, 239: L53
- [15] Cohen R S, Grabelsky D A, May J, et al. *ApJL*, 1985, 290: L15
- [16] Levine E S, Blitz L, Heiles C. *Science*, 2006, 312(5781): 1773
- [17] Koo B C, Park G, Kim W T, et al. *PASP*, 2017, 129(979): 094102
- [18] Xu Y, Reid M J, Zheng X W, et al. *Science*, 2006, 311(5757): 54
- [19] Reid M J, Menten K M, Zheng X W, et al. *ApJ*, 2009, 700(1): 137
- [20] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. *ApJ*, 2014, 783(2): 130
- [21] Reid M J, Menten K M, Brunthaler A, et al. *ApJ*, 2019, 885(2): 131
- [22] Xu Y, Bian S B, Reid M J, et al. *A&A*, 2018, 616: L15
- [23] Chen B Q, Huang Y, Hou L G, et al. *MNRAS*, 2019, 487(1): 1400
- [24] Xu Y, Hou L G, Bian S B, et al. *A&A*, 2021, 645: L8
- [25] Dias W S, Lépine J R D. *ApJ*, 2005, 629(2): 825
- [26] Camargo D, Bica E, Bonatto C. *MNRAS*, 2013, 432(4): 3349
- [27] Hao C J, Xu Y, Hou L G, et al. *A&A*, 2021, 652: A102
- [28] Opolski A. *Acta Astron*, 1988, 38: 375
- [29] Majaess D J, Turner D G, Lane D J. *MNRAS*, 2009, 398(1): 263
- [30] Dambis A K, Berdnikov L N, Efremov Y N, et al. *Astronomy Letters*, 2015, 41(9): 489
- [31] Xu Y, Li J J, Reid M J, et al. *ApJ*, 2013, 769(1): 15
- [32] Xu Y, Hao C J, Liu D J, et al. *ApJ*, 2023, 947(2): 54
- [33] Wei J, Xu Y, Lin Z, et al. *AJ*, 2024, 168(6): 264
- [34] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. *A&A*, 2016, 595: A1
- [35] Jiang P, Chen R, Gan H, et al. *Astronomical Techniques and Instruments*, 2024, 1(2): 84
- [36] Shapley H, Curtis H D. *Bulletin of the National Research Council*, 1921, 2(11): 171
- [37] Hubble E P. *ApJ*, 1926, 63: 236
- [38] Trumpler R J. *Lick Observatory Bulletin*, 1930, 420: 154
- [39] Lindblad B. *MNRAS*, 1927, 87: 553
- [40] Oort J H. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1927, 3: 275
- [41] Oort J H. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1928, 4: 269
- [42] Jansky K. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 1932, 20(12): 1920
- [43] van de Hulst H C. *Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde*, 1945, 11: 210
- [44] Ewen H I, Purcell E M. *Nature*, 1951, 168(4270): 356
- [45] Binney J, Merrifield M. *Galactic Astronomy*. Princeton: Princeton University Press, 1998: 15
- [46] Christiansen W N, Hindman J V. *Australian Journal of Scientific Research A Physical Sciences*, 1952, 5: 437
- [47] van de Hulst H C, Muller C A, Oort J H. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1954, 12: 117
- [48] Kerr F J, Hindman J V, Carpenter M S. *Nature*, 1957, 180(4588): 677
- [49] Westerhout G. *Bull Astron Inst Netherlands*, 1957, 13: 201
- [50] van de Hulst H C. *Reviews of Modern Physics*, 1958, 30(3): 913
- [51] Kraft R P, Schmidt M. *ApJ*, 1963, 137: 249
- [52] Becker W. *ZAp*, 1963, 57: 117
- [53] Becker W. *IAU Symposium*, 1964, 20: 16

- [54] Fernie J D. *AJ*, 1968, 73: 995
- [55] Bania T M. *ApJ*, 1977, 216: 381
- [56] Myers P C, Dame T M, Thaddeus P, et al. *ApJ*, 1986, 301: 398
- [57] Dame T M, Elmegreen B G, Cohen R S, et al. *ApJ*, 1986, 305: 892
- [58] Solomon P M, Sanders D B, Rivolo A R. *ApJL*, 1985, 292: L19
- [59] Grabelsky D A, Cohen R S, Bronfman L, et al. *ApJ*, 1988, 331: 181
- [60] Bronfman L. In: Blitz L, ed. *The Center, Bulge, and Disk of the Milky Way*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992: 131
- [61] Bronfman L, Cohen R S, Alvarez H, et al. *ApJ*, 1988, 324: 248
- [62] Alvarez H, May J, Bronfman L. *ApJ*, 1990, 348: 495
- [63] Beuermann K, Kanbach G, Berkhuijsen E M. *A&A*, 1985, 153: 17
- [64] Janes K, Adler D. *ApJS*, 1982, 49: 425
- [65] Lynga G. *A&A*, 1982, 109: 213
- [66] Xu Y, Zheng X W, Jiang D R. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2003, 3(1): 49
- [67] Xu Y, Reid M, Dame T, et al. *Science Advances*, 2016, 2(9): e1600878
- [68] Elmegreen D M, Elmegreen B G. *ApJ*, 2014, 781(1): 11
- [69] Bian S B, Wu Y W, Xu Y, et al. *AJ*, 2024, 167(6): 267
- [70] Nakanishi H, Sakai N, Kurahara K, et al. In: Hirota T, Imai H, Menten K, et al, eds. *Cosmic Masers: Proper Motion Toward the Next-Generation Large Projects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2024: 97
- [71] Gaia Collaboration, Brown A G A, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 616: A1
- [72] Reed B C. *AJ*, 2003, 125(5): 2531
- [73] Poggio E, Drimmel R, Cantat-Gaudin T, et al. *A&A*, 2021, 651: A104
- [74] Gaia Collaboration, Drimmel R, Romero-Gómez M, et al. *A&A*, 2023, 674: A37
- [75] Liu D, Xu Y, Hao C, et al. *ApJS*, 2023, 268(2): 46
- [76] Ge Q A, Li J J, Hao C J, et al. *AJ*, 2024, 168(1): 25
- [77] Hou L G, Han J L, Shi W B. *A&A*, 2009, 499(2): 473
- [78] Hou L G, Han J L. *A&A*, 2014, 569: A125
- [79] Shen X J, Hou L G, Liu H L, et al. *A&A*, 2025, 696: A67
- [80] Lin Z, Xu Y, Hou L, et al. *ApJ*, 2022, 931(1): 72
- [81] Dame T M, Thaddeus P. *ApJL*, 2008, 683(2): L143
- [82] Roman-Duval J, Jackson J M, Heyer M, et al. *ApJ*, 2009, 699(2): 1153
- [83] Dame T M, Thaddeus P. *ApJL*, 2011, 734(1): L24
- [84] Sun Y, Xu Y, Yang J, et al. *ApJL*, 2015, 798(2): L27
- [85] Su Y, Yang J, Zhang S, et al. *ApJS*, 2019, 240(1): 9
- [86] Sun Y, Yang J, Zhang S, et al. *ApJL*, 2024, 977(2): L35
- [87] Du X, Xu Y, Yang J, et al. *ApJS*, 2016, 224(1): 7
- [88] Du X, Xu Y, Yang J, et al. *ApJS*, 2017, 229(2): 24
- [89] Vázquez R A, May J, Carraro G, et al. *ApJ*, 2008, 672(2): 930
- [90] Cantat-Gaudin T, Jordi C, Vallenari A, et al. *A&A*, 2018, 618: A93
- [91] Cantat-Gaudin T, Anders F. *A&A*, 2020, 633: A99
- [92] Dias W S, Monteiro H, Moitinho A, et al. *MNRAS*, 2021, 504(1): 356
- [93] Liu L, Pang X. *ApJS*, 2019, 245(2): 32
- [94] Hao C J, Xu Y, Wu Z Y, et al. *A&A*, 2022, 660: A4
- [95] He Z, Luo Y, Wang K, et al. *ApJS*, 2023, 267(2): 34
- [96] Dias W S, Monteiro H, Lépine J R D, et al. *MNRAS*, 2019, 486(4): 5726
- [97] Castro-Ginard A, McMillan P J, Luri X, et al. *A&A*, 2021, 652: A162
- [98] Skowron D M, Skowron J, Mróz P, et al. *Science*, 2019, 365(6452): 478
- [99] Minniti J H, Zoccali M, Rojas-Arriagada A, et al. *A&A*, 2021, 654: A138
- [100] Lemasle B, Lala H N, Kovtyukh V, et al. *A&A*, 2022, 668: A40
- [101] Funakoshi N, Matsunaga N, Kawata D, et al. *MNRAS*, 2024, 533(4): 4324

- [102] Trentin E, Catanzaro G, Ripepi V, et al. *A&A*, 2024, 690: A246
- [103] Churchwell E, Babler B L, Meade M R, et al. *PASP*, 2009, 121(877): 213
- [104] Vallée J P. *ApJS*, 2014, 215(1): 1
- [105] Hou L G, Han J L. *MNRAS*, 2015, 454(1): 626
- [106] Palicio P A, Recio-Blanco A, Poggio E, et al. *A&A*, 2023, 670: L7
- [107] Denyshchenko S I, Fedorov P N, Akhmetov V S, et al. *MNRAS*, 2024, 527(1): 1472
- [108] Poggio E, Recio-Blanco A, Palicio P A, et al. *A&A*, 2022, 666: L4
- [109] Hawkins K. *MNRAS*, 2023, 525(3): 3318
- [110] Hackshaw Z, Hawkins K, Filion C, et al. *ApJ*, 2024, 977(2): 143
- [111] Leung H W, Bovy J. *MNRAS*, 2019, 483(3): 3255
- [112] Barbillon M, Recio-Blanco A, Poggio E, et al. *A&A*, 2025, 693: A3
- [113] Viscasillas Vázquez C, Magrini L, Spitoni E, et al. <https://arxiv.org/abs/2504.16905>, 2025
- [114] Steiman-Cameron T Y. In: Block D L, Freeman K C, Puerari I, eds. *Galaxies and their Masks*. New York: Springer, 2010: 45
- [115] Hart R E, Bamford S P, Willett K W, et al. *MNRAS*, 2016, 461(4): 3663
- [116] Sellwood J A, Masters K L. *ARA&A*, 2022, 60: 73
- [117] Ann H B, Lee H R. *Journal of Korean Astronomical Society*, 2013, 46(3): 141
- [118] Smith B J, Watson M, Giroux M L, et al. *AJ*, 2024, 168(1): 12
- [119] Cantat-Gaudin T, Krone-Martins A, Sedaghat N, et al. *A&A*, 2019, 624: A126
- [120] Liu X, He Z, Luo Y, et al. *MNRAS*, 2025, 537(3): 2403

Research Progress of the Spiral Structure of the Milky Way

XU Ye¹, LIU Dejian^{2,3}

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 2. College of Mathematical and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Center for Astronomy and Space Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The spiral structure of the Milky Way represents one of the fundamental research topics in astronomy, posing a long-standing challenge. This paper provides a systematic review of the historical and recent advances in our understanding of the Galactic spiral structure. Over the past two centuries, our comprehension has undergone transformative advances-progressing from initial speculative models to direct observational evidence, and from mapping local arm segments in the solar neighborhood to reconstructing the global spiral architecture of the Milky Way. The spiral arms of the Milky Way exhibit complex morphological characteristics; while the four-arm and two-arm models continue to be debated on global scales, the broad arrangement of nearby arms has been largely established, though detailed properties often show discrepancies among different studies. New techniques such as kinematic parameter analysis and measurements of stellar chemical abundances are offering novel avenues for investigating spiral structure.

Key words: Milky Way; spiral arm; VLBI; Gaia