

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.04.04

# 银河系光学和红外巡天进展

钟 靖<sup>1,2</sup>, 侯金良<sup>1</sup>, 沈世银<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台 星系与宇宙学重点实验室, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 综述了银河系光学和红外巡天的多种观测计划, 主要介绍了巡天望远镜的基本参数、巡天的目的和任务、巡天的科学预期和产出, 以及巡天计划的特点和意义等。其中, 测光巡天方面主要包括 SSS 巡天, 2MASS, UKIDSS, IPHAS, XSTPS 和 SDSS/SEGUE 测光巡天等计划; 光谱巡天方面主要包括 RAVE, SEGUE 光谱巡天, APOGEE, LEGUE 和 HERMES 共 5 个计划。此外, 还介绍了将对银河系研究领域产生深远影响的 GAIA 巡天和 LSST 巡天, 以及 WEAVE, 4MOST 和 MOONS 这 3 个作为对 GAIA 计划进行补充的地基巡天项目。

**关键词:** 光谱巡天; 测光巡天; 银河系天文学; 望远镜

**中图分类号:** P156      **文献标识码:** A

## 1 引 言

自远古时代, 人类就开始关注横贯在夜空中的银河, 东西方古文明中都有对银河进行大量描述的记录, 相关的神话传说也不计其数。但是, 人类对银河的科学认识是在使用望远镜后才开始的。17 世纪初, 伽利略第一次用自制的单筒望远镜观测了银河, 发现银河其实是由无数的恒星组成。18 世纪, 英国天文学家威廉·赫歇尔开创了银河系天文学, 他使用自制的望远镜对银河系恒星进行了大规模计数, 最终得出了银河系是一个扁平的盘状结构, 太阳处于银河系中心的结论。1918 年, 美国天文学家沙普利通过对银河系球状星团的研究, 发现太阳不处于银河系中心。1922 年, 哈勃通过确定星云 M31 中造父变星的距离, 结束了关于星云的世纪大争论, 证明 M31 星云是河外天体, 将宇宙的尺度扩大到银河系之外, 银河系只是宇宙众多星系中的普通一员。人类对银河系认识的一次次飞跃都和天文观测密不可分, 天文观测是一切天文学研究的基石。

现在人们认识到, 银河系是一个盘星系, 主要分为银盘、核球、银晕、银冕 4 个部分。银河系的主体是一个扁平的恒星盘, 半径约为 15 ~ 20 kpc, 主要由大量的恒星、气体和尘埃组成。银盘上存在着大尺度的旋臂结构, 目前已知的旋臂有: 人马臂、英仙臂、猎户臂和 3 kpc

收稿日期: 2013-04-25; 修回日期: 2013-05-16

资助项目: 国家自然科学基金 (11173044, 10833005); 创新群体项目 (11121062)

臂。根据组成的星族成分和标高的不同, 银盘还可以分为薄盘和厚盘: 在银面距 1 kpc 的范围以内为薄盘, 主要由富金属的年轻恒星构成, 标高约为 100 ~ 300 pc; 在银面距 1 ~ 5 kpc 的范围内为厚盘, 主要由贫金属的年老恒星构成, 标高约为 800 ~ 1300 pc<sup>[1]</sup>。银河系的核球位于银河系中心, 半径约 2.5 kpc, 是恒星和星际物质的密集区域, 具有明显的棒状结构<sup>[2]</sup>, 棒长约 3.5 kpc, 其中心存在着超大质量黑洞<sup>[3]</sup>。银河系的厚盘外围是近似为球形的银晕, 半径约 50 kpc, 其中恒星和星际介质的密度很低, 主要分布着大量年老的球状星团。此外, 现代观测表明, 银河系的恒星晕外围还存在着主要由等离子体气体构成, 分布更为延展的银冕。

但是, 银河系天文学研究仍然存在着很多尚未解决的问题, 如银河系的大尺度结构和子结构<sup>[5]</sup>、银河系各个组成部分的形成历史<sup>[6]</sup>、银河系整体的化学演化历史<sup>[7]</sup>、银河系和周围矮星系的相互作用情况<sup>[8]</sup>、银河系中暗物质晕的分布情况<sup>[9]</sup>等。对这些问题的深入研究, 都需要利用大样本恒星的运动学、动力学和物理化学等信息。与传统的望远镜观测计划相比较, 现代大规模巡天计划能够在相对较短的时间内获取大量的天体观测数据, 使得对银河系结构和演化进行全面的成为可能。

银河系中大部分重子质量都是以恒星的形式体现, 光学辐射是大部分恒星的主要辐射波段。因此, 在探索和研究银河系的结构和演化方面, 光学波段的观测一直是最重要的观测手段之一, 也是迄今为止发展得最为成熟的一种观测手段。通过光学观测, 人们可以直接或间接地得到恒星的亮度、颜色、位置、速度、质量和金属丰度等一系列重要的物理参数, 进而认识和理解恒星本身性质及其所处的星际环境、银河系的整体结构和演化历史等。但是, 银河系特别是银盘上存在大量的星际气体和尘埃物质, 星际消光非常严重, 很难通过单一光学观测全面了解到银河系盘的真实结构和物理状态。由于红外辐射几乎不受星际消光的影响, 因此, 在研究银河系盘特别是银心方向的盘和核球的结构方面红外巡天观测具有光学观测无法比拟的巨大优势, 成为人类进一步认识和研究银河系结构的重要手段。

天文学家对银河系恒星的观测主要集中在光学和红外两个波段, 根据观测手段的不同又可以分为测光观测和光谱观测两种。测光观测是直接对天体进行成像观测, 通过望远镜的透镜原理聚焦成像得到天体的二维积分图像, 进而通过数据处理得到天体的坐标、自行、视差、亮度和颜色等天体测量的相关信息。光谱观测是利用棱镜或光栅等色散系统的分光原理, 将由天体辐射的复色光分解成单一波长(或频率)的单色光, 并能按照光的波长(或频率)大小依次排列, 被终端探测设备记录而最终得到天体的能谱分布(spectral energy distribution, 简称 SED)。通过对观测到的光谱数据的分析处理, 天文学家可以得到天体的视向速度, 金属丰度, 以及表面重力加速度等重要的物理参量, 帮助人们更加全面地认识和理解所观测到的天体及其物理性质。

早期对银河系恒星的大规模巡天工作主要是光学波段的观测, 1960 年, Palomar 天文台完成了 POSS-I (Palomar National Geographic Society Sky Survey) 巡天计划, 它使用蓝 (B) 红 (R) 两种底片对  $-33^\circ < \delta < 90^\circ$  的北半球 879 个天区进行了成像观测, 极限星等分别达到 21 mag 和 20 mag。南半球的著名巡天项目是通过坐落在澳大利亚的 UK 施密特望远镜 (United Kingdom Schmidt Telescope, 简称 UKST) 完成的, 它始建于 20 世纪 70 年代, 覆盖天区为  $-90^\circ < \delta < -17^\circ$ , 极限星等达到 23 mag (B 波段) 和 22 mag (R 波段)。此外, 利用 UKST 还开

展了物端棱镜的光谱巡天工作<sup>[11]</sup>。首次大规模红外巡天来自于 IRAS (Infrared Astronomical Satellite) 天文卫星的中远红外观测项目, 它分别使用 12, 25, 60 和 100  $\mu\text{m}$  这 4 个波段对全天 96% 的天区进行巡天观测, 并于 1983 年完成了人类历史上首张详细的红外星空图, 探测到了超过 250 000 个红外天体源, 开创了红外巡天观测的新时代<sup>[12]</sup>。

20 世纪 90 年代以来, 国内外在研究银河系结构和演化方面已开展一系列重要的光学/红外巡天项目, 其巡天的规模和数据的质量都是之前的项目无法比拟的。随着巡天计划的推进和观测数据的释放, 人类对银河系的研究正在逐渐深入, 对银河系的认识也逐渐变得清晰和全面。目前, 规模较大的银河系测光巡天计划主要有 SSS 巡天、2MASS 巡天、UKIDSS 巡天、IPHAS 巡天、XSTPS 巡天、SEGUE 测光巡天等; 著名的大规模银河系光谱巡天计划主要有 RAVE 巡天、SEGUE 光谱巡天、APOGEE 巡天、LEGUE 巡天、HERMES 巡天等; 下一代的大规模巡天计划有 GAIA 计划、WEAVE 计划、4MOST 计划、MOONS 计划和 LSST 计划等。

## 2 测光巡天计划

### 2.1 SSS 巡天

SSS 巡天<sup>①</sup>(SuperCOSMOS Sky Surveys) 使用一台 SuperCOSMOS 机器, 对早期的多个施密特望远镜巡天底片进行了数字化处理, 最终产生了一个包含天体测量信息和测光信息的全天星表。SSS 巡天所使用的底片数据主要包括: UK 施密特望远镜在蓝、红、近红外波段 (B、R、I) 的南天半球巡天数据, Palomar-II Oschin 施密特望远镜在蓝、红、近红外波段 (B、R、I) 的北天半球巡天数据, 以及可以用做不同历元研究的 ESO 施密特望远镜在南天半球的红波段 (R) 巡天数据和 Palomar-I Oschin 施密特望远镜在北天半球的红波段 (R) 巡天数据。通过对早期巡天数据的底片数字化处理, SSS 巡天的极限星等为  $B \approx 22 \text{ mag}$ ,  $R \approx 20 \text{ mag}$ ,  $I \approx 19 \text{ mag}$ , 巡天星表的坐标误差  $\sigma_{\alpha, \delta} \approx 0.3''$ , 自行误差  $\sigma_{\mu} \approx 0.01''/\text{a}$ , 测光误差  $\sigma_{B,R,I} \approx 0.3 \text{ mag}$ <sup>[13]</sup>。

SSS 巡天在银河系研究方面取得了一系列重要的发现: Xu 等人基于 SDSS 和 SSS 的数据, 利用恒星计数的方法研究了高银纬银晕的结构特征, 发现在北银冠天区恒星分布的涨落具有不对称性, 其中 B 波段的不对称性为  $(16.9 \pm 6.3)\%$ , R 波段的不对称性为  $(13.5 \pm 6.7)\%$ , 而这种不对称性的涨落在南银冠天区却没有出现<sup>[14]</sup>。Hambly 等人利用 SSS 巡天数据在南天极附近找到了 5 颗自行在  $1.0''/\text{a}$  到  $2.6''/\text{a}$  的高自行星, 并通过 Ks 绝对星等和颜色的关系估计了这 5 颗恒星的距离, 发现其中 2 颗为太阳系 10 pc 以内的红矮星, 1 颗为距离在 15 ~ 25 pc 的白矮星<sup>[15]</sup>。Bowell 等人利用 SSS 巡天数据制作了一个包含了 10 000 颗白矮星候选体, 极限星等  $R \approx 19.75 \text{ mag}$ , 最小自行  $0.05''/\text{a}$  的白矮星星表, 并进一步研究了银河系厚盘、薄盘以及银晕中的白矮星光度函数<sup>[16]</sup>。

SSS 巡天虽然探测深度和数据质量都相比现在的 CCD 巡天有一定的差距, 但是凭借对

<sup>①</sup><http://www-wfau.roe.ac.uk/ss/>

全天的大范围天区覆盖, 仍然是目前银河系巡天数据中的重要组成部分, 能够为银河系测光巡天提供完整的参考星表, 具有很高的实用价值。此外, 由于 SSS 巡天所使用的数据包含了不同历元的观测, 因而也是进行恒星自行测量和变星光变研究的理想星表。

## 2.2 2MASS 巡天

2MASS 计划<sup>①</sup>(The Two Micron Sky Survey) 的主要任务是通过近红外观测得到全天的多波段数字星图, 从而开展银河系的大尺度结构以及本地宇宙的构成等相关研究工作。巡天开始于 1997 年, 完成于 2001 年。通过使用安装在南北半球的两台 1.3 m 的近红外自动望远镜, 对全天进行了 J (1.25  $\mu\text{m}$ ), H (1.65  $\mu\text{m}$ ), Ks (2.17  $\mu\text{m}$ ) 3 个波段的近红外成像观测, 其观测点源的极限星等分别为 15.8, 15.1, 14.3 mag, 空间分辨率约为 4", 一共记录了约  $5 \times 10^8$  颗恒星和其他点源的精确位置和多色红外星等<sup>[17]</sup>。

2MASS 巡天在银河系研究方面的主要进展有: Roeser 等人将 USNO-B1.0 和 2MASS 星表进行并合, 得到了现在仍然被广泛使用的 PPMXL 星表, 这个星表记录了全天  $9 \times 10^8$  个天体的天体测量信息, 其中约  $4 \times 10^8$  个天体具有 2MASS 测光信息<sup>[18]</sup>; 利用 2MASS 的测光数据, Nishiyama 等人求得了在银河系中心方向的近红外星际消光率<sup>[19]</sup>; Lombardi 等人求得了在半人马座 (Taurus)、英仙座 (Perseus) 和白羊座 (Aries) 三个方向的银河系星际消光图<sup>[20]</sup>。银河系消光的研究为正确认识银河系提供了基础。此外, 2MASS 巡天还观测到了很多重要的稀有天体, 如极冷的低质量星 (L 矮星, 褐矮星)<sup>[21-23]</sup>, 银河系盘上的球状星团<sup>[24, 25]</sup> 等。

2MASS 巡天是第一个对全天区域进行近红外成像观测的巡天项目。出于对银河系盘上尘埃消光因素的考虑, 它使用了近红外的 3 个波段, 观测到了银河系盘上的大量恒星。相对于第谷星表<sup>[26]</sup> (Tycho Catalog), 2MASS 记录到了更多的暗星, 并能给出较精确的坐标和星等信息, 为后续的银河系巡天计划提供了重要的参考星表。但是, 由于望远镜口径的限制, 相对于目前部分光学巡天计划 2MASS 巡天的深度还是太浅, 很难作为光学巡天在红外波段的补充星表。

## 2.3 UKIDSS 巡天

UKIDSS<sup>②</sup> (UKIRT 红外深场巡天计划, UKIRT Infrared Deep Sky Survey) 是一个比 2MASS 更深的近红外巡天计划, 开始于 2005 年, 完成于 2012 年。UKIDSS 巡天利用安装在夏威夷的英国红外望远镜 (The United Kingdom Infra-Red Telescope, 简称 UKIRT) 上的 WFCAM 宽场照相机, 对银河系约 3000 平方度的天区域进行了近红外巡天观测, 其极限星等比 2MASS 暗约 3 mag<sup>[27]</sup>。

UKIDSS 巡天主要包括 5 个部分, 其中 2 个部分是与银河系相关的巡天项目: 银河系盘巡天 (Galactic Plane Survey, 简称 GPS) 和银河系星团巡天 (Galactic Clusters Survey, 简称 GCS)。

GPS 巡天<sup>[29]</sup> 对约 1800 平方度的低银纬天区 ( $-5^\circ < b < +5^\circ$ ) 进行 J (1.17 ~ 1.33  $\mu\text{m}$ ), H (1.49 ~ 1.78  $\mu\text{m}$ ), K (2.03 ~ 2.37  $\mu\text{m}$ ) 共 3 个波段的近红外观测, K 波段极限星等达到 18.8 mag,

<sup>①</sup><http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>

<sup>②</sup><http://www.ukidss.org/>

并对其中约 200 平方度的分子云区域重复进行窄带  $H_2$  ( $2.111 \sim 2.132 \mu\text{m}$ ) 成像观测。GPS 巡天的主要目标包括：得到银盘恒星的分布图；研究不同星际环境中的恒星形成和初始质量函数；搜寻银河系中 X 射线源的对应天体；研究 AGB 星，行星状星云，褐矮星等特殊天体。

GCS 巡天对 10 个疏散星团所在区域共约 1400 平方度的天区进行了 Z, Y, J, H, K 共 5 个波段的成像观测，K 波段极限星等达到了 18.6 mag。GCS 巡天的主要目标包括：测量在亚恒星端 (sub-stellar regime) 的质量函数，建立统一的初始质量函数，找到导致星团存在差异的因素。

UKIDSS 巡天在银河系研究方面取得了一系列重要的研究进展：Warren 等人在 UKIDSS 第一次释放的数据中发现了一颗极冷的褐矮星 ULAS J0034-00，并且和一颗 T8 的褐矮星进行了对比，发现 ULAS J0034-00 的温度更低，有效温度在 600 K 到 700 K 之间；极冷褐矮星的发现增强了人们对这种介于最小质量恒星和最大质量行星之间的过渡天体的认识<sup>[30]</sup>。Lodieu 等人基于 GCS 数据在昴星团 (Pleiades) 中用自行的判断方法找到了 340 颗成员星，发现在 63 个褐矮星样本中有 23 个存在着多体系统，并估计出在昴星团的低质量端 ( $0.030 \sim 0.075 M_{\odot}$ ) 双星比例约为 28% ~ 44%；这一比例大大高于之前对于昴星团中低质量双星比例的估计，为疏散星团低质量端的初始质量函数给出了重要的限制<sup>[31]</sup>。Cabrera-Lavers 等人使用 GPS 巡天数据中的红团簇星 (red clump) 作为示踪天体，发现银河系盘上存在着明显不同的两种结构：银河系的核球和银河系的棒结构；这一发现再次证实了银河系棒结构的真实存在<sup>[32]</sup>。此外，在探测 L 矮星和 T 矮星方面，UKIDSS 巡天也做出了重要的贡献<sup>[28, 44-47]</sup>，具体结果如图 1 所示。

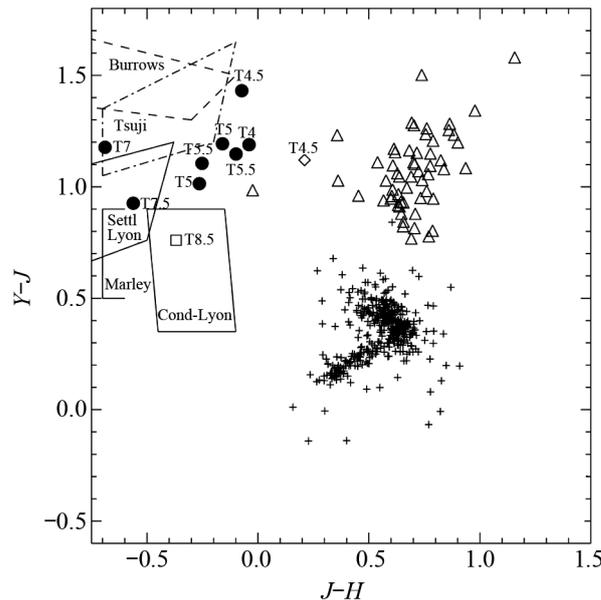


图 1 UKIDSS ( $Y - J, J - H$ ) 测光颜色图<sup>[46]</sup>

黑色实心圆点为已经被认证的 T 矮星；空心三角形表示在 UKIDSS 巡天中找到的 L 和 T 型矮星的候选体，需要进一步的光谱认证；黑色十字为 WFCAM 一次观测中所得到的其他类型恒星；方框为多种模型预言的褐矮星分布区域。

UKIDSS 巡天可以看做是 2MASS 巡天的后继项目, 它虽然没有像 2MASS 那样进行全天巡视, 但比 2MASS 更深的极限星等使其能够探测到更多暗弱的天体, 可以有针对性地开展对银河系暗弱天体的发现和研究工作。

## 2.4 IPHAS 巡天

IPHAS 巡天计划<sup>①</sup>(The INT/WFC Photometric H $\alpha$  Survey of the Northern Galactic Plane) 使用 2.5 m 口径的 Isaac Newton 望远镜 (INT) 和宽场照相机 (WFC), 对北银盘 1800 平方度的区域 ( $-5^\circ < b < +5^\circ$ ) 进行窄带 H $\alpha$ (中心波长 6568 Å) 和宽带  $r'$ (中心波长 6240 Å)、 $i'$ (中心波长 7743 Å) 一共 3 个波段的测光观测, 要求  $r'$  极限星等达到 20 mag( $10\sigma$ )<sup>[33]</sup>。IPHAS 巡天开始于 2003 年, 到 2008 年基本完成了将所有天区观测一次的目标。目前已经完成了 96% 天区的数据处理工作, 并计划近期全部释放这批数据。

IPHAS 在银河系研究中最重要贡献之一是确定了银河系的三维消光图。Sale 等人发展了一套 MEAD (Mapping the Extinction Against Distance) 算法, 可以基于测光数据, 计算 IPHAS 巡天中所有从早型 A 型到 K4 型主序星的内禀 ( $r' - i'$ ) 颜色、距离和消光值。由于 IPHAS 在银河系盘上巨大的样本数目和精确的测光信息, 通过并合在一定体积范围内单个恒星的消光值, 可以得到银河系北天银盘上任意方向、任意距离范围内的银河系整体消光, 构建银河系的三维消光图。在反银心方向, 消光的计算区域最远可以达到 10 kpc, 指向间隔最小为 10', 距离间隔最小为 0.1 kpc; 在银河系内盘区域, 由于红化十分严重, 消光的计算区域约为 2 kpc<sup>[51]</sup>。IPHAS 数据的另一研究热点是对特殊 H $\alpha$  发射线天体的搜寻和研究。由于辐射的物理环境各不相同, 不同类型的发射线天体具有不同的 H $\alpha$  流量, 因而可以用 ( $r' - M_{\text{H}\alpha}$ ,  $r' - i'$ ) 颜色判据来搜寻并区分。如图 2 所示, 各种类型的发射线天体在 IPHAS ( $r' - M_{\text{H}\alpha}$ ,  $r' - i'$ ) 颜色图上能很好地区分出来。对于 IPHAS 观测到的约  $8 \times 10^7$  个银河系点源天体, 通过其颜色 ( $r' - M_{\text{H}\alpha}$ ,  $r' - i'$ ) 判据可以搜寻并区分: 致密的行星状星云<sup>[34]</sup>, 快速演化的后 AGB 星<sup>[35-37]</sup> (post-AGB star), 各种类型的 Be 星, 超新星遗迹<sup>[38]</sup>, 具有发射线的 M 矮星<sup>[39]</sup> (dMe star), 年轻的低质量星团, 激变变星<sup>[40, 41]</sup> (cataclysmic variable), 各种类型的共生星<sup>[42]</sup> (symbiotic stars), 富氢的白矮星<sup>[43]</sup>, 以及大量靠近主序的 A 型星<sup>[48]</sup> 和 M 巨星等具有 H $\alpha$  发射线观测特征的天体<sup>[49]</sup>。通过对这些特殊天体的搜寻和分类, 将有助于天文学家更好地认识和研究组成银河系盘的星族成分, 并进一步用来追踪和探讨银盘的形成和演化。

IPHAS 巡天的特点在于对低银纬区域 ( $-5^\circ < b < +5^\circ$ ) 进行了测光观测, 并得到了银河系盘的三维消光图。这个区域因为恒星数密度太高, 且尘埃消光严重, 之前很少被光学巡天项目所观测。IPHAS 巡天还使用了窄带 H $\alpha$  滤光片进行观测, 对具有 H $\alpha$  发射线性质的特殊天体进行了专门的搜寻和研究, 这也是之前的宽带光学巡天很少涉及到的研究课题。

## 2.5 XSTPS-GAC 巡天

盱眙施密特望远镜反银心巡天<sup>②</sup>(Xuyi Schmidt Telescope Photometric Survey of the Galactic Anti-center, 简称 XSTPS-GAC), 使用紫金山天文台建于江苏省盱眙县的 1.04/1.2 m 反射式施

<sup>①</sup><http://www.iphas.org/>

<sup>②</sup>[kiaa.pku.edu.cn/DSSGAC/overview.html](http://kiaa.pku.edu.cn/DSSGAC/overview.html)

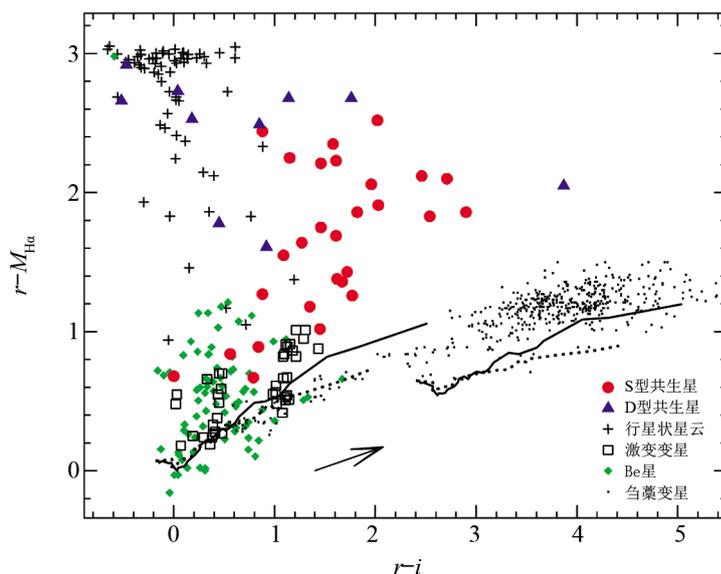


图2 IPHAS ( $r' - M_{\text{H}\alpha}$ ,  $r' - i'$ ) 测光颜色图<sup>[42]</sup>

由于  $\text{H}\alpha$  流量不同, 图中所示的共生星、行星状星云、激变变星、Be 星和白矮变星都被颜色图很好地区分开。

密特望远镜, 对  $3 \text{ h} \leq Ra \leq 9 \text{ h}$ ,  $-10^\circ \leq Dec \leq +60^\circ$  约 6000 平方度的反银心天区进行了和 Sloan 巡天相同的  $g'$ 、 $r'$ 、 $i'$  这三个波段的测光巡天工作, 图 3 中蓝色区域显示了巡天天区在天球上的分布情况。项目开始于 2009 年, 结束于 2011 年, 目前正在进行数据的处理和总结工作。盱眙施密特望远镜反银心巡天取得了约  $1 \times 10^8$  颗在反银心方向恒星的位置和测光信息的点源星表, 定位精度  $0.1''$ , 测光精度为 2%,  $10\sigma$  极限星等达到  $19 \text{ mag}$ <sup>[50]</sup>。

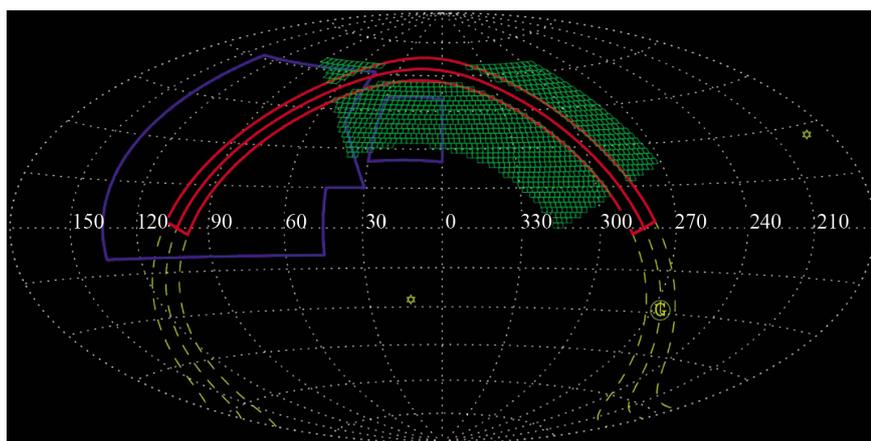


图3 盱眙施密特望远镜反银心巡天和低银纬巡天天区图(赤道坐标系)

蓝色区域为盱眙施密特望远镜反银心巡天天区, 其中赤经  $0^\circ \sim 30^\circ$  的小块区域为 M31/M33 的巡天天区; 绿色为盱眙施密特望远镜低银纬巡天天区; 红色为 IPHAS 巡天天区。黄色虚线为银道面在天球上的分布, 黄色 G 表示银河系中心所在的区域, 赤经  $15^\circ$  附近的黄色六角形为南银冠, 赤经  $190^\circ$  附近的黄色六角形为北银冠。

盱眙施密特望远镜反银心巡天是基于我国自主设备完成的首个大天区银河系测光巡天项目, 该项目的完成, 很好地满足了国家大科学工程郭守敬望远镜 (LAMOST) 银河系巡天在反银心方向的需求, 解决了 LAMOST 反银心方向光谱巡天输入星表的问题。利用该星表, 已完成了对 LAMOST 反银心方向所有巡天天区的选源工作。通过对选源结果的模拟研究表明, 反银心方向巡天样本在不同类型恒星比例、探测深度、完备性方面都达到了预期的效果。

## 2.6 XSTPS-LGL 巡天

盱眙施密特望远镜低银纬巡天 (Xuyi Schmidt Telescope Photometric Survey of the Low Galactic Latitude, 简称 XSTPS-LGL), 是在反银心巡天取得了成功的基础上即将开展的一个后继巡天计划, 将使用盱眙 1.04/1.2 m 反射式施密特望远镜对低银纬区域 ( $50^\circ < l < 150^\circ$ ,  $5^\circ < |b| < 20^\circ$ ) 约 3000 平方度的天区进行  $M_{\text{H}\alpha}$  窄带和  $u, v, b, y$  中带的测光巡天观测。巡天天区如图 3 所示, 绿色区域为低银纬巡天天区, 这个区域在反银心巡天天区 (蓝色) 的基础上向银河系中心方向延伸, 并很好地和 IPHAS 巡天天区 (红色) 进行了衔接, 确保了巡天天区覆盖的连续性。项目计划开始于 2013 年, 使用 2~3 a 时间对银河系低银纬天区进行多色测光观测, 将生成迄今独有的低银纬区域完备光学波段测光巡天星表, 要求各项巡天指标至少达到反银心巡天在现阶段的精度范围。

盱眙施密特望远镜低银纬巡天的测光数据 ( $M_{\text{H}\alpha}, u, v, b, y$ ) 将能够和 IPHAS 在银盘上的测光数据 ( $r, i, M_{\text{H}\alpha}$ ) 拼接起来, 形成一个在低银纬区域 ( $|b| < 20^\circ$ ) 连续的完整测光星表, 并且通过和 LAMOST 观测的光谱数据相结合, 将有能力在诸如银盘的运动学性质和动力学演化、恒星的形成和化学增丰历史、银河系三维消光分布、疏散星团性质、银河系外盘结构和性质、银河系自转曲线和暗物质分布等相关研究领域取得重要的进展和突破。

## 2.7 SDSS/SEGUE 测光巡天

Sloan 数字巡天计划<sup>①</sup>(Sloan Digital Sky Survey, 简称 SDSS) 是一个以河外星系的红移巡天为主的巡天项目, 但在银河系巡天观测方面也做了相当多的工作。它使用一架口径 2.5 m 的宽视场望远镜, 主要包括测光和光谱两种巡天观测模式。在测光观测中, SDSS 巡天使用了单幅图像曝光 54.1 s 的漂移扫描模式对  $u', g', r', i', z'$  共 5 个滤光片观测到的图像进行逐一扫描, 其 95% 完备的极限星等分别可以达到 22.0, 22.2, 22.2, 21.3, 20.5 mag, 整体测光精度达到 1% ~ 1.5%<sup>[61]</sup>。

SEGUE (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration) 是 SDSS 巡天中的一个针对银河系的巡天观测计划, 分为测光巡天和光谱巡天两大部分。测光巡天的主要任务是通过银河系恒星的大规模测光观测, 研究银河系晕中的子结构特征, 银盘上的恒星类型和星族成分, 并且能够为 SEGUE 光谱巡天提供选源依据和输入星表。

为了保证银河系薄盘、厚盘、恒星晕中的主要子结构能够被全面观测, SEGUE 测光巡天对北天半球银河系的多条较低银纬的带状天区和少量高银纬的带状天区 (共计 3500 平方度) 进行了测光观测。图 4 显示了测光巡天的天区分布, 其观测方向主要沿着银纬方向, 不同的带状天区沿银经分布, 且间距在低银纬区域不超过  $10^\circ$ , 高银纬区域不超过  $20^\circ$ , 每条观测带

<sup>①</sup><http://www.sdss.org/>

的宽度为  $2.5^\circ$ 。SEGUE 测光巡天的数据已经在第七次数据释放 (DR7) 中公布<sup>[66, 67]</sup>。

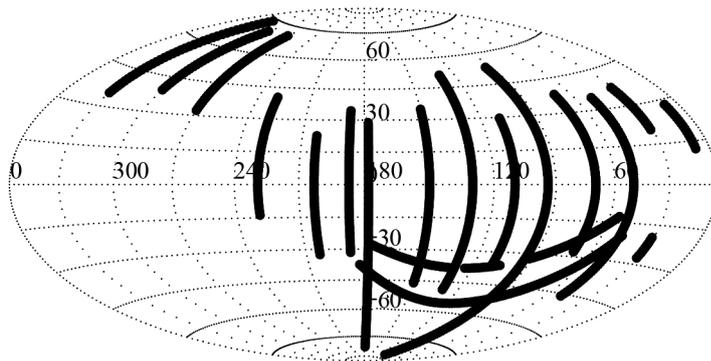


图4 SEGUE 测光巡天天区分布<sup>①</sup>(银道坐标系)

SDSS/SEGUE 的测光巡天提供了大量来自银河系晕的恒星数据, 在研究银河系晕和相关子结构方面取得了重要的成果: Newberg 等人利用 SDSS 在高银纬观测的  $5 \times 10^6$  颗恒星的测光数据, 研究了恒星的位置、颜色以及星等值, 在颜色星等图上再现了 2 个由于潮汐作用被从人马座矮星系剥离的子结构, 并通过 F 拐点星的研究发现了一系列星流次结构; 这一发现证实了银河系晕中存在着大量由于银河系吸积、并合矮星系而留下的潮汐碎片(星流)子结构, 为在等级成团理论框架下星系的形成和演化模式提供了生动有力的证据<sup>[78]</sup>。Ivezic 等人通过由 SDSS 光谱测得的 60 000 颗 F/G 型星的有效温度和金属丰度, 建立了一个通过 SDSS 的  $u' - g'$  和  $g' - r'$  颜色估计 F/G 型星金属丰度的多项式模型, 并用 SDSS 的多波段测光数据估计了约  $2 \times 10^6$  颗 F/G 型星的金属丰度值, 得到了距离在 500 ~ 8000 pc 之间的恒星金属丰度分布函数, 发现金属丰度明显被分成了两部分: (1) 不随空间变化的恒星晕成分, (2) 金属丰度随着银面距增大而减小的银盘成分; 这是人类首次得到从恒星晕到银盘的大尺度金属丰度梯度分布, 对银河系化学演化的研究具有重要意义<sup>[79]</sup>。Yanny 等人在 SEGUE 和 SDSS 的测光/光谱数据中选出了一批极红的 K/M 型巨星来作为人马潮汐星流 (Sagittarius dwarf tidal stream) 的示踪天体, 估计了潮汐尾流的恒星数密度, 并发现在人马潮汐星流的附近还存在另一个低金属度的潮汐星流<sup>[83]</sup>。de Jong 等人利用 SEGUE 测光数据在颜色星等图 (CMD) 上的分布拟合出了一个银河系模型, 其中包括指数分布的薄盘和厚盘以及轴对称幂律分布的恒星晕, 并由此给出了厚盘和晕的一系列结构参数, 首次找到了恒星晕存在径向金属度梯度的证据<sup>[81]</sup>。

SDSS/SEGUE 测光巡天提供的史无前例的海量高精度测光数据使得人们对银晕和银盘的认识有了质的提高, 图 5 清楚地显示了 SDSS/SEGUE 巡天所观测到的大尺度星流结构, 表明银河系在形成过程中吸积和吞并了众多矮星系, 进一步加深了人们对星系形成过程的认识。图 6 显示了 SDSS 测光巡天所得到的银河系从恒星晕到银盘的金属丰度分布情况: 恒星晕中的金属丰度较低, 且没有变化; 银盘中的金属丰度随着银面距的增大而减小, 具有明显

<sup>①</sup><http://www.sdss.org/segue/index.html>

的梯度变化。这一发现大大提高了人们对银河系金属丰度分布情况的认识, 对银河系化学演化模型给出了较强的限制, 将有利于进一步研究银河系晕和盘的形成及演化。但是, 由于观测时间的限制, SEGUE 巡天没有实现对大面积连续天区的巡天观测, 而只是对十几条互不相连的穿越银盘的窄带做了测光观测; 这种离散的采样模式必然会损失很多银河系大尺度结构的重要信息, 给开展有意义的统计分析工作带来很大的困难, 从而限制了 SEGUE 测光数据发挥更大的科学价值。

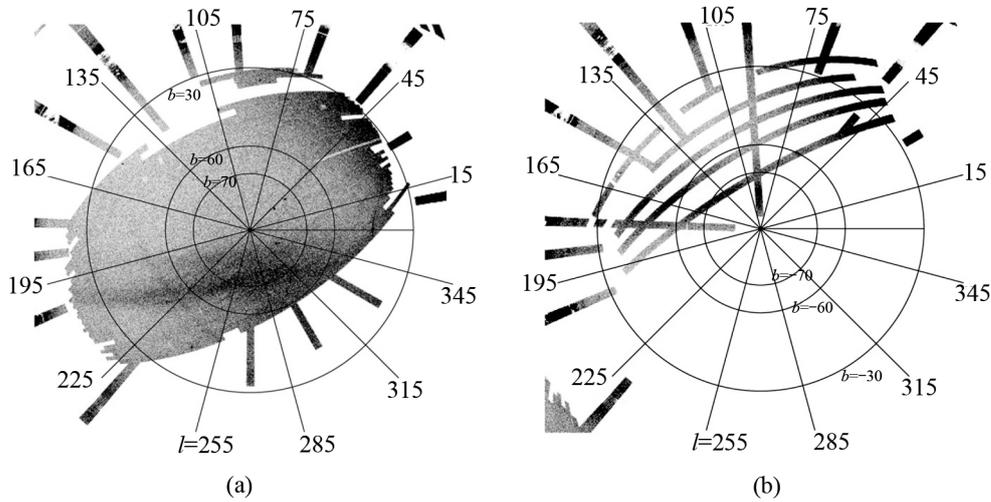


图 5 F 拐点星 (F-turnoff stars) 在 SDSS/SEGUE 巡天天区的密度轮廓图<sup>[83]</sup> (银道坐标系)

(a) 为 SDSS 测光巡天观测到的 F 拐点星在北银冠区域的分布情况, 其中深色区域代表存在星流的高密度区域, 图中可分辨的星流主要有: Sgr 星流 ( $l, b$ )=(330°, 61.5°), Orphan 星流 ( $l, b$ )=(255°, 50°), Palomar 5 星流 ( $l, b$ )=(1°, 45°); (b) 为 SEGUE 测光巡天观测到的 F 拐点星在南银冠区域的分布情况, 虽然天区没有连续, 但在 ( $l, b$ )=(100°, -85°) 到 (170°, -40°) 的区域仍然可以看到 Sgr 星流的延伸。

## 2.8 小结

本节主要回顾目前国内外开展的一系列以银河系为观测对象的较大规模测光巡天计划, 介绍了各个巡天计划的基本参数、性能指标和科学目标, 巡天所取得的主要科学成果, 以及巡天计划的意义和特点等。图 7 总结了部分巡天计划的巡天天区情况, 其中绿色实线框表示 UKIDSS 巡天中的银河系盘巡天天区, 绿色点虚线圆圈表示 UKIDSS 巡天中的银河系星团巡天天区, 红色点线框表示 IPHAS 巡天天区, 桔黄色虚线框表示盱眙施密特望远镜测光巡天的反银心巡天天区, 蓝色长点虚线框表示盱眙施密特望远镜测光巡天的低银纬巡天天区。表 1 列举了文中所提到的各个测光巡天计划, 如 2MASS 巡天, UKIDSS 巡天中的 GPS 和 GCS, IPHAS 巡天, 盱眙施密特望远镜测光巡天中的 GAC 和 LGL, 以及 SEGUE 的测光巡天部分。主要包括各个巡天项目所使用的望远镜口径、滤光片种类、巡天所能达到的完备星等值、巡天开始和结束的时间, 以及巡天计划所覆盖的天区面积等信息。

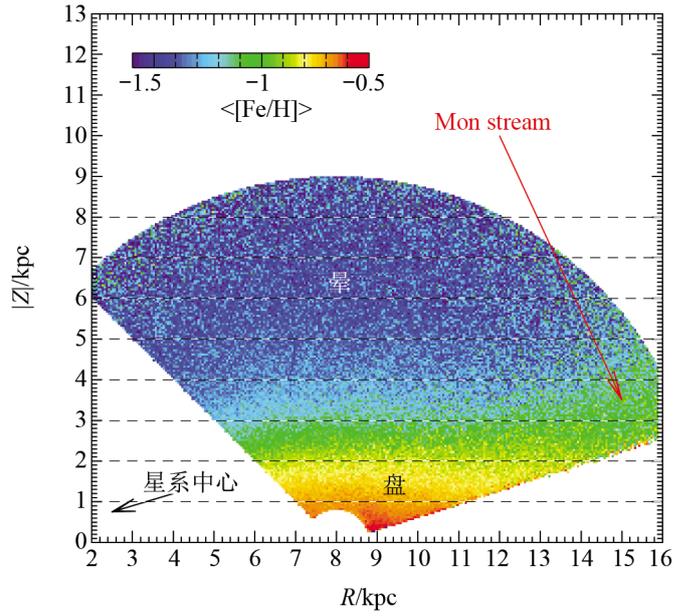


图6 SDSS DR6 中恒星在银河系晕和盘中的金属丰度分布<sup>[79]</sup>  
共  $2.5 \times 10^6$  颗恒星 ( $0.2 < g-r < 0.4$ ,  $0.8 < D < 9$  kpc), 红色箭头所示区域为金属丰度异常的星流区域。

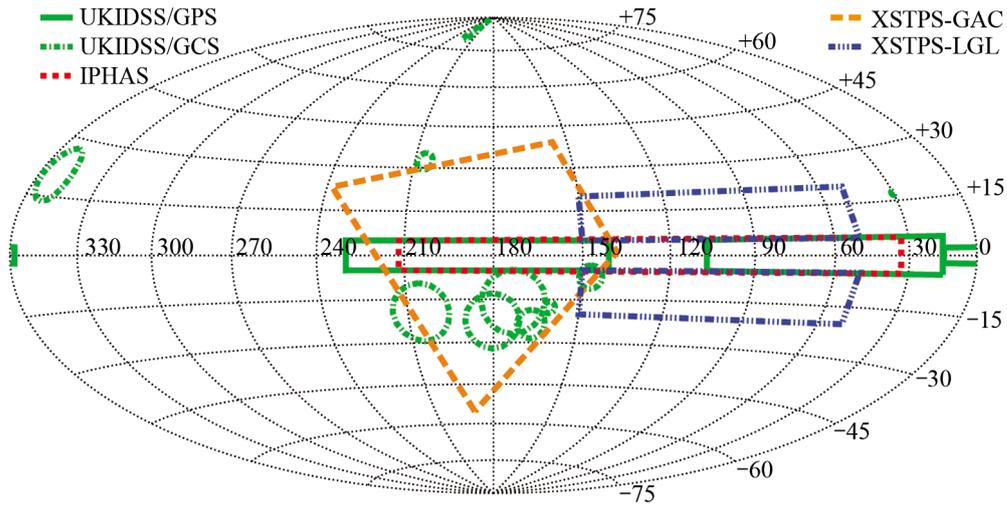


图7 测光巡天天区图 (银道坐标系)

表 1 银河系测光巡天计划

巡天计划	望远镜口径 /m	滤光片	完备星等 /mag	巡天时间 /年份	巡天面积 /平方度
2MASS 巡天	1.3	J/H/Ks	15.8/15.1/14.3	1997—2001	40 000
UKIDSS/GPS 巡天	3.8	J/H/K/H <sub>2</sub>	18.0(K)	2005—2012	1868
UKIDSS/GCS 巡天	3.8	Z/Y/J/H/K	18.0(K)	2005—2012	1067
IPHAS 巡天	2.5	H <sub>α</sub> /r'/i'	20(r')	2003—2008	1800
盱眙反银心巡天	1.2	g'/r'/i'	19(r')	2009—2011	6000
盱眙低银纬巡天	1.2	H <sub>α</sub> /g'/r'/i'	19(r')	2013—2015	3000
SEGUE 测光巡天	2.5	u'/g'/r'/i'/z'	22.2(r')	2004—2008	3500

### 3 光谱巡天计划

现代的光谱巡天观测主要利用多光纤技术同时对不同的目标源进行观测,一般可同时观测几百到上千目标源。与测光观测相比,光谱观测具有观测效率低,积分时间长,暗源较难观测等缺点,且光谱观测不可能像测光观测一样观测望远镜视场中的所有源;虽然光谱观测可以帮助我们得到更多的天体信息,但如何科学选取特定的观测目标源成为光谱观测的首要问题。由于科学目标的不同,对观测源的选取标准也会不同。目前的光谱观测主要分为两类:(1)星等完备观测,即选出处于一定星等范围内的所有恒星进行光谱观测,如 RAVE 巡天观测;(2)通过颜色选取特定的目标源进行观测,即通过一定的颜色判据来挑选出需要观测的天体,如 SDSS/SEGUE, LEGUE 巡天。

#### 3.1 RAVE 视向速度巡天

RAVE 视向速度巡天计划<sup>①</sup>(RADial Velocity Experiment)使用 1.2 m 的 UKST,对南半球约 20 000 平方度的天区进行多光纤光谱观测,其波长覆盖范围为 Ca 的三重线区域(Ca-triplet) 8410 Å ~ 8795 Å,光谱分辨率为  $R = 7500$ <sup>[52]</sup>。RAVE 巡天从 Tycho-2<sup>[53]</sup>和 SSS<sup>[13]</sup>巡天星表中选择了位于南半球且星等范围在  $9 < I < 12$  mag 的约 300 000 颗恒星进行光谱观测,得到了恒星精确的视向速度值,可以研究银河系恒星在薄盘、厚盘、晕里面各自的运动学特征,从整体上了解银河系恒星在速度空间的分布情况。巡天开始于 2003 年,到 2012 年已经观测了 460 000 多颗恒星,得到了 550 000 多条恒星的光谱,视向速度的精度约为 2 km/s。

图 8 显示了 RAVE 已经观测过的巡天天区(2012 年 8 月),包括除低银纬区域( $|b| < 14^\circ$ )外的所有南半球区域,其中不同颜色标明了不同方向的视向速度:红色表示恒星和太阳系的距离在变大,恒星正在离我们而去;绿色表示恒星和太阳系的距离在变小,恒星正在向着我们的方向运动。

在研究银河系整体结构和演化方面,基于 RAVE 数据<sup>[54-56]</sup>,近年来天文学家取得一系列重要研究成果。Smith 等人对 RAVE 巡天观测到的高速度星进行了分析,发现银河系的逃逸

<sup>①</sup><http://www.rave-survey.aip.de/rave/>

速度约为  $498 \sim 608 \text{ km/s}$ , 相比于太阳  $220 \text{ km/s}$  的本地运动速度, 如此高的逃逸速度说明在太阳系轨道外还存在着比轨道内更多的物质, 这也进一步暗示了银河系中暗晕的存在<sup>[57]</sup>。Veltz 等人综合了 RAVE 数据的视向速度信息, 2MASS 的恒星星等, 以及 UCAC2 的恒星本动数据, 对南银冠方向的 G 和 K 型矮星进行了研究, 发现其三维速度和星等可以很好地用来区分银河系的薄盘、厚盘, 以及一些更热的成分<sup>[58]</sup>。Siebert 等人挑选了 RAVE 数据中的红团簇星 (red clump) 样本, 用于测量银河系盘下方  $1 \text{ kpc}$  处的速度椭球的倾角, 通过和双成分银河系模型的计算结果相比较, 发现恒星盘的标长随着假设的暗物质晕的形状不同而不同, 这说明目前的观测数据不足以更好地区分不同模型, 因此人们还需要更多的观测数据来限制银河系的质量分布<sup>[59]</sup>。Yu 等人利用 RAVE 巡天数据和 GCS (the Geneva-Copenhagen Survey) 星表统计分析了不同年龄薄盘矮星样本的丰度梯度, 通过用有效温度来标定恒星的年龄, 发现年老恒星的丰度梯度比年轻恒星的丰度梯度小, 进一步证实了恒星径向迁移理论的预言<sup>[60]</sup>。

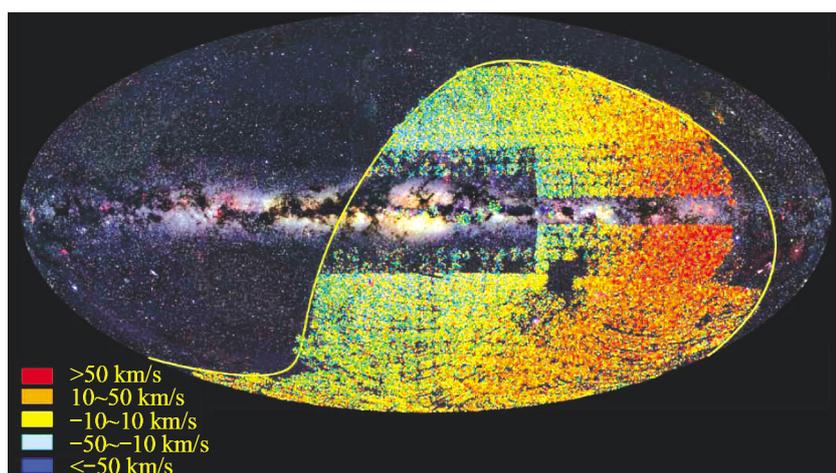


图 8 RAVE 视向速度巡天天区图<sup>①</sup>

黄色实线标定的区域为南天半球区域, 彩色方框区域为 RAVE 观测过的巡天天区。

RAVE 巡天的主要目的是通过光谱对恒星的视向速度进行高精度测量, 其大量的视向速度信息为人们进行银河系整体运动学的研究提供了重要的数据基础。由于 RAVE 巡天星表只能提供视向速度信息, 还需要和别的星表进行交叉认证, 综合恒星本动和距离位置的信息才能最终得到恒星在银河系中的三维速度分布和空间分布。另外, RAVE 巡天是一个南天区的巡天, 恒星本动及相关运动学数据与北天区相比要少得多, 这也一定程度上限制了 RAVE 数据的应用价值。未来 RAVE 数据将有可能结合 GAIA 巡天得到的恒星天体测量信息, 来进一步开展银河系整体运动学、动力学方面的研究。

<sup>①</sup><http://www.rave-survey.aip.de/rave/pages/project/index.jsp>

### 3.2 SDSS/SEGUE 光谱巡天

SDSS 在测光巡天的基础上对部分重要目标进行了光谱观测。SDSS 在其焦平面上布置了一个铝盘, 每次观测前根据要观测目标在铝盘上的投影位置进行机械打孔, 然后在每个孔上布置光纤将目标光线导入到后端的光谱仪中进行分光 and 记录。每次可以布置 640 根光纤对目标源进行分辨率为  $R = 1800$  的低分辨率光谱观测<sup>[61]</sup>。

SEGUE 光谱巡天观测主要包括 SEGUE-1 (2004—2008 年) 和 SEGUE-2 (2008—2009 年) 两个巡天子计划。主要任务是对银河系恒星进行大规模的测光和光谱观测, 来研究银河系晕中的子结构特征、并合历史、动力学和运动学演化、化学演化以及暗晕分布等重大课题, 进一步加强人类对银河系的认识 and 了解。

在测光观测的基础上, SEGUE 的光谱巡天使用了一系列复杂的颜色判据, 在星等范围为  $14.0 < g' < 20.3 \text{ mag}$  的恒星中挑选出 15 种不同类型的恒星样本 (即 WD/sdD/sdB, CWD, BHB/BS/A, F, Low Metal, F/G, G, K giant, M giant, AGB, dK/dM, sdM/esdM, WD/MS, L/T, LL)。如图 9 所示, 不同类型的恒星分布在不同的颜色区间内, 其选择判据详见 Yanny 等人<sup>[64]</sup> 2009 年的文章。每次依据望远镜的指向, 随机选择处于可观测范围内的恒星样本进行光谱观测, 共得到了约 240 000 颗恒星的低分辨率光谱 ( $R = 1800$ ), 波长覆盖范围为  $3800 \sim 9200 \text{ \AA}$ 。图 10 显示了 SEGUE 的巡天天区范围, 在已有测光数据的天区中对银河系盘和晕中的恒星进行了大体均匀的点状抽样观测。

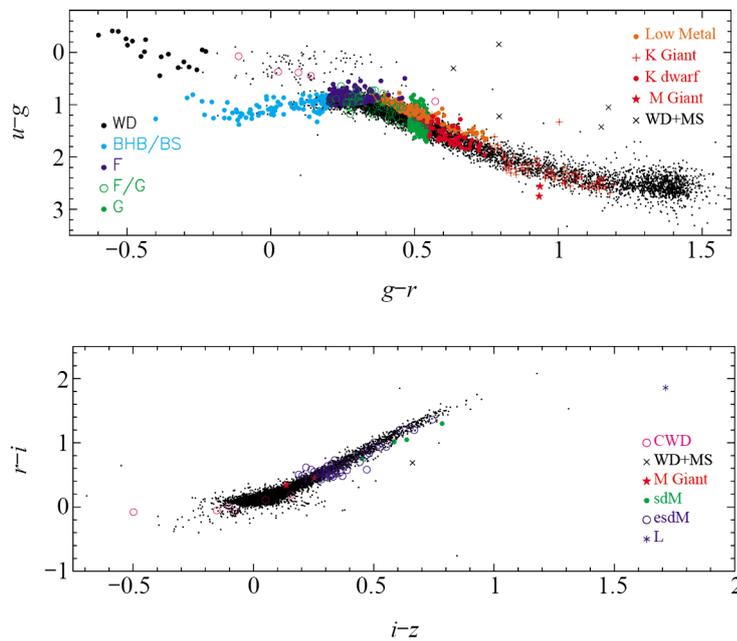


图 9 SEGUE 光谱候选体的颜色选择判据示意图<sup>[64]</sup>

不同的颜色表示已经被证认的不同类型的恒星, 由于其在颜色图上处于不同的区域, 因而可以通过一系列颜色选择判据将不同类型的恒星区分开。

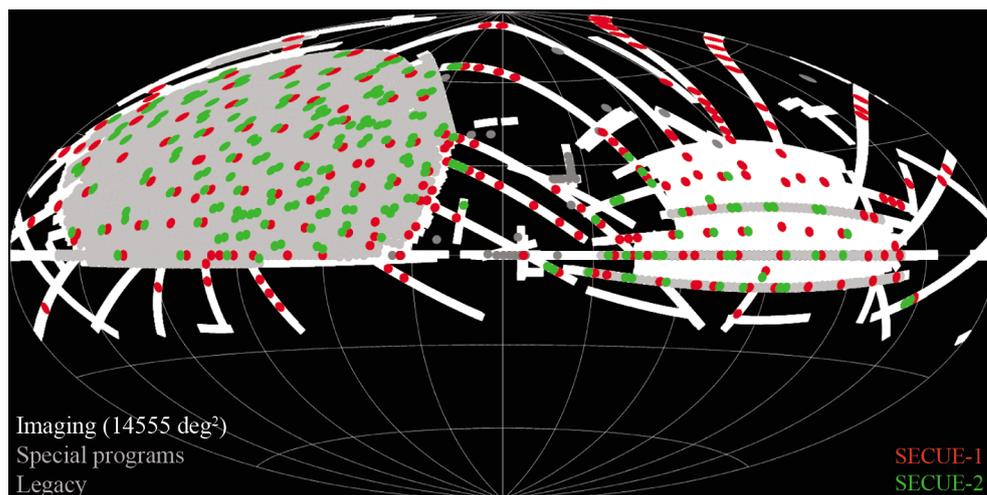


图 10 SEGUE 巡天天区图<sup>①</sup>(赤道坐标系, 中心赤经  $l=6$  h)

图中红色点状区域为 SEGUE-1 巡天天区, 绿色点状区域为 SEGUE-2 巡天天区, 白色区域为 SDSS/SEGUE 测光巡天天区。

SDSS/SEGUE 光谱巡天使得人们通过光谱获得了更多有关银河系大样本恒星的信息, 对于银河系的形成和演化历史有了更深的认识, 取得了一系列重要的研究成果: Xue 等人从 SDSS 第六次释放的数据中挑选出了位于恒星晕中的 2401 颗蓝水平支星 (BHB), 建立了距银心不同距离处恒星的视向速度分布, 并与两种不同的星系形成模型推导得出的模拟结果进行了比较, 发现 NFW 暗物质晕模型的结果和观测符合得较好; 这一研究暗示了银河系中暗物质晕的真实分布情况, 并估计暗晕的维里质量约为  $M_{\text{vir}}=1.0_{-0.2}^{+0.3} \times 10^{12} M_{\odot}$ , 对银河系暗物质晕的质量范围给出了较强的限制<sup>[80]</sup>。Lee 等人对 SEGUE 巡天光谱中 17277 颗 G 矮星的  $[\alpha/\text{Fe}]$  丰度进行了测量, 并将矮星分为厚盘和薄盘两大类样本, 研究了不同样本中金属度梯度和转动速度、银心距、轨道偏心率之间的相关关系, 发现恒星的径向迁移在薄盘的演化中起了重要的作用, 但可能对厚盘的影响较小<sup>[82]</sup>。Cheng 等人使用 SEGUE 数据中的 7010 颗主序拐点恒星 (turnoff stars) 研究了银河系的径向丰度梯度 ( $\Delta[\text{Fe}/\text{H}]/\Delta R$ ) 和银面距的关系, 发现径向丰度梯度在高银面距  $|Z| > 1$  kpc 的地方开始变平, 这一发现对厚盘形成假设和银河系的化学增丰及动力学模型都提出了很强的限制<sup>[84]</sup>。

SEGUE 光谱巡天结合之前的 SDSS/SEGUE 测光巡天数据, 可以同时得到恒星的坐标、星等、颜色、视向速度、金属丰度、表面重力加速度等物理信息, 这将有利于人们更好地通过恒星来研究银河系各个组成部分的性质和特点。SEGUE 光谱巡天对点状分布的约 400 个天区进行了光谱观测, 这种离散观测所涉及的恒星种类太多, 带有很强的选择效应, 难以开展有意义的大规模统计分析工作。此外, SEGUE 光谱巡天的低分辨率光谱也存在一定的局限性, 无法精确测定恒星的金属丰度、表面温度和表面重力加速度等物理参数, 一定程度上限制了其对银河系整体化学演化的认识和研究。

<sup>①</sup><http://www.sdss3.org/dr8/scope.php>

### 3.3 SDSS/APOGEE 巡天

APOGEE 巡天<sup>①</sup>(The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment) 是 SDSS 第三期巡天计划 (SDSS-III) 中的一个子项目, 主要目标是对银河系核球、棒、薄/厚盘, 以及恒星晕的部分区域进行光谱巡天观测。每次观测将同时得到 300 条高分辨率 ( $R=20\,000$ ) 的近红外光谱 ( $\lambda=1.52 \sim 1.69 \mu\text{m}$ )<sup>[85, 86]</sup>。APOGEE 巡天已于 2011 年开始观测, 第一期计划到 2014 年结束。巡天天区如图 11 所示。预期将获得约  $1 \times 10^5$  颗巨星 (2MASS 星等  $H < 13.5 \text{ mag}$ ) 的高分辨率 ( $R=20\,000$ )、高信噪比 ( $S/N = 100$ ) 红外光谱, 从而获得恒星精确的视向速度值和超过 15 种化学元素的丰度信息, 用来研究银河系的动力学结构和化学演化历史。

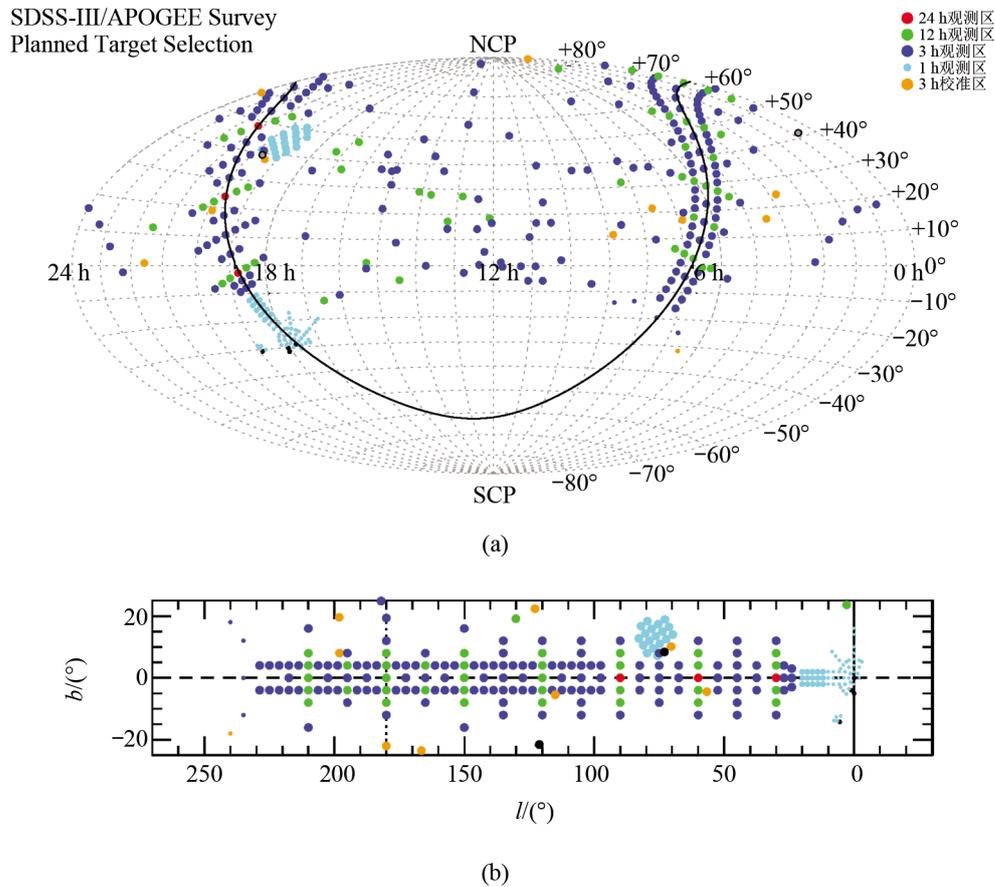


图 11 APOGEE 巡天天区分布<sup>[87]</sup>

(a) 为赤道坐标系, 不同的颜色表示观测不同天区所需要的积分时间, 大部分观测时间为 3 h, 黑色实线表示银道面区域; (b) 为银道坐标系下在低银纬区域的天区分布图, 光谱观测天区基本沿银道面呈对称排列。

APOGEE 巡天的科学目标主要包括: (1) 银河系整体星族成分研究<sup>[88]</sup>; (2) 银河系的等级形成历史<sup>[89]</sup>; (3) 寻找星族 III 恒星存在的证据<sup>[90]</sup>; (4) 发现恒星晕的次结构<sup>[78]</sup>; (5) 银河系动

<sup>①</sup><http://www.sdss3.org/surveys/apogee.php>

力学研究<sup>[91]</sup>; (6) 银河系核球和棒结构研究<sup>[92-94]</sup>; (7) 低银纬星团的研究<sup>[95]</sup>。

一年多的巡天观测已经取得部分的成果: Bovy 等人利用 APOGEE 测得的 3365 颗低银纬区域恒星的高精度视向速度建立了一个轴对称的运动学模型, 计算了银河系的一系列运动学参数, 发现银河系在距银心 4 kpc 到 14 kpc 的距离范围内, 恒星的转动曲线大约是平的; 这一发现再次证明了银河系中存在着暗物质晕, 估计暗晕在其维里半径内的质量为  $8 \times 10^{11}$  太阳质量<sup>[96]</sup>。Frinchaboy 等人利用 APOGEE 的数据研究了疏散星团样本, 并对其视向速度、金属丰度和恒星参数等物理量进行了测量, 得到了一批具有大量成员星信息的星团样本, 为后续的研究奠定了基础<sup>[97]</sup>。

APOGEE 巡天使用了高分辨率、高信噪比的光谱观测, 这是对之前 SEGUE 巡天的重大改进, 将有利于从光谱中提取到更多的恒星物理信息。通过测量高分辨率光谱, 人们可以得到恒星更加精确的各种物理参数, 从而更加全面地了解其性质特征。APOGEE 巡天观测到的  $1 \times 10^5$  颗恒星将进一步扩展人类目前拥有的高分辨率恒星光谱数量, 并可以和未来 GAIA 巡天得到的高精度恒星运动学数据相结合, 更好地研究银河系的动力学和化学演化。

### 3.4 LAMOST/LEGUE 巡天

LAMOST 望远镜<sup>①</sup>(The Large sky Area Multi-Object fiber Spectroscopic Telescope) 是大天区面积多目标光纤光谱望远镜的简称, 也叫郭守敬望远镜, 是一台由我国自行研制的中星仪式反射施密特望远镜。它具有约 4 m 的有效口径, 视场约 20 平方度, 波长覆盖范围为 3700 ~ 9000 Å, 可以同时 对 4000 个天体进行光纤光谱观测。在 1.5 h 曝光、光谱分辨率  $R = 1800$  的情况下, 可以探测到  $r = 19$  mag 的暗弱天体<sup>[98, 99]</sup>。

LAMOST 望远镜坐落在河北兴隆观测基地, 于 2008 年建成, 随后对其开展了为期两年的性能测试和优化观测试运行, 解决了 4000 根光纤的自动定位问题, 定位精度误差整体小于 1", 得到了超过  $2 \times 10^5$  条天体光谱。为了检验国内外天文学家提出的各种 LAMOST 光谱巡天项目的可行性, LAMOST 在 2011 年秋至 2012 年春进行了先导巡天观测, 对银河系晕<sup>[100]</sup>、反银心和银盘<sup>[101, 102]</sup>的部分区域<sup>②</sup>都进行了光谱观测, 共得到了约  $4.8 \times 10^5$  条具有较高信噪比的恒星光谱和约  $1.6 \times 10^5$  条较低信噪比的光谱, 大部分天区的极限星等约为  $r=17.8$  mag, 少量天区可达  $r=18.5$  mag。2012 年秋正式开始了巡天观测, 目前已经观测得到了近百万条天体光谱。

LEGUE 巡天<sup>[103]</sup>(LAMOST Experiment for Galactic Understanding and Exploration) 是 LAMOST 巡天计划的一部分, 计划在 4 ~ 5 a 的时间内对银河系高银纬的银晕天区 ( $|b| > 20^\circ$ )、反银心天区 ( $|b| \leq 30^\circ, 150^\circ \leq l \leq 210^\circ$ ) 以及反银心外的低银纬银盘天区进行光谱观测<sup>[104]</sup>。LAMOST 所处的地理位置理论上可以观测赤纬  $-10^\circ \sim 90^\circ$  的天区, 但是由于 LAMOST 设计的特殊性, 观测  $Dec > 60^\circ$  的区域将会使得望远镜的有效视场从  $5^\circ$  减少到  $3^\circ$ , 接收的光线减少 20% ~ 30%, 部分光纤无法正常观测。为了保证 LAMOST 的观测效率, 目前的观测区域主要为  $-10^\circ < Dec < 60^\circ$  的全天所有可见区域<sup>[99]</sup>。图 12 显示了 LEGUE 计划的全部

<sup>①</sup><http://www.lamost.org/public/?locale=en>

<sup>②</sup><http://legue.bao.ac.cn>

巡天天区, 绿色区域为银晕的巡天天区, 红色区域为反银心方向的巡天天区, 蓝色区域为银河系银盘的巡天天区, 黄色区域为南银冠巡天天区。值得注意的是, 由于  $20^\circ \leq l \leq 80^\circ$  的低银纬银盘区域主要在夏天观测, 这段时间兴隆观测基地的晴夜数很少<sup>[105]</sup>, 因而这个天区的实际观测率将会很低<sup>[104]</sup>。

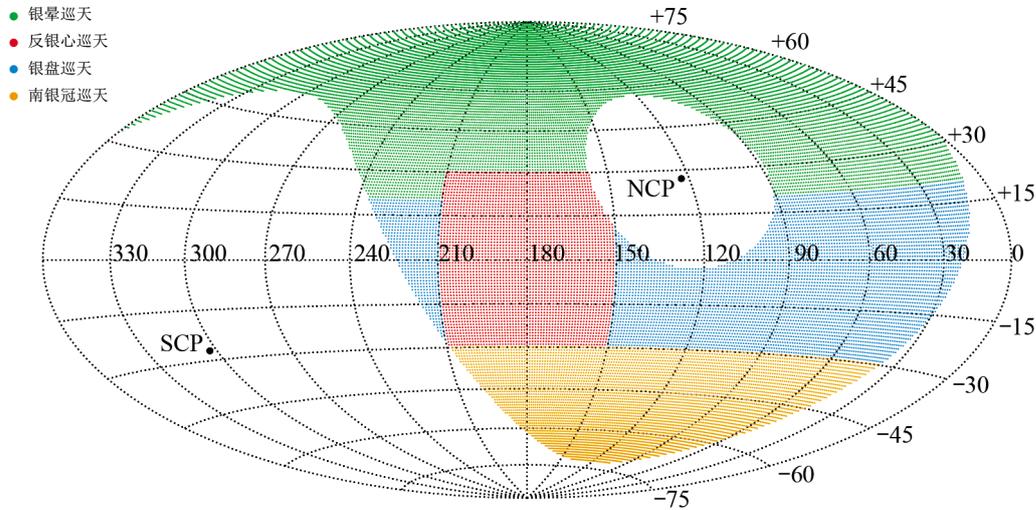


图 12 LEGUE 巡天天区 (银道坐标系)

对于高银纬的银晕区域, 主要通过  $g, r, i$  这 3 个波段的颜色选择判据选取所有的 O 型、B 型、A 型和白矮星, 大部分的 F 拐点星、K 型巨星和 M 型巨星等进行光谱观测; 对于低银纬的反银心和盘区域, 由于恒星数密度太高, 主要通过颜色空间平均抽样的方式对各种类型恒星进行均匀选取, 并兼顾恒星的分布情况, 尽可能地保证观测恒星在颜色空间和位置空间分布的均匀性。通过未来 5 年的光谱巡天观测, LEGUE 将得到约  $5 \times 10^6$  颗  $r < 19$  mag 和约  $5 \times 10^6$  颗  $r < 17$  mag 的恒星光谱。

LEGUE 巡天将充分利用 LAMOST 望远镜高效的光谱获取能力, 对银河系进行大规模的光谱巡天观测, 其可研究的科学课题主要包括<sup>[104]</sup>: 通过对金属丰度的测量寻找大量的贫金属星, 追溯银河系的早期化学演化历史; 通过测量恒星的动力学参数来寻找高速星、研究暗物质分布和盘的子结构特征; 通过对红团簇星的观测来研究银河系晕的结构; 通过对大样本疏散星团中成员星的观测来研究银河系盘的结构和演化; 通过对恒星视向速度的统计分析来研究恒星的径向迁移; 通过对低质量冷星的搜寻来研究太阳领域的化学动力学演化; 通过对反银心方向恒星的光谱观测来研究银河系外部盘的子结构和相关性质; 通过对银河系晕族恒星的观测来研究银河系晕结构以及潮汐作用产生的星流等。

虽然 LEGUE 的正式巡天工作才刚刚开始, 但 LAMOST 在试观测阶段积累的大量光谱数据已经取得了部分的研究成果: Zhong 等人利用一种自动化的模板匹配方法, 对 LAMOST 反银心方向的试观测数据进行了分析, 找到了 2612 颗 M 矮星和亚矮星, 并对其进行了温度和金属度的分类, 研究了这批样本在太阳领域的空间分布和速度分布情况, 对 M 矮星的研

究将有利于认识太阳领域的星际环境,以及追溯银河系的形成和演化历史<sup>[106]</sup>。Yi 等人改进了 SEGUE 巡天中所使用的恒星分类方法,并对 LAMOST 先导巡天数据中的 M 矮星进行了搜寻,得到了一个包含有 67 082 个样本的 M 矮星星表<sup>[107]</sup>。Li 等人通过对 LAMOST 试观测数据的分析,新发现了 9 颗贫金属星候选体 ( $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ ); 通过对这些贫金属星化学丰度的深入研究,将有利于人们进一步了解银河系的早期演化历史<sup>[108]</sup>。Yuan 等人通过对 LAMOST 在 M31 天区的试观测光谱数据,证认了 36 个处于 M31 外围的行星状星云,其中有 17 个为新发现的行星状星云; 这些星云是研究其所在星系的星族合成、化学动力学演化的良好示踪天体<sup>[109]</sup>。Huo 等人通过对试观测数据和先导巡天数据的分析,发现了 500 个 M31/M33 天区的背景类星体,这是我国天文学家利用自主设备发现的数目最多的类星体样本<sup>[110,111]</sup>。

LEGUE 巡天在观测波段、极限星等、光谱分辨率上都和 SEGUE 巡天相当,但大部分巡天区域都和 SEGUE 不重合,因而可以和 SEGUE 巡天数据联合起来组成一个规模更大、覆盖天区更广的恒星光谱库,便于在更大尺度上研究银河系的整体结构和演化。例如,作为 LEGUE 巡天一部分的银河系反银心方向巡天,5 年时间内将获得反银心方向超过 3000 平方度连续天区中极限星等  $r = 17.8 \text{ mag}$ 、红端像素信噪比大于 10 的约  $2.25 \times 10^6$  条恒星光谱; 样本将包含分布在薄盘、厚盘、银晕及其过渡天区内的各类恒星,实现在天区覆盖、巡天体积、采样密度及统计完备性方面的重大突破,为我国独立开展银河系特别是银盘研究提供极好的观测样本。未来的 GAIA 计划实施后,其高精度的天体测量星表有望和 LEGUE 数据结合,将有利于天文学家深入研究银河系的相关物理性质。

### 3.5 HERMES 巡天

HERMES 巡天计划<sup>①</sup> (High Efficiency and Resolution Multi-Element Spectrograph) 使用 3.9 m 的 AAT 望远镜 (Anglo-Australian Telescope) 和  $2^\circ$  视场 (two-degree field, 2dF) 光学光谱观测系统,可以同时 对 400 个目标进行高分辨率光谱观测 ( $R = 30\,000 \sim 50\,000$ ), 其主要的观测波段为  $3650 \sim 11\,000 \text{ \AA}$ <sup>[112]</sup>。

HERMES 巡天计划开始于 2012 年,包括星系考古 (galactic archaeology)、恒星物理 (stellar astrophysics)、星际介质 (interstellar medium) 和视向速度 (radial velocity variability) 4 个部分的研究工作,其主要科学任务是揭示  $1.2 \times 10^{10}$  年前银河系的形成历史,特别是研究早期银河系对原初恒星团块 (矮星系) 的吸积历史,因为这些由原初恒星组成的团块一直被认为是构成银河系盘的基石<sup>[9]</sup>。为了追溯这一早已混合在银河系盘上的吸积证据,HERMES 巡天将对南半球  $|b| > 30^\circ$ , 约 10 000 平方度区域中的  $1 \times 10^6$  颗  $V < 14 \text{ mag}$  的恒星进行高分辨率 ( $R = 28\,000$ ) 光谱观测,其中薄盘恒星占 78%,厚盘恒星占 17%,晕族恒星占 5%。通过精确测量恒星的各化学元素丰度<sup>[113]</sup>,将有助于天文学家发现一些来自于同一原初云块和尘埃团中的恒星以及一些贫金属星,从而研究银河系的形成和演化历史<sup>[114,115]</sup>。此外,结合未来 GAIA 巡天的天体测量数据,HERMES 所标定的具有精确元素丰度的  $1 \times 10^6$  颗恒星将进一步用来揭示银河系的化学和动力学演化历史; HERMES 测得的元素丰度资料还可以用来研究银河系中球状星团的形成历史,以及星际介质的化学丰度等相关课题; 通过 HERMES 的

<sup>①</sup><http://www.aao.gov.au/HERMES/>

高分辨率光谱还能够得到恒星精确的视向速度, 用来研究多体恒星系统的转动和发现这些恒星周围的行星等。

HERMES 巡天的优势在于使用高分辨率光谱, 可以对恒星的金属丰度、视向速度、表面温度、重力加速度等进行精确的测量, 得到一系列重要的恒星物理参量来开展化学动力学方面的研究。但高分辨率光谱也限制了巡天观测的规模和效率, 目前只能对亮星进行观测, 且观测数量也十分有限。

### 3.6 小结

本章回顾了目前国内外开展的一系列针对银河系恒星的光谱巡天观测计划, 对各个巡天计划的基本性能参数, 光谱选择标准, 科学目标和意义, 所取得的主要科学成果等都进行了具体的介绍。表 2 列举了文中所提到的各个光谱巡天计划, 如 RAVE 巡天, SDSS/SEGUE 计划的光谱巡天部分, SDSS/APOGEE 巡天, LAMOST/LEGUE 巡天以及 HERMES 巡天。主要包括了各个巡天项目所使用的望远镜口径, 光纤数目, 视场大小, 光谱分辨率, 所观测恒星的星等范围, 光谱的观测波段, 光谱巡天的起始时间, 计划得到的点源光谱数目等信息。

表 2 银河系光谱巡天计划

巡天计划	望远镜 口径/m	光纤 数目	视场 直径	分辨率	星等范围 /mag	观测波段 /nm	巡天时间 /年份	点源数目 $\times 10^4$
RAVE	1.2	150	6°	7500	$9 < I < 12$	841 ~ 879.5	2003—2012	约 46
SEGUE(光谱)	2.5	640	3°	1800	$14 < g' < 20.3$	390 ~ 900	2004—2009	约 36
APOGEE	2.5	300	3°	20 000	$H < 13.5$	1520 ~ 1690	2011—2014	约 10
LEGUE	4.0	4000	5°	1800	$r < 19$	370 ~ 900	2012—2017	约 500
HERMES	3.9	400	2°	40 000	$V < 14$	365 ~ 1100	2012—	约 100

## 4 下一代巡天计划

### 4.1 GAIA 计划

GAIA<sup>①</sup> 是一颗由欧洲空间局研制的高精度天体测量卫星, 预计将于 2013 年 10 月发射升空。GAIA 巡天<sup>[116]</sup> 将是迄今为止测量精度最高的观测计划, 它将在 5 年的巡天观测中, 对银河系 1% 的天体进行光学成像观测, 得到约  $1 \times 10^9$  颗极限星等  $V = 20$  mag, 空间分辨率 25 微角秒 ( $\mu\text{as}$ ) ( $G = 15$  mag) 恒星的测光数据, 获取这些恒星的视差、自行、亮度等物理量<sup>[117, 118]</sup>; 对约  $1.5 \times 10^7$  颗  $V < 16$  mag 的恒星获得中等分辨率 ( $R = 11\,500$ ) 的光谱, 测定它们的视向速度<sup>[119]</sup>, 其中约  $5 \times 10^6$  颗  $V < 12$  mag 的恒星将能够测量其星际红化、大气参数、自转速度等信息<sup>[120-122]</sup>。

<sup>①</sup><http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=26>

GAIA 巡天的主要科学目标<sup>[123]</sup>是要得到全天亮于  $V = 20 \text{ mag}$  的所有恒星在银河系中的三维坐标和速度分布信息, 建立银河系三维全天立体星图<sup>[124]</sup>, 这将使得人类可以更加全面和系统地认识银河系大尺度结构, 追溯银河系薄盘和厚盘的形成历史及其对于周围矮星系的吸积和并合历史, 从而更深入地理解银河系的形成和演化<sup>[125]</sup>。此外, GAIA 巡天所获得的大量恒星样本还可以用来进行以下研究: (1) 通过测量恒星坐标位置的周期性变化, 可以搜寻到 200 pc 范围内, 轨道周期为 1.5 ~ 9 a 的木星尺度的系外行星<sup>[126]</sup>; (2) 搜寻到大约几万颗褐矮星, 帮助人类认识和研究此类没有氢燃烧的特殊天体<sup>[127]</sup>; (3) 研究天体测量过程中的广义相对论效应<sup>[128]</sup>; (4) 通过双星轨道和坐标的精确测量, 研究恒星尺度的黑洞及其物理性质等<sup>[129]</sup>。

GAIA 计划的最大特点在于其高精度的空间分辨本领, 这将为精确测量恒星视差和自行提供条件, 尤其是三角视差的广泛应用将使得对银河系恒星距离的测量精度大大提高。结合恒星的视向速度信息, 人类将有望真正得到高精度的银河系三维全天星图, 其中恒星的数量和其坐标精度都是之前的巡天数据所无法比拟的, 这将对银河系结构和运动学及动力学的研究现状产生革命性的影响。

#### 4.2 WEAVE 计划

WEAVE<sup>①</sup> 是一台计划安装在 4.2 m 口径的威廉·赫歇尔望远镜上的多目标光纤光谱仪, 它可以使天文学家在  $2^\circ$  的视场内同时对 1000 个目标进行高质量的光纤光谱观测<sup>[130]</sup>。

强大的多目标光谱观测能力, 使得这个计划可以成为对 GAIA 巡天的补充<sup>[131]</sup>: (1) 可以用  $R = 5000$  的中等分辨率光谱观测, 为 GAIA 巡天观测中无法得到视向速度值的暗星 ( $V > 17 \text{ mag}$ ) 提供高精度的视向速度信息 ( $\delta_{V_r} < 5 \text{ km/s}$ ), 补全 GAIA 巡天在  $17 < V < 20 \text{ mag}$  范围内恒星的六维相空间信息, 并用来研究银河系的质量分布、大尺度结构、当前动力学状态等问题<sup>[132-134]</sup>; (2) 可以用  $R = 20000$  的高分辨率光谱对  $V < 18 \text{ mag}$  的贫金属厚盘和晕族恒星进行化学元素丰度的测量 ( $\delta_{[m/H]} = 0.1 \text{ dex}$ ), 并结合恒星的天体测量信息, 通过化学元素的示踪来研究银河系的并合历史<sup>[135, 136]</sup>。

#### 4.3 4MOST 计划

4MOST<sup>②</sup> (4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope) 是一台由欧洲南方天文台设计并计划安装在 4 m 口径的 VISTA 望远镜 (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) 上的高性能光谱仪。希望能够通过这台光谱仪, 对至少大于 3 平方度 (目标 5 平方度) 的宽场天区同时进行超过 1500 根光纤 (目标 3000 根光纤) 的光学光谱观测。光谱仪计划于 2018 年建成, 届时将能够作为地基光谱巡天的一部分, 和天基观测的 GAIA、eROSITA (extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array)、Euclid 等巡天计划形成互补, 为天文学家提供更多高质量的天体光谱<sup>[137]</sup>。

4MOST 将计划对南天区进行为期 5 年的巡天观测, 得到约  $2 \times 10^7$  条分辨率  $R = 5000$ , 波长  $\lambda = 3900 \sim 10000 \text{ \AA}$  的中低分辨率光谱, 以及超过  $2 \times 10^6$  条  $R = 20000$ ,  $\lambda = 3950 \sim 4565 \text{ \AA}$ ,  $5870 \sim 6730 \text{ \AA}$  的高分辨率光谱, 用来探测和研究银河系各成分中的化学元素丰度分布及运

<sup>①</sup><http://www.ing.iac.es/weave/index.html>

<sup>②</sup><http://www.aip.de/en/research/research-area-ea/research-groups-and-projects/4most>

动力学特征等。

#### 4.4 MOONS 计划

MOONS (Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph) 是一台计划安装在 8.2 m 口径的 VLT (Very Large Telescope) 上的近红外光谱仪, 可以在 500' 的范围内使用 500 根光纤对天体进行近红外光谱观测, 其波长范围为 8000 ~ 18 000 Å, 具有中低分辨率 ( $R = 3000 \sim 5000$ ) 和高分辨率 ( $R = 20\,000$ ) 两种光谱观测模式<sup>[138]</sup>。

MOONS 计划的主要科学目标有: (1) 作为 GAIA 巡天的后续计划, 开展对银河系考古学的研究; (2) 宇宙学和大尺度结构的研究; (3) 星系形成和演化的研究; (4) 第一代星系和宇宙再电离过程的研究。

#### 4.5 LSST 计划

LSST<sup>①</sup> (The Large Synoptic Survey Telescope) 是一台计划建在智利的同时兼顾了大口径 (8.4 m) 和大视场 (9.6 平方度) 的下一代巡天望远镜。计划将于 2014 年动工, 2021 年建成, 2022 年开始正式的巡天工作。LSST 使用  $3.2 \times 10^9$  pixel 的照相机, 高效的观测能力将能够在一周时间内对南半球 20 000 平方度的天区进行 2 次扫描。LSST 计划用 10 年时间, 使用 u、g、r、i、z、y 共 6 个波段 (320 × 1050 nm) 对南半球 20 000 平方度的全天区域进行 1000 次观测, r 波段极限星等将达到 27.5 mag<sup>[139]</sup>。

绘制银河系 (Mapping the Milky Way) 是 LSST 巡天四个科学目标中的一个, 10 年的观测将能够探测到约  $1 \times 10^{10}$  颗恒星, 其定位精度将和 GAIA 相当 ( $r = 20$  mag 时坐标误差 0.3 mas)。计划通过获得大量暗弱天体的精确测光和位置信息, 研究银河系天文学中的两个基本问题: 银河系的真实结构和吸积历史, 太阳周围 300 pc 内所有恒星的基本特征。

## 5 总结与展望

本文介绍了目前国内外已开展和将要开展的多个著名巡天项目及其进展情况。通过这些巡天计划, 天文学家将获得海量的恒星观测数据, 并有能力将测光和光谱巡天数据结合起来, 对恒星进行更全面的研究, 从而进一步追踪银河系的结构和演化特征。值得注意的是, 对于来自于不同巡天项目的观测数据, 由于观测系统间存在着数据定标、精度一致性、选源完备性等问题, 在使用这些数据进行科学研究时还需要对这些数据的系统性差别进行全面的考虑和评估。

近年来, 随着科学技术的进步, 天文观测设备尤其是终端设备有了长足的发展。测光和光谱巡天的规模越来越大, 巡天数据的质量越来越高, 通过巡天数据能够获取的天体信息也越来越多, 这都有助于银河系天文学的研究向更深更广的领域扩展。

---

<sup>①</sup><http://www.lsst.org/lsst/science/development>

## 参考文献:

- [1] 赵君亮. 天文学进展, 2005, 23: 346
- [2] 赵君亮. 天文学进展, 2009, 27: 116
- [3] Shen Z-Q, Lo K-Y, Liang M-C, Ho P T P, Zhao J-H. *Nature*, 2005, 438: 62
- [4] Wolfire M G, McKee C F, Hollenbach D, Tielens A G G M. *ApJ*, 1995, 453: 673
- [5] Ibata R A, Gilmore G, Irwin M J. *MNRAS*, 1995, 277: 781
- [6] Kennicutt R C, Evans N J. *ARA&A*, 2012, 50: 531
- [7] Edvardsson B, Andersen J, Gustafsson B, et al. *A&A*, 1993, 275: 101
- [8] Klimentowski J, Łokas E L, Kazantzidis S, Mayer L, Mamon G A. *MNRAS*, 2009, 397: 2015
- [9] Freeman K, Bland-Hawthorn J. *ARA&A*, 2002, 40: 487
- [10] Minkowski R L, Abell G O. *Stars and Stellar Systems*, Chicago: Chicago Univ. Press, 1963: 481
- [11] Haynes R, Haynes R D, Malin D, McGee R. *AAS/Division for Extreme Solar Systems Abstracts*. UK: Cambridge University Press, 1996
- [12] Fisher K B, Huchra J P, Strauss M A, et al. *ApJS*, 1995, 100: 69
- [13] Hambly N C, MacGillivray H T, Read M A, et al. *MNRAS*, 2001, 326: 1279
- [14] Xu Y, Deng L C, Hu J Y. *MNRAS*, 2007, 379: 1373
- [15] Hambly N C, Henry T J, Subasavage J P, Brown M A, Jao W-C. *AJ*, 2004, 128: 437
- [16] Rowell N, Hambly N C. *MNRAS*, 2011, 417: 93
- [17] Skrutskie M F, Cutri R M, Stiening R, et al. *AJ*, 2006, 131: 1163
- [18] Roeser S, Demleitner M, Schilbach E. *AJ*, 2010, 139: 2440
- [19] Nishiyama S, Tamura M, Hatano H, et al. *ApJ*, 2009, 696: 1407
- [20] Lombardi M, Lada C J, Alves J. *A&A*, 2010, 512: 67
- [21] Kirkpatrick J D, Reid I N, Liebert J, et al. *ApJ*, 1999, 519: 802
- [22] Kirkpatrick J D, Allard F, Bida T, et al. *ApJ*, 1999, 519: 834
- [23] Kirkpatrick J D. *IAU Symp*, 2003, 211: 189
- [24] Bonatto C, Bica E. *A&A*, 2008, 479: 741
- [25] Hurt R L, Jarrett T H, Kirkpatrick J D, et al. *AJ*, 2000, 120: 1876
- [26] Perryman M A C. *Hipparcos and Tycho Catalogues*. Noordwijk: ESA, 1997: 1
- [27] Lawrence A, Warren S J, Almaini O, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 1599
- [28] Lodieu N, Hambly N C, Jameson R F, et al. *MNRAS*, 2007, 374: 372
- [29] Lucas P W, Hoare M G, Longmore A, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 136
- [30] Warren S J, Mortlock D J, Leggett S K, et al. *MNRAS*, 2007, 381: 1400
- [31] Lodieu N, Dobbie P D, Deacon N R, et al. *MNRAS*, 2007, 380: 712
- [32] Cabrera-Lavers A, González-Fernández C, Garzón F, Hammersley P L, López-Corredoira M. *A&A*, 2008, 491: 781
- [33] Drew J E, Greimel R, Irwin M J, et al. *MNRAS*, 2005, 362: 753
- [34] L Rodríguez-Flores E R. *Proc. IAU Symp*. 2006, 234: 533
- [35] Wright N J, Greimel R, Barlow M J, et al. *MNRAS*, 2008, 390: 929
- [36] Wright N J, Barlow M J, Greimel R, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 1413
- [37] Wright N J, Barlow M J, Greimel R, Drew J E, Matsuura M. *Highlights of Astronomy*, 2010, 15: 813
- [38] Sabin L, Parker Q A, Contreras M E, et al. *MNRAS*, 2013, 431: 279
- [39] Valdivielso L, Martín E L, Bouy H, et al. *A&A*, 2009, 497: 973
- [40] Aungwerojwit A, Gänsicke B T, Wheatley P J, et al. *ApJ*, 2012, 758: 79
- [41] Steeghs D, Knigge C, Drew J, Unruh Y, Greimel R. *The Astronomer's Telegram*, 2008, 1653: 1
- [42] Corradi R L M, Rodríguez-Flores E R, Mampaso A, et al. *A&A*, 2008, 480: 409
- [43] Morales-Rueda L, Groot P J, Napiwotzki R, Drew J E. *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 2006, 77: 1180
- [44] Burningham B, Pinfield D J, Lucas P W, et al. *MNRAS*, 2010, 406: 1885
- [45] Pinfield D J, Burningham B, Tamura M, et al. *MNRAS*, 2008, 390: 304
- [46] Lodieu N, Pinfield D J, Leggett S K, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 1423

- [47] Goldman B, Marsat S, Henning T, Clemens C, Greiner J. *MNRAS*, 2010, 405: 1140
- [48] Drew J E, Greimel R, Irwin M J, Sale S E. *MNRAS*, 2008, 386: 1761
- [49] Witham A R, Knigge C, Drew J E, et al. *MNRAS*, 2008, 384: 1277
- [50] Smith M C, Okamoto S, Yuan H-B, Liu X-W. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 1021
- [51] Sale S E, Drew J E, Unruh Y C, et al. *MNRAS*, 2009, 392: 497
- [52] Steinmetz M. *Astronomical Society of the Pacific Conf. Series*, 2003, 298: 381
- [53] Høg E, Fabricius C, Makarov V V, et al. *A&A*, 2000, 355: L27
- [54] Steinmetz M, Zwitter T, Siebert A, et al. *AJ*, 2006, 132: 1645
- [55] Zwitter T, Siebert A, Munari U, et al. *AJ*, 2008, 136: 421
- [56] Siebert A, Williams M E K, Siviero A, et al. *AJ*, 2011, 141: 187
- [57] Smith M C, Ruchti G R, Helmi A, et al. *MNRAS*, 2007, 379: 755
- [58] Veltz L, Bienaymé O, Freeman K C, et al. *A&A*, 2008, 480: 753
- [59] Siebert A, Bienaymé O, Binney J, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 793
- [60] Yu J, Sellwood J A, Pryor C, Chen L, Hou J. *ApJ*, 2012, 754: 124
- [61] York D G, Adelman J, Anderson J E Jr, et al. *AJ*, 2000, 120: 1579
- [62] Stoughton C, Lupton R H, Bernardi M, et al. *AJ*, 2002, 123: 485
- [63] Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, Allam S S, et al. *ApJS*, 2007, 172: 634
- [64] Yanny B, Rockosi C, Newberg H J, et al. *AJ*, 2009, 137: 4377
- [65] Rockosi C, Beers T C, Majewski S, Schiavon R, Eisenstein D. (with input from the SDSS-III collaboration), arXiv:0902.3484, 2009
- [66] Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, Allam S S, et al. *ApJS*, 2008, 175: 297
- [67] Abazajian K N, Adelman-McCarthy J K, Agüeros M A, et al. *ApJS*, 2009, 182: 543
- [68] Aihara H, Allende Prieto C, An D, et al. *ApJS*, 2011, 193: 29
- [69] Kafle P R, Sharma S, Lewis G F, Bland-Hawthorn J. *ApJ*, 2012, 761: 98
- [70] Kafle P R, Sharma S, Lewis G F, Bland-Hawthorn J. *ApJ*, 2012, 761: 98
- [71] Maxwell A J, Wadsley J, Couchman H M P, Mashchenko S. *ApJ*, 2012, 755: L35
- [72] Kirby E N, Guhathakurta P, Bullock J S, et al. arXiv:0902.2591, 2009
- [73] Read J I, Pontzen A P, Viel M. *MNRAS*, 2006, 371: 885
- [74] Jofré P, Weiss A. *A&A*, 2011, 533: A59
- [75] Newberg H J, Yanny B, Grebel E K, et al. *ASP Conf. Series*, 2004, 317: 264
- [76] Xue X-X, Rix H-W, Yanny B, et al. *ApJ*, 2011, 738: 79
- [77] Sheffield A A, Majewski S R, Johnston K V, et al. *ApJ*, 2012, 761: 161
- [78] Newberg H J, Yanny B, Rockosi C, et al. *ApJ*, 2002, 569: 245
- [79] Ivezić Ž, Sesar B, Jurić M, et al. *ApJ*, 2008, 684: 287
- [80] Xue X X, Rix H W, Zhao G, et al. *ApJ*, 2008, 684: 1143
- [81] de Jong J T A, Yanny B, Rix H-W, et al. *ApJ*, 2010, 714: 663
- [82] Lee Y S, Beers T C, An D, et al. *ApJ*, 2011, 738: 187
- [83] Yanny B, Newberg H J, Johnson J A, et al. *ApJ*, 2009, 700: 1282
- [84] Cheng J Y, Rockosi C M, Morrison H L, et al. *ApJ*, 2012, 746: 149
- [85] Majewski S R, Wilson J C, Harty F, Schiavon R R, Skrutskie M F. *IAU Symp*, 2010, 265: 480
- [86] Allende Prieto C, Majewski S R, Schiavon R, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2008, 329: 1018
- [87] Majewski S. *Chemical Evolution of the Milky Way*, Bolzano: APOGEE, 2012: 24
- [88] Miglio A, Chiappini C, Morel T, et al. *MNRAS*, 2013, 429: 423
- [89] Abadi M G, Navarro J F, Steinmetz M, Eke V R. *ApJ*, 2003, 591: 499
- [90] Tumlinson J. *ApJ*, 2006, 641: 1
- [91] Gerhard O. *Space Sci. Rev.*, 2002, 100: 129
- [92] Cunha K, Smith V V. *ApJ*, 2006, 651: 491
- [93] Rich R M, Origlia L. *ApJ*, 2005, 634: 1293
- [94] Ness M, Freeman K, Athanassoula E, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 836
- [95] Casetti-Dinescu D I, Girard T M, Herrera D, et al. *AJ*, 2007, 134: 195

- [96] Bovy J, Allende Prieto C, Beers T C, et al. *ApJ*, 2012, 759: 131
- [97] Frinchaboy P M, O'Connell J, Meszaros S, et al. *AAS Meeting*, 2013, 250: 34
- [98] Cui X-Q, Zhao Y-H, Chu Y-Q, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 1197
- [99] Zhao G, Zhao Y-H, Chu Y-Q, Jing Y-P, Deng L-C. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 723
- [100] Zhang Y-Y, Carlin J L, Yang F, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 792
- [101] Hou J L, Zhong J, Chen L, et al. *IAU Symposium*, 2013, 292: 105
- [102] Chen L, Hou J-L, Yu J-C, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 805
- [103] Newberg H J, Carlin J L, Chen L, et al. *ASP Conference Proceedings*, 2012, 458: 405
- [104] Deng L-C, Newberg H J, Liu C, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 735
- [105] Yao S, Liu C, Zhang H-T, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 772
- [106] Zhong J, Lepine S, Hou J, et al. *AJ*, 2013, submitted
- [107] Yi Z, Luo A, Song Y, et al. *AJ*, 2013, submitted
- [108] Li H-N, Zhao G, Christlieb N, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10: 753
- [109] Yuan H-B, Liu X-W, Huo Z-Y, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10: 599
- [110] Huo Z-Y, Liu X-W, Yuan H-B, et al. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2010, 10: 612
- [111] Huo Z-Y, Liu X-W, Xiang M-S, et al. *arXiv:1304.3174*, 2013
- [112] Heijmans J, Asplund M, Barden S, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8446: 90
- [113] De Silva G M, Freeman K C, Asplund M, et al. *AJ*, 2007, 133: 1161
- [114] Zucker D B, de Silva G, Freeman K, Bland-Hawthorn J, Hermes Team. *ASP Conference Proceedings*, 2012, 458: 421
- [115] Freeman K C. *ASP Conference Proceedings*, 2012, 458: 393
- [116] Feltzing S. *Stellar Clusters & Associations: A RIA Workshop on Gaia*. Granada: Workshop on Gaia, 2011: 311
- [117] Jordi C, Carrasco J M. *ASP Conference*, 2007, 364: 215
- [118] Jordi C, Gebran M, Carrasco J M, et al. *A&A*, 2010, 523: A48
- [119] Munari U, Zwitter T, Katz D, Cropper M. *ASP Conference*, 2003, 298: 275
- [120] Hauschildt P H, Allard F, Baron E, Aufdenberg J, Schweitzer A. *ASP Conference*, 2003, 298: 179
- [121] Thévenin F, Bijaoui A, Katz D. *ASP Conference*, 2003, 298: 291
- [122] Gomboc A. *ASP Conference*, 2003, 298: 285
- [123] de Bruijne J H J. *Ap&SS*, 2012, 341: 31
- [124] Ivezić Ž. *Highlights of Astronomy*, 2010, 15: 188
- [125] Gómez F A, Helmi A, Brown A G A, Li Y-S. *MNRAS*, 2010, 408: 935
- [126] Sozzetti A. *EAS Publications Series*, 2011, 45: 273
- [127] Haywood M, Jordi C. *EAS Publications Series*, 2002, 2: 199
- [128] Mignard F, Klioner S A. *IAU Symposium*, 2010, 261: 306
- [129] Fuchs B, Bastian U. *The Three-Dimensional Universe with Gaia*. Paris: ESA, 2005: 573
- [130] Dalton G, Trager S C, Abrams D C, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8446: 12
- [131] Balcells M, Benn C R, Carter D, et al. *Proc. SPIE*, 2010, 7735: 242
- [132] Eyre A, Binney J. *MNRAS*, 2009, 399: L160
- [133] Bensby T, Oey M S, Feltzing S, Gustafsson B. *ApJ*, 2007, 655: L89
- [134] Dehnen W. *AJ*, 2000, 119: 800
- [135] Carollo D, Beers T C, Lee Y S, et al. *Nature*, 2008, 451: 216
- [136] Nissen P E, Schuster W J. *A&A*, 2010, 511: L10
- [137] de Jong R S, Bellido-Tirado O, Chiappini C, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8446: 15
- [138] Cirasuolo M, Afonso J, Bender R, et al. *Proc. SPIE*, 2012, 8446: 9
- [139] Ivezić Z, Tyson J A, Acosta E, et al. *AAS*, 2009, 41: 366

## The Galactic Survey in Optical and Infrared

ZHONG Jing<sup>1,2</sup>, HOU Jin-liang<sup>1</sup>, SHEN Shi-yin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Most of the Galactic baryons are in the form of stars which are mostly distributed in the Milky Way disk and halo. Therefore, large scale stellar survey plays an important role in the study of the Galactic structure and evolution. The most important survey bands are in the optical and near infrared (IR) in which the IR observation is extremely important for the disk and bulge regions since infrared radiation can penetrate through the interstellar dust. By analyzing the data of large scale photometric and/or spectroscopic survey in optical and infrared, one can get key parameters of stars, such as the brightness, colors, coordinates, radial velocities, chemical abundance and so on. These parameters are the basis of mapping the Milky Way structure and tracing the history of star formation and Galactic evolution as a whole.

In this paper, we have summarized the main properties and scientific achievements of some famous Galactic photometric and spectroscopic survey projects. For the photometric survey, we have introduced the 2MASS and UKIDSS in infrared, and SSS, SDSS, IPHAS and XSTPS-GAC/LGL in optical. We have specifically emphasized in the XSTPS-GAC and -LGL projects which are the first large scale photometric surveys in China aiming at tracing the structure of the Milky Way disk. The XSTPS-GAC is carried out with the Xuyi 1.04/1.20 m Schmidt Telescope and SDSS g, r, i filters. From the year of 2009 to 2011, the survey has imaged a sky area of over 6000 sq.deg centered on the Galactic Anti-center, and generated a point source catalog containing about  $1.0 \times 10^8$  stars on the Galactic Anti-center. The survey reaches a ten-sigma detection limit of about 19 mag, with a photometric accuracy about 1%~2% for a single frame. After combining all frames, the final astrometric accuracy is expected to be about 0.06''.

For the spectroscopic survey, we introduce the RAVE, SEGUE, APOGEE, LEGUE, and HERMES survey projects. We concentrated on the LEGUE project, which is a survey of millions of stars in the Milky Way disk and halo using the LAMOST (also called Guo Shou Jing Telescope). The survey will obtain spectra for  $2.5 \times 10^6$  halo stars and  $5 \times 10^6$  disk stars. The formal survey has started in the fall of 2012, and have already obtained about one million stellar spectra with enough SNR. The survey is divided into three parts with different target selection strategies: disk, anticenter, and spheroid. The resulting dataset will be used to study the merger history of the Milky Way, the substructure and evolution of the disks, the nature of the first generation of stars through identification of the lowest metallicity stars, and star formation history through open clusters and the OB associations.

---

In addition, we presented some upcoming Galactic survey projects, such as the GAIA project, which aims at compiling a 3D space catalogue of approximately 1% of stars in the Milky Way; the WEAVE, 4MOST and MOONS projects, which are the next generation spectroscopic survey facilities and plans as the GAIA follow-up; the LSST, which can photograph the entire available sky every few nights. All these projects are considered as the most ambitious Galactic survey projects in the next decade.

**Key words:** spectroscopic survey; photometric survey; Galactic astronomy; telescope