

LAMOST 银河系大规模光谱巡天计划的进展和展望*

刘晓为[†]

(北京大学物理学院 天文学系 北京 100871)

LAMOST Galactic spectroscopic surveys

LIU Xiao-Wei[†]

(Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2014-11-28 收到

[†] email: x.liu@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20150402

摘要 大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST, 又称郭守敬望远镜)是一台新型准中星仪式反射施密特望远镜。其有效口径4 m, 视场20平方度, 配备了16台摄谱仪和4000根光纤, 可同时获取至多4000个天体的光谱。光谱覆盖为370—910 nm, 分辨率为1800。为期5年的LAMOST银河系大规模恒星光谱巡天计划已于2012年秋启动, 计划获取超过700万条恒星光谱, 截至2014年6月已获得超过300万条光谱。文章简要回顾了银河系研究的重要性和现状, 介绍了LAMOST银河系光谱巡天计划的科学意义和目标, 数据采集、处理和分析进展以及已获得的初步科研成果, 并对LAMOST银河系光谱巡天计划的未来进行了展望。

关键词 银河系, 光谱巡天

Abstract The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST, also named the Guo Shou-Jing Telescope) is an innovative quasi-median reflective Schmidt telescope with an effective aperture of 4 m. It is equipped with 16 spectrographs fed by 4000 optical fibers distributed in a field of view of 20 sq.deg. The spectral range covers the optical wavelengths from 370—910 nm at a resolving power of 1800. The LAMOST Galactic survey was initiated in the fall of 2012. It is expected to collect over 7 million spectra over a five-year period. So far, over 3 million spectra have been collected. In this article, I will briefly review the importance and current status of studies on our Milky Way Galaxy, and then present an overview of the scientific motivation, target selection, survey progress, and data collection and reduction, as well as the early scientific results and future prospects of the surveys.

Keywords the Milky Way, spectroscopic surveys

1 银河系大规模光谱巡天及其重要科学意义

星系是宇宙的基本结构单元。阐释星系的集成历史, 理解星系形态、结构和性质的规律性以

及多样性, 是21世纪天体物理学的重大问题。在当下通行的暗能量与冷暗物质(Λ CDM)主导的宇宙学框架下, 宇宙的大尺度结构, 包括星系自身, 是通过并合、吸积较小尺度结构, 自下而上逐级增长而形成的。虽然这一理论获得了一系列观测及数值模拟结果的支持, 但宇宙结构形成过程中仍然包含许多目前知之甚少、异常复杂的物

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB845700)资助项目

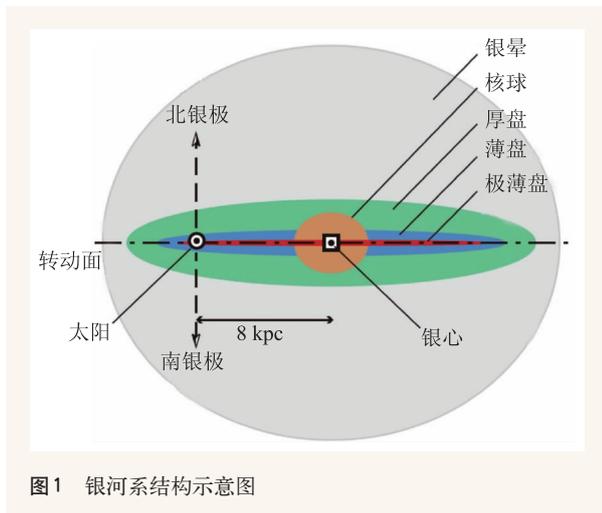


图1 银河系结构示意图

理及天体物理过程(如恒星形成、演化及其反馈效应)。通过对近邻可解析星系的精细研究以及对大样本遥远星系相对粗略的统计分析,经验地揭示星系集成历史和相关物理、天体物理过程和规律,这对深化对星系形成和演化过程的认识具有重要意义。

根据星系的哈勃分类,星系分为椭圆星系、旋涡星系(盘星系)和不规则星系。旋涡星系又分为正常旋涡星系和棒旋星系。银河系是一个正常大小的典型棒旋星系(见图1),它由富含气体尘埃、旋转支撑的年轻盘,年老无规运动(压强)支撑的晕,以及中心核球(以及棒)等主要恒星成分组成。发光的恒星成分处于一个暗物质晕里。银盘是银河系恒星分布的主体,包含了银河系90%的重子物质及绝大部分角动量,是恒星形成及星系动力学演化的主要场所。银盘的研究对理解银河系整体的形成和演化具有重要意义。

银河系是唯一可以将其星族组成解析为单体,并对其在包括三维空间、三维速度以及化学元素丰度的多维相空间中进行细致研究的旋涡星系。然而,由于观测者身处其中,银河系数千亿颗恒星散布在全天 4π 立体角里(约4.12万平方度),对那些数万亿计的恒星进行高精度的距离测量十分困难,位于银盘的绝大多数恒星还受到显著的星际尘埃消光、红化的影响。大量观测证据表明,银河系仍处于集成过程中,还在不断吸积、吞并外来(矮)星系和星团,存在大量并合、

吸积过程中因潮汐相互作用而形成的星流等(不对称)子结构。因此,要全面解析和揭示银河系的三维空间结构、运动、物质(包括重子和暗物质)分布、星族和星际介质的化学及动力学性质及其随时间的演化,必须开展覆盖全天的大规模光谱巡天。这是一项超出现有天文设施能力、极为艰巨的计划。问题的复杂性和艰巨性使得针对银河系的大规模巡天计划的开展远远滞后于河外星系(后者在一定程度上受益于宇宙大尺度结构的均匀各向同性),这在某种程度上直接导致了我们对银河系的认识还不及对可观测宇宙的整体认识。银河系大规模光谱巡天的缺失使得关于银河系形成演化的一些重要基本问题至今尚无定论,如从银晕到银盘的形成过程是否连续?厚盘和薄盘是两个完全不同的结构子系,还是同一成分连续演化过程中呈现的两种极端情况?薄盘和厚盘是如何形成的?等等。

近十年来,已有一些大型巡天项目相继开展。这些项目的开展深化了我们对银河系的认识。其中在国际上产生了重要影响的代表性的巡天计划有GCS^[1], SDSS/SEGUE^[2,3], RAVE^[4], APOGEE^[5]和HERMES^[6]。

历经十年观测,斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)I期和II期完成了全天约1/4天区(主要是高银纬区域)近12000平方度,整体测光精度达到1.0%—1.5%,极限星等约22星等,覆盖全光学波段的CCD五色测光资料,同时还取得了近100万个星系、12万颗类星体、50万颗恒星的低色散($R \sim 1800$)光学光谱。SDSS提供的史无前例的海量高精度测光数据,使得我们对银晕的认识有了质的提高,获得了一系列重要结果,如发现了大量银晕中的矮星系以及银河系吸积、并合矮星系、星团残留下的大批潮汐碎片(星流)等子结构,为 Λ CDM框架下星系自下而上逐级集成的形成和演化模式提供了生动有力的证据。然而,作为一个以高银纬天区为主要观测区域,河外星系、类星体为观测对象的巡天计划,同时受制于SDSS测光巡天的星等范围(亮于14星等的恒星在SDSS测光巡天中饱和),SDSS对银盘的采

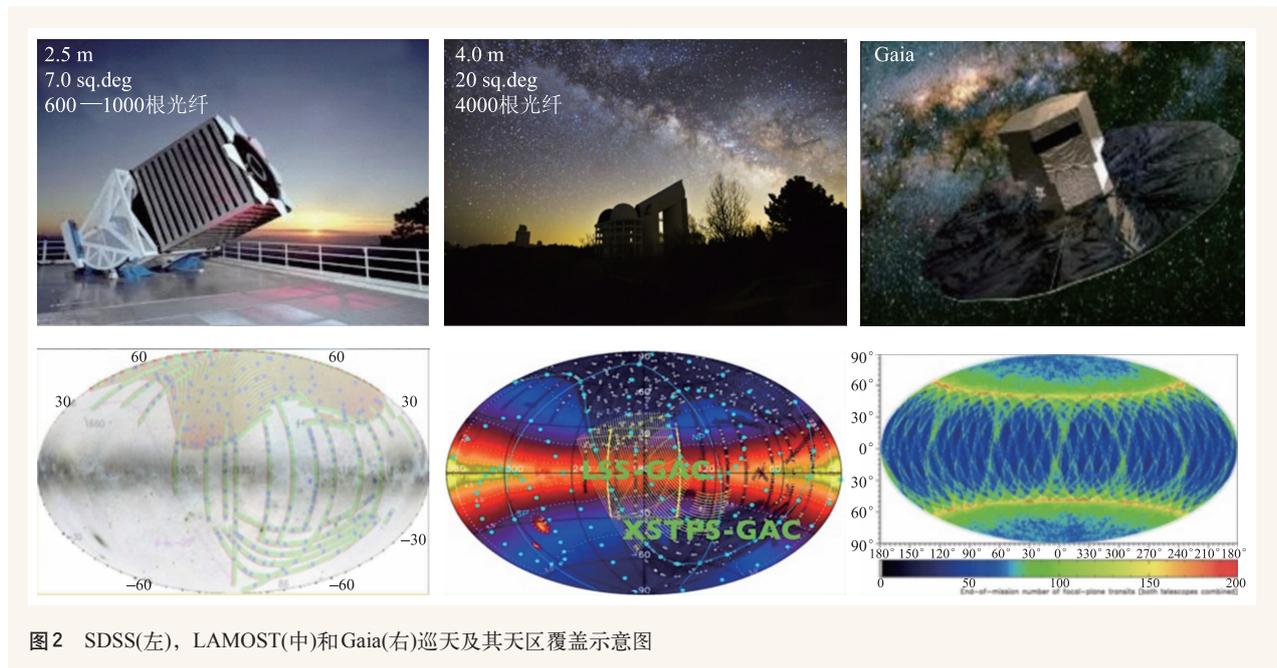


图2 SDSS(左), LAMOST(中)和Gaia(右)巡天及其天区覆盖示意图

样微乎其微(见图2)。即使是SDSS II期银河系研究扩展项目:斯隆银河系研究与探索扩展巡天计划(Sloan Extension of Galactic Understanding and Exploration, 缩写为SEGUE),也只是对十几条互不相连的穿越银盘的窄带做了测光观测。受有限观测时间和光纤数目(640根)的制约,虽然SEGUE和SEGUE-II获得了400个观测面板近24万颗恒星的光谱数据^[3],但这些恒星散布在一个个分离的铅笔束里,类型多达十多种,遴选判据复杂,带有很强的选择效应,难以开展有意义的统计分析工作。

RAVE光谱巡天的目标是获取南天百万颗恒星的视向速度,以研究银河系的结构和动力学演化。RAVE观测深度 I 相对较浅(9星等 $<I<12$ 星等),且天区分布在 $|b|\geq 25^\circ$ 的高银纬区域。SDSS III期子项目APOGEE计划获取10万颗 $H<12.5$ 星等晚型巨星的高分辨近红外光谱,研究银河系内部区域的动力学结构和化学增丰历史。刚刚启动的HERMES巡天将对有限数目的亮星开展高分辨光谱观测,获取详细的恒星元素丰度信息,研究银河系恒星形成和化学增丰历史。

具有银河系整个恒星星族普查意义的是2013年底升空的欧空局新一代天体测量卫星Gaia^[7]。Gaia将对全天进行多历元的测光和低分辨光谱观

测。Gaia位置测量精度高达10微角秒。除了给出前所未有的约十亿颗恒星的三角视差和自行之外,还将得到1.5亿颗深至16星等恒星的视向速度和几百万颗深至12星等恒星的大气参数。

综上所述,目前还没有一个针对银河系,尤其是针对其标志性结构银盘的天区覆盖连续、统计上完备的大规模光谱巡天。在Gaia数据大约2020年释放之前,LAMOST银河系巡天将是国际上最具竞争力的大规模银河系光谱巡天计划。即使在Gaia升空后,LAMOST的极限星等($r=17.8$ 星等,少量天区可达18.5星等)仍比Gaia的光谱观测能力深2—3个星等。

2 LAMOST银河系光谱巡天计划

新型大视场兼大口径光学天文望远镜LAMOST^[8](又称郭守敬望远镜)是我国自主创新研制的具有国际竞争力的首台天文大科学装置,能同时获取最高4000个分布在20平方度视场里天体的全光学波段(370—900 nm)中低色散($R\sim 1800$)光谱。LAMOST的光谱获取率是SDSS I期、II期(2000—2009年,640根光纤)的6.25倍,III期(2010—,1000根光纤)的4倍。LAMOST的建成为我国开展银河系大规模光谱巡天,研究银河系

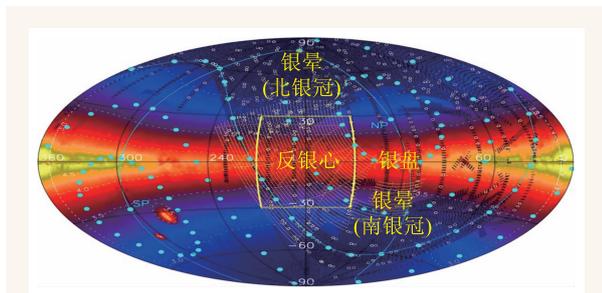


图3 LAMOST银河系巡天包括银晕天区、反银心天区、反银心天区外低银纬(银盘)区域三部分^[11, 12]

的结构、形成和演化,并在世界上相关领域占有一席之地提供了极为难得的、重要的历史机遇^[9-11]。

LAMOST于2009年通过国家工程竣工验收。随后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角秒,基本达到了观测需求。通过引入宽度为光纤直径(3.3角秒)2/3宽度的狭缝(即2.2角秒),使LAMOST 16台摄谱仪的光谱分辨本领达到1800,与SDSS巡天接近。狭缝的引入虽然使进入光纤的星光损失20%,但因此提高的谱分辨率对可靠测量恒星视向速度及大气参数(有效温度、表面重力加速度、金属丰度)具有重要意义。

为检验国内外天文学家提出的各项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。根据先导巡天积累的经验和数据,LAMOST光谱巡天可实现的较为实际的极限星等约为 $r=17.8$ 星等,少量天区可达 $r=18.5$ 星等。

LAMOST $r=17.8$ 星等的大规模光谱巡天极限星等与SDSS获得的大部分恒星光谱的极限星等相当,比欧洲空间项目Gaia的分光观测极限星等(15—16星等,依赖于光谱类型)深约2个星等。Gaia已于2013年12月发射升空,完成整个巡天计划并释放全部数据至少要等到2020年。作为新一代空间天体测量卫星,Gaia将提供数以亿计的银河系恒星高精度测光数据、三角视差和自行。正如LAMOST巡天科学计划国际评估委员会主席Richard Ellis指出的,LAMOST与Gaia一道,将成为未来十年推进银河系研究的最重要的天文观测设备(见2009年5月的《LAMOST巡天科学计

划国际评估委员会报告》)。

在充分分析LAMOST实测性能指标及积累的观测数据的基础上,结合LAMOST所处兴隆观测站地理位置及天文气候条件,LAMOST科学委员会确立了以大规模银河系光谱巡天及多波段天体光谱证认为核心科学目标的巡天计划。LAMOST正式巡天计划已于2012年秋启动。

LAMOST银河系光谱巡天计划包括(见图3): (1)银晕天区,银纬 $|b| \geq 20^\circ$; (2)反银心天区, $|b| \leq 30^\circ$,银经 $150^\circ \leq l \leq 210^\circ$; (3)反银心天区外低银纬区域,主要观测目标为疏散星团及恒星形成区成员星。作为最有可能完成的LAMOST巡天重点课题的银河系反银心天区巡天计划(LSS-GAC),有望在5年时间内,在反银心方向3438平方度连续天区内($|b| \leq 30^\circ$, $150^\circ \leq l \leq 210^\circ$),获得探测深度达到 $r=17.8$ 星等(少量天区达到18.5星等)约225万条每像素信噪比大于10的恒星光谱。样本将包含分布在薄盘、厚盘、晕及其过渡区域各类恒星,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,为开展银河系特别是银盘的系统研究提供极好的、具有传承价值的样本。此外,利用亮月夜观测时间,LAMOST还将取得不少于150万条9—14星等亮星的光谱。

为配合LAMOST银河系光谱巡天计划的开展,为LAMOST反银心方向光谱巡天提供高质量输入星表,2009年秋,我们利用盱眙施密特望远镜开展了反银心方向CCD多色测光巡天。这是基于我国自主设备完成的首个大天区测光巡天。历时两年,盱眙施密特望远镜多色测光巡天获得了反银心方向约6000平方度以及M31和M33天区约1000平方度 g, r, i 三色CCD成像观测数据,取得了约一亿颗恒星的位置和测光数据,定位精度为0.1角秒,测光精度为2%,极限星等为19星等^[11, 13, 14]。

LAMOST正式巡天计划已于2012年9月启动,预计5年完成。截至2014年6月,LAMOST已获取超过323万条信噪比达标(≥ 10)的恒星光谱。这已是目前国际上规模最大的恒星光谱数据库。到2017年夏巡天计划结束时,LAMOST将获取不少于700万条恒星光谱。图4给出了LAMOST

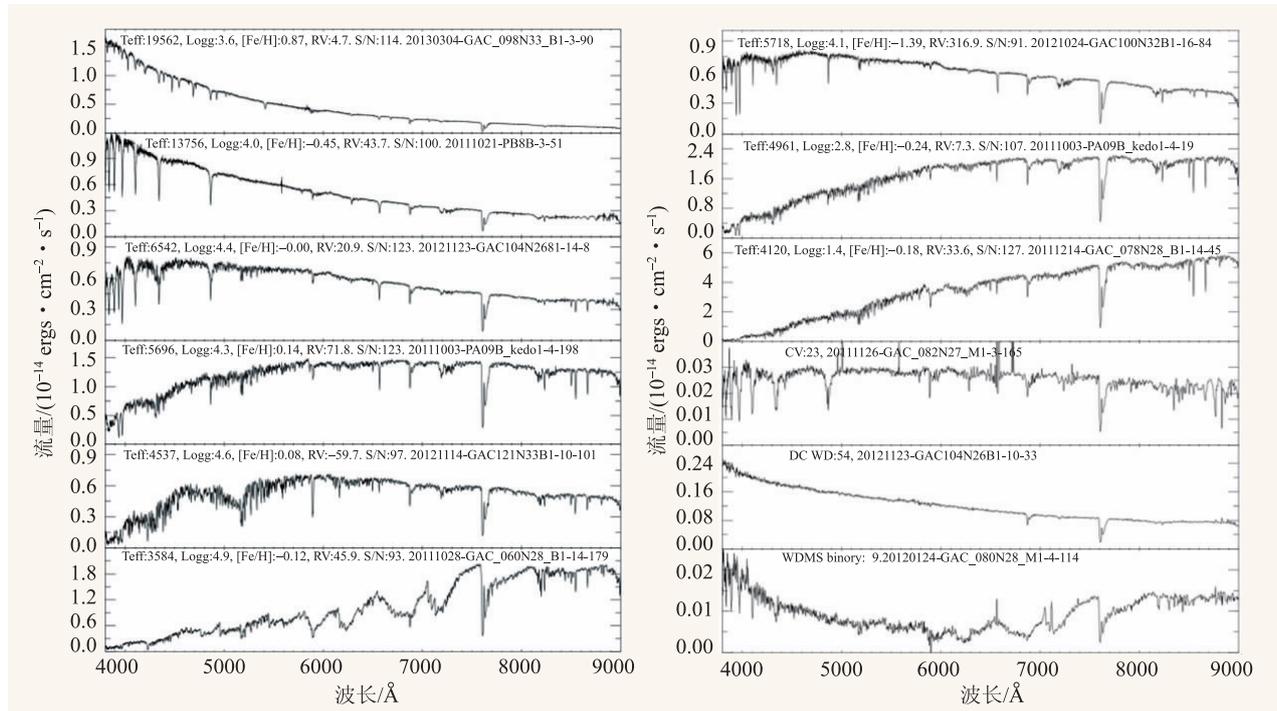


图4 LAMOST获取的光谱实例(左边为普通类型恒星光谱, 右边是一些特殊类型恒星光谱)^[12]

获取的一些典型光谱类型恒星的例子。

LAMOST 光谱数据的分析将提供数以百万计恒星的高精度视向速度及恒星大气基本参数(包括有效温度 T_{eff} , 表面重力加速度 $\log g$, 金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$, α 元素与铁元素丰度比 $[\alpha/\text{Fe}]$)数据库。结合盱眙光学波段测光巡天及国际上其他光学(如SDSS, IPHAS, UVEX), 红外(如2MASS, WISE), 紫外(如Galex)巡天计划获取的测光数据, LAMOST大样本恒星光谱参数数据库将为研究银晕结构, 银盘星族, 星际介质分布及其化学、动力学性质, 银河系物质分布等基础前沿问题提供重要的基础性数据。

不仅如此, 将LAMOST巡天光谱数据与Gaia将获取的数以亿计银河系恒星的高精度的视差和自行信息相结合, 将给出恒星的三维空间位置和速度、轨道参数及恒星年龄等, 从而得到银盘中各有关星族恒星的六维运动学参数(位置和空间速度)以及在化学丰度空间的分布等极其宝贵的信息。这些信息不仅为揭示银河系的结构/子结构提供了基础性数据, 还可由此追溯这些结构/子结构的形成机制及其动力学、化学演化历史, 其结果势必为银盘乃至整个银河系的形成机制和演化模

型提供细致可靠的观测依据和约束条件。

通过LAMOST大规模银河系光谱巡天计划及科学分析, 我们期待在以下银河系研究核心关键科学问题上取得重要进展和标志性成果: (1)取得覆盖银盘和银晕一个相当大体积、包含数百万颗恒星的光谱巡天样本, 实现在天区覆盖、巡天体积和采样密度上的重大突破; (2)描绘银盘星族、星际介质三维空间结构、恒星运动及金属丰度分布, 揭示银盘恒星形成和化学增丰历史及长期演化对银盘结构和性质的影响; (3)阐明吸积和并合对银晕星族的贡献率, 厘清银晕在相空间是否存在更多、更复杂的结构; (4)构建银河系引力势和物质分布, 澄清太阳附近是否存在暗物质空洞; (5)发现和研究一批具有特殊价值的多波段天体。计划的实施将培养一批实测和理论天体物理学家, 为我国在相关领域跻身世界先进行列作出重要贡献。

3 LAMOST 光谱巡天观测样本的选取及光谱数据的处理和分析

虽然LAMOST可一次同时获取20平方度视

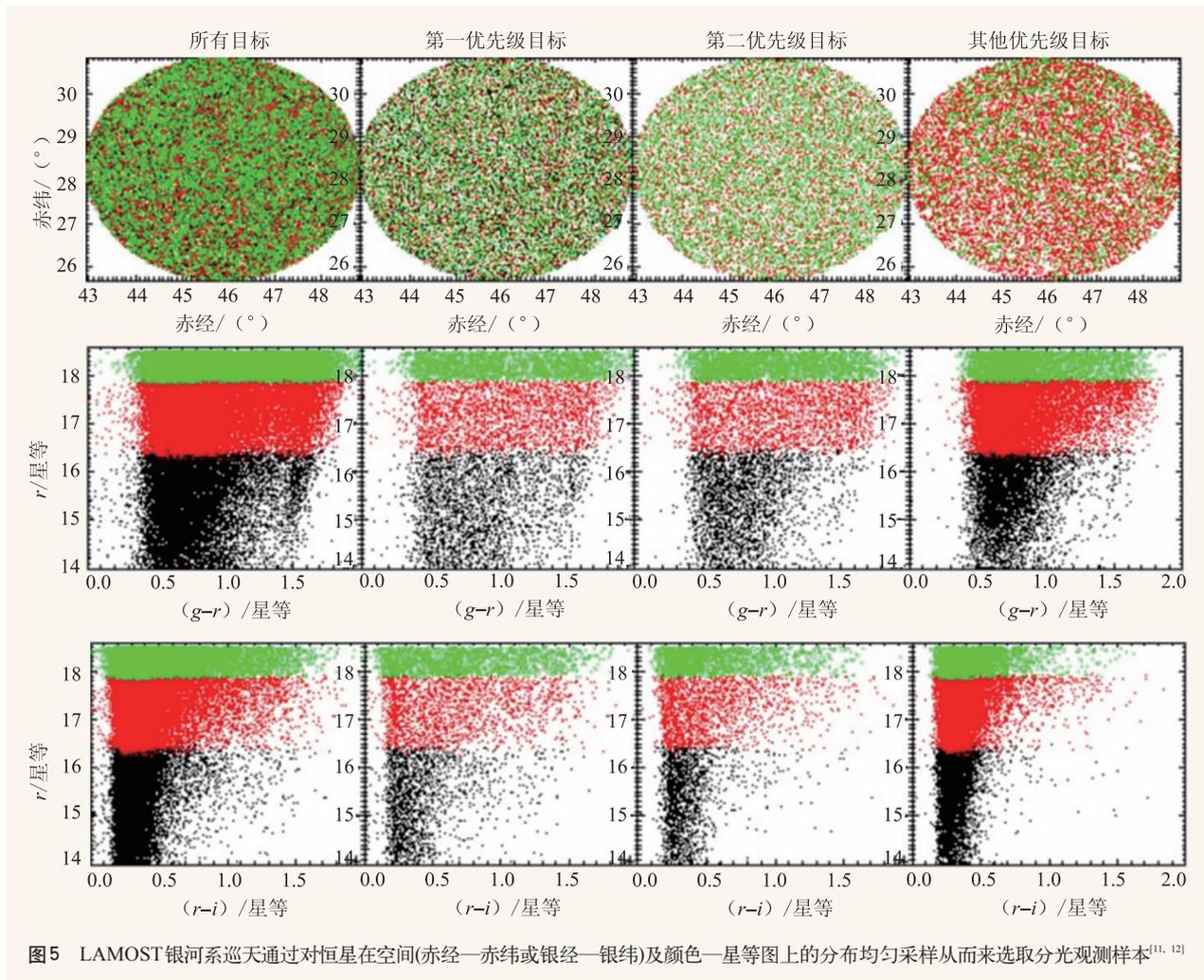


图5 LAMOST银河系巡天通过对恒星在空间(赤经—赤纬或银经—银纬)及颜色—星等图上的分布均匀采样从而来选取分光观测样本^[11, 12]

场范围内近4000颗恒星的光谱，5年的LAMOST巡天计划依然只能对银河系数以千亿计恒星的极少一部分(不到万分之一)实现光谱观测，因此有必要开展选源。选源的基本目的就是要采用尽可能均匀一致的方法选取银河系中存在的各类恒星，获得尽可能多的、天区覆盖连续的具有代表性和统计意义的样本。为此，LAMOST采取了对恒星在空间(银经—银纬)及颜色—星等图上的分布均匀采样选取观测样本的方法^[11, 12](见图5)。该方法的优势是，一方面它相对简单，可以通过用于选样的测光样本去研究LAMOST已观测和发现的不同类型恒星的星族分布和性质。另一方面，银河系中那些颜色偏蓝(如白矮星)或偏红的天体(如红巨星或红团簇星)，由于其数量较少，将被悉数或尽可能多地被观测，而那些数目众多的

FGK星主序星(矮星)，仅部分、然而统计上依然显著可观的源获得观测。该选源方案不仅使对LAMOST已观测和发现的各类天体开展统计研究成为可能，同时也为发现特殊类型(如超速恒星、极端贫金属星、各类双星、白矮星及恒星级黑洞候选体)或新类型天体提供了广阔的空间。

为了更有效地利用不同观测条件(大气透明度、视宁度、月光强度)的观测时间，LAMOST的观测源面板按被观测源的星等范围分为亮源($14.0 \text{ 星等} \leq r \leq 16.3 \text{ 星等}$)、中等亮度源($16.3 \text{ 星等} \leq r \leq 17.8 \text{ 星等}$)和暗源($17.8 \text{ 星等} \leq r \leq 18.5 \text{ 星等}$)面板。亮月夜由于很高的天光背景，主要用来观测极亮源($9.0 \text{ 星等} \leq r \leq 14.0 \text{ 星等}$)面板。受兴隆站观测条件的制约，仅有少量天区的暗源面板有可能得到观测并获得足够信噪比的光谱。由于不同光

谱型或光度型的恒星内禀光度的差异, 因此同一观测极限星等下, 不同光谱型或光度型恒星的探测深度不同。如上所述, $r=17.8$ 星等是 LAMOST 银河系巡天较为实际的极限星等。对这一极限星等, LAMOST 观测样本的探测深度从数百秒差距(如 M 型矮星)到数千秒差距(如 FGK 型矮星), 到数十千秒差距(如红巨星)。

将 LAMOST 获取的海量光谱数据应用于银河系研究, 首先需要从这些光谱数据中提取相关的物理信息, 包括恒星光谱分类、视向速度及恒星大气基本物理参数。

SDSS /SEGUE^[3] 获得了数条贯穿银道面的测光数据以及 400 多个观测面板约 20 万颗恒星的光谱。为此 SDSS/SEGUE 开发了 SDSS 恒星参数流水线(SEGUE stellar parameters pipeline, SSPP^[15, 16])。该流水线包含测量恒星基本参数(视向速度及大气参数, 包括有效温度、表面重力加速度、金属丰度)的多种分析方法和结果, 并根据每种方法的适用范围和结果的可靠性, 加权平均给出每个观测源的基本参数“推荐”值。然而, 对 SDSS 释放的数据(见第九版 SDSS 数据库 DR9)的分析表明, SSPP 给出的恒星大气参数“推荐”值存在较为严重的系统差, 极有可能系统地高估了恒星有效温度, 低估了表面重力加速度。不仅如此, 由 SSPP 恒星大气参数“推荐”值绘制的恒星 $\log g - T_{\text{eff}}$ 图(即赫罗图)存在虚假的恒星分支。这些虚假的特征或许与 SSPP 的分析方法主要是通过与恒星理论光谱模板匹配来测量大气参数有关。LAMOST 银河系恒星光谱巡天, 不仅样本规模远大于 SEGUE,

涵盖的恒星类型也远比 SEGUE 宽并且完备得多。为了最大限度地发挥 LAMOST 银河系巡天获取的海量恒星光谱的作用, LAMOST 巡天计划有必要发展自己的、针对 LAMOST 数据的恒星参数流水线。为此, 国家天文台“郭守敬望远镜运行和发展中心”罗阿理研究员课题组开发了基于与 ELODIE 实测恒星光谱模板库比对测量恒星基本参数的软件包 LASP^[17, 18]。LASP 对 FGK 型恒星参数的测量获得较好的结果, 其提供的恒星参数通过 LAMOST 官方数据发布释放。如 2013 年 8 月 26 日向国内天文学家及国际合作者释放的 LAMOST 第一版数据库(DR1)包括 LAMOST 在先导巡天及第一年正式巡天获取的 172 万信噪比大于 10 的恒星光谱数据以及基于 LASP 从 108 万条光谱导出的恒星基本参数数据。这些数据已被天文学家用来开展相关研究并取得了初步成果。数据在使用过程中也发现了一些问题, 这些问题将在 LASP 新版及 LAMOST 后续数据发布中得到改进。

除 LASP 外, 北京大学的研究小组也独立开发了基于与 MILES 实测恒星光谱模板库比对测量恒星大气参数的软件包 LSP3^[19](见图 6), 并对所得参数的系统和随机误差进行了详细的分析研究, 定量地给出了测量误差随光谱信噪比及基本参数的变化关系。与 ELODIE 模板库相比, MILES 模板库的优势是所有光谱均用长缝摄谱仪取得, 流量定标精度优于 5%, 且光谱分辨率与 LAMOST 光谱模板相当。鉴于 MILES 光谱模板的低分辨率, LSP3 与 LASP 相同, 使用 ELODIE 模板库测量恒星视向速度。分析表明, 除极端或特殊光谱

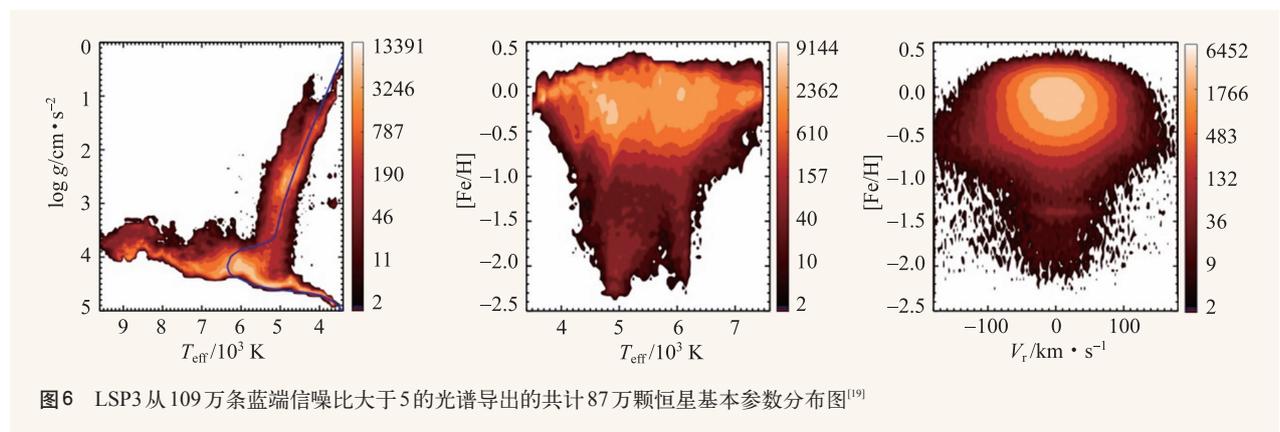


图6 LSP3 从 109 万条蓝端信噪比大于 5 的光谱导出的共计 87 万颗恒星基本参数分布图^[19]

表1 LSP3 恒星大气参数与其他独立测量结果的比较^[19]

	T_{eff}/K	$\log g/\text{dex}$	$[\text{Fe}/\text{H}]/\text{dex}$
LSP3—PASTEL*	23±148	-0.03±0.23	0.05±0.12
LSP3—APOGEE	23±144	0.02±0.39	0.06±0.14
LSP3—SDSS	-102±120	0.23±0.23	0.12±0.15
LSP3—LASP	17±142	0.02±0.23	0.05±0.13

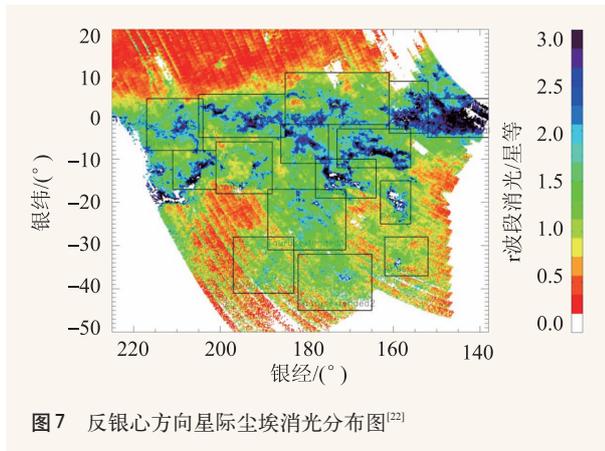
* PASTEL 是一个恒星基本参数精确已知的恒星数据库

型恒星外, 当光谱每像素信噪比高于 10 时, 由软件包 LSP3 给出的视向速度 V_r 、有效温度 T_{eff} 、表面重力加速度 $\log g$ 和金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 的测量精度分别达到 5 km/s、150 K、0.25 dex 和 0.15 dex。对 FGK 型星, LASP 和 LSP3 给出的恒星大气参数相互吻合较好, 证实了 SSPP 系统地高估了恒星有效温度而低估了表面重力加速度(见表 1)。LASP 和 LSP3 的开发, 为 LAMOST 数据的科学应用奠定了坚实的基础。

利用 LAMOST 获取的海量光谱来研究银河系的星族构成、空间分布及其化学动力学性质, 仅有从光谱导出的恒星基本参数是不够的, 还需要这些海量光谱所对应的恒星的距离参数。在 Gaia 能够提供基于几何三角视差方法的海量恒星精确距离之前, 从测光和分光数据入手, 确定恒星的测光和/或分光距离, 是目前获取大量恒星距离参数的主要手段。在理想的情况下, 矮星(即主序星)的测光和分光距离可实现优于 15% 的测量精度。巨星的测量精度要低一些, 一般可达 30%。但对某些特殊类型的巨星, 如红团簇星, 测量精度甚至可高达 5%。精确测量距离, 需要知道待

测源在视线方向受星际尘埃的消光(红化)影响情况。因此, 距离的测量和消光的测量是耦合在一起的。如前所述, 银河系恒星, 尤其是盘星, 受到显著的星际尘埃的消光影响。已被广泛应用的由 Schlegel 等人^[20]从尘埃热辐射导出的二维全天消光图并不适用于盘星。在银盘里, 尘埃与恒星共存, 因此一颗盘星所受的星际消光, 不仅依赖于这颗星所处的方位(银经、银纬), 也取决于其距离。为了精确测量恒星的消光及测光和分光距离, 我们发展了一系列分析手段, 如基于分光的恒星配对方法^[21], 基于恒星多波段能谱分布拟合的方法^[22]等。基于盱眙光学波段 g , r , i 三色测光以及 2MASS 和 WISE 近红外测光数据, 北京大学陈丙秋等人^[22]用多波段能谱分布拟合方法测量了反银心方向 1300 万颗恒星的消光和测光距离, 并以此构建了反银心方向约 7000 平方度天区的星际消光三维空间分布图(见图 7)。消光图角分辨率为 3—9 角分, 探测深度超过 4000 kpc。这是国际上发表的天区面积最大、角分辨本领最高的三维消光图, 为 LAMOST 光谱的后续科学分析提供了重要的消光和距离参数, 同时也为研究星际介质的分布和性质, 如气尘比、一氧化碳与氢分子转化因子(即 X 因子)提供了重要的素材^[23]。由 LAMOST 光谱导出的恒星基本参数以及结合测光、分光数据导出的恒星消光、距离、运动学参数等, 将以 LAMOST 增值星表的形式发布, 提供给所有感兴趣的天文学家研究和使用的^[12](见图 8)。

受现有光谱模板库波长覆盖范围的制约, 目前仅有超过半数的 LAMOST 光谱导出了源的基本参数。对那些颜色偏红的晚型星或受严重消光影响的蓝短光谱信噪比极低而红短光谱达标的的光谱, 无论是 SDSS 的 SSPP 还是 LAMOST 的 LASP 和 LSP3 光谱分析流水线, 目前均无法提取恒星基本物理参数。目前, 基于中国科学院国家天文台 2.16 m 以及中国科学院云南天文台 2.4 m 望远镜, 我们正在实施一项对 MILES 恒星光谱模板库进行大规模扩展的观测计划。计划不仅将扩展 MILES 光谱模板库的参数覆盖范围, 提高模板在参数空间分布的均匀性, 还将模板的光谱红端覆

图7 反银心方向星际尘埃消光分布图^[22]

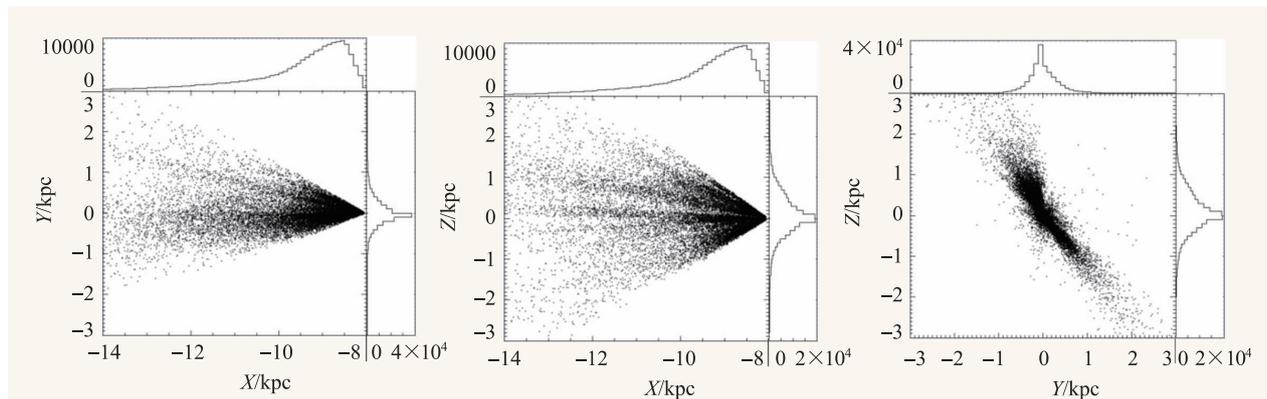


图8 LAMOST反银心方向巡天增值星表第一版给出的主样本空间分布图(太阳位于 $(X, Y, Z) = (-8, 0, 0)$ kpc^[12])

盖范围从 7400 Å 扩展到 9000 Å。目前该计划已获得了数百颗模板恒星的高质量光谱。该计划的完成将极大地提高 LAMOST 恒星基本参数的测量精度以及可测量参数恒星的数目。此外,从 LAMOST 光谱中提取 α 元素与铁元素丰度比 $[\alpha/\text{Fe}]$ 的分析方法也在开发中,有望植入新版 LSP3 流水线,并在 2015 年发表 LAMOST 恒星基本参数增值星表第二版时提供 $[\alpha/\text{Fe}]$ 丰度比,为研究银河系的恒星形成历史和化学演化(尤其是厚盘的性质和起源)提供重要的参考。

4 部分早期科学成果简介

基于 LAMOST 数据的第一批科学成果发表于 2010 年。利用 LAMOST 性能调试和优化阶段获取的数据,发现了一批仙女座大星云中的行星状星云^[24], 类星体^[25-27]以及极端贫金属星候选体^[28]。经过一年先导巡天和两年正式巡天,项目不仅在巡天数据的获取、处理以及恒星基本参数信息提取方面取得实质性进展,基于 LAMOST 数据的科学研究也取得了长足的发展,发表的研究论文呈快速增长态势。自 2010 年至 2014 年,基于 LAMOST 数据发表的科学研究论文数分别为 6, 2, 7, 9, 13 篇。此外还有 20 篇已提交、正在审核(或审稿)的论文。这些论文涉及 LAMOST 新发现的具有特殊性质或研究价值的天体,包括白矮星^[29, 30]、白矮星双星^[31]、超高速恒星^[32, 33]、移动星群^[34]、双活动星系核^[35]和类星体^[36],充分展示了 LAMOST 海量巡天数据巨大的发现能力和空间。

除发现和证认大批具有特殊性质或研究价值的天体外,更为重要的是,随着对 LAMOST 光谱数据分析的深入,尤其是对样本选择函数研究的深入,基于 LAMOST 大样本巡天数据的涉及银河系星族、结构以及化学动力学性质的研究工作开始涌现,并将对银河系形成和演化研究产生重要的推动。下面简要介绍近期完成的几项工作。

4.1 太阳本征速度及本地静止参考系

在星系天文学中,我们把在太阳的位置上绕银河系中心做圆周运动的理想点定义为本地静止坐标系(见图 9(a))。所有恒星相对本地静止坐标系所做的运动称作恒星的本征运动。在实际观测中,所有目标源速度的观测都是相对于太阳的,因此确定太阳的本征速度就成为了定义本地静止坐标系的第一要务,也是研究银河系动力学的起点。

天文学家长久以来都在致力于获得准确的太阳本征速度,但可惜的是不同工作给出的结果并不自洽,特别是在旋转方向上可以差到两倍。一般来说,太阳在垂向和径向的速度是比较好测量的,只要对所用样本在这两个方向上的速度值取平均即可获得。但是对太阳在旋转方向上速度的测量就没那么容易,如果所选样本年龄偏老(如恒星),就需要面临如何改正非对称流效应;如果所选样本年龄偏年轻(如水脉泽),就需要解决如何扣除悬臂对样本速度造成的扰动。Dehnen 和 Binney^[37]利用施特龙贝格关系式^[38]改正了非对称流效应,并给出了后来天文学界沿用了十几年的太阳

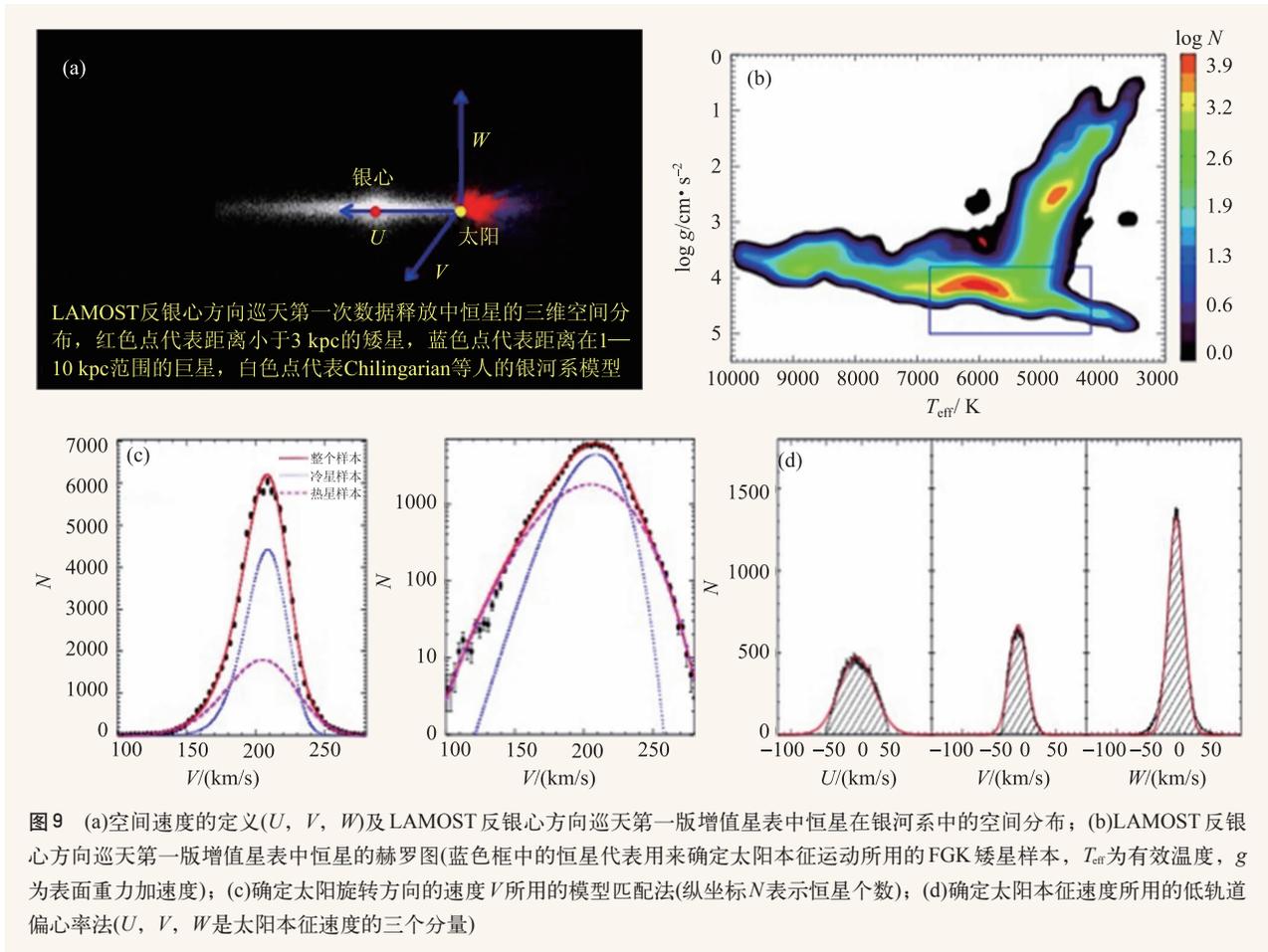


图9 (a)空间速度的定义(U , V , W)及LAMOST反银心方向巡天第一版增值星表中恒星在银河系中的空间分布; (b)LAMOST反银心方向巡天第一版增值星表中恒星的赫罗图(蓝色框中的恒星代表用来确定太阳本征运动所用的FGK矮星样本, T_{eff} 为有效温度, g 为表面重力加速度); (c)确定太阳旋转方向的速度 V 所用的模型匹配法(纵坐标 N 表示恒星个数); (d)确定太阳本征速度所用的低轨道偏心率法(U , V , W 是太阳本征速度的三个分量)

本征速度。但近几年对年轻样本的测量发现,他们给出的太阳在旋转方向上的速度有可能低估了一倍,原因在于他们在改正非对称流效应时所用的施特龙贝格关系式在速度弥散偏小的地方会失效。因此,要利用恒星样本给出准确的太阳本征速度(尤其是沿银盘旋转方向的分量)测量,就需要能准确地考虑非对称流的影响,或者能找到合理的判据,筛选出一个不受非对称流影响的子样本。

北京大学博士研究生黄样等人^[39]从LAMOST反银心方向巡天增值星表第一版中遴选出太阳邻域(600 pc以内)当前最大(近10万颗)的FGK矮星样本(见图9(b)蓝色框中的恒星),在以上两方面都做了尝试来重新确定太阳的本征速度。首先,黄样等人利用解析公式^[40]给出了LAMOST FGK矮星样本在旋转方向上的速度分布(考虑了非对称流的影响),然后移动这个速度分布去匹配LAMOST FGK矮星样本真实观测得到的速度分布,当模型速度

分布与观测速度分布最匹配时,所移动的速度值即是太阳在银盘旋转方向上的本征速度分量(见图9(c))。另一方面,黄样等人基于银河系引力势模型,计算了LAMOST FGK矮星样本的轨道并得到其轨道偏心率。恒星轨道偏心率越小,表明其轨道越接近圆周运动,所受的非对称流效应也自然越小,因此,可以简单地对选出的轨道偏心率偏小的FGK矮星子样本(非对称流效应可忽略)在3个速度方向上取平均值,以此来获得太阳的本征速度(见图9(d))。最终通过这两种方法得到的太阳在旋转方向上的速度在2倍误差内吻合,而且证实了Dehnen和Binney^[37]低估了该值约1倍。此外,基于不同光谱型的子样本所给出的结果也相互一致,充分证明了黄样等人分析方法的可靠性。基于目前这个最大的太阳邻域的FGK矮星样本,黄样等人给出了目前最准确的太阳本征速度值: $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (7.01 \pm 0.20, 10.13 \pm 0.12, 4.95 \pm 0.09) \text{ km/s}$ 。

4.2 移动星群

移动星群是一些在空间上弥散分布但具有相似运动学特性的恒星的集合。移动星群按照形成机制分为两类：一类是来自于星团的蒸发或者银河系吸积并合矮星系的残骸，这类移动星群被称为共同起源的移动星群，它们的成员星具有相同的年龄、化学组成和运动学性质；另一类是由银河系中心棒或者银河系旋涡结构长期作用产生的，这些移动星群被称为动态的移动星群。移动星群的探测和起源对于我们理解银河系的形成、结构和演化具有重要意义。宇宙的冷暗物质(Λ CDM)模型预示银河系存在着吸积并合事件，这些事件会产生一些具有共同起源的移动星群，因此这些移动星群可以为 Λ CDM模型提供强有力的观测证据。动态的移动星群研究可以帮助我们理解银河系棒以及旋涡结构的性质。

中国科学院国家天文台副研究员赵景昆等人^[34]利用LAMOST DR1光谱数据，结合其他巡天提供的测光和自行星表，建立了一个包括厚盘恒星以及晕星的样本，计算了样本中恒星的位置以及 (U, V, W) 三维空间速度。利用这个样本在 $(V, \sqrt{U^2+2V^2})$ 空间进行小波分析，发现了一些结构，通过蒙特卡罗模拟，3个结构具有很高的可信度($>3\sigma$ ，图10右下图中的V1, V2和V3)。其中V3($V \sim 180$ km/s)是一个新的移动星群候选体。通过金属丰度以及离心率分析，他们认为这个星群是一个晕流，来自于银河系的吸积并合事件。目前发现的移动星群大多数是动态形成的，位于薄盘、厚盘和银晕中的移

动星群相对较少。这个新晕流的发现充分展示了LAMOST在银晕中探测移动星群的能力。

4.3 太阳近邻恒星整体运动子结构

作为一个典型的盘星系，一般认为银河系物质分布及引力势是轴对称的，银河系盘星在轴对称引力势作用下绕银心公转，在旋转方向之外的另外两个方向上(即径向和垂向)，恒星的净速度为零(考虑到银盘在其长期演化过程中，盘星因受到某些过程(如巨分子云散射)的作用而被加热，恒星在这两个方向上会有一定的速度弥散)。但由于银河系中存在明显的非轴对称结构(如旋臂和中心棒)，恒星的速度场会受到扰动，例如，GCS和RAVE光谱巡天在太阳周围发现了许多移动星群就可能来自这些非轴对称结构的共振^[41]。由于这些非轴对称结构一般存在于盘平面上，产生的扰动通常仅局限于径向和旋转方向上。如果盘星在垂直方向上的速度场也受到了扰动，那么扰动极

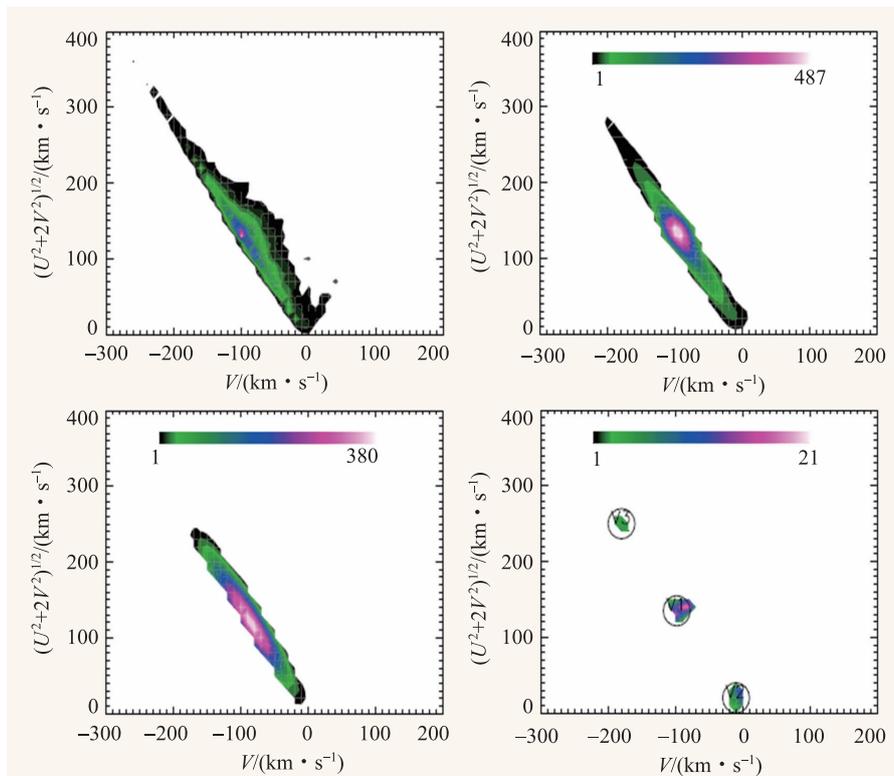


图10 观测样本在 $(V, \sqrt{U^2+2V^2})$ 空间分布(左上); 观测样本的小波系数分布(右上); 模拟样本的小波系数分布(左下); 探测到的3个移动星群(右下)

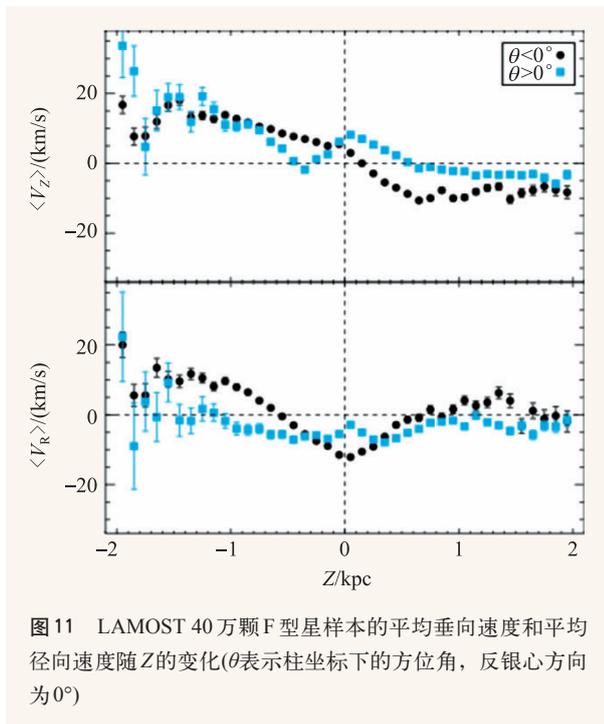


图11 LAMOST 40万颗F型星样本的平均垂向速度和平均径向速度随 Z 的变化(θ 表示柱坐标下的方位角,反银心方向为 0°)

有可能是来自于外部,例如,来自卫星星系或晕子结构的扰动。最近, Widrow 等人^[42]利用SDSS数据发现,太阳附近恒星的数密度和垂向速度在南北方向上都表现出显著的非对称性。随后, Williams 等人^[43]利用RAVE光谱巡天数据发现,在银心距 $6 < R < 10$ kpc范围内,无论是径向速度还是垂向速度,均在南北方向上表现出不对称性。如果以上结果属实,这些速度场不对称结构的存在为研究银河系旋臂、棒的结构、性质及其动力学效应,为研究银盘的吸积并合历史和长期演化提供了重要的手段。

最近,为了独立确认以及更好地理解太阳近邻盘星速度场在南北方向上所表现出的非对称性,美国伦斯勒理工学院 Carlin 等人^[44]从LAMOST光谱巡天数据中遴选出更大的包括近40万颗F型星的样本,其中大部分样本恒星来自反银心方向。对该样本的分析再次证实了恒星径向和垂向速度在南北方向上的非对称性(见图11),并且这种盘在垂向方向上的非对称性很有可能来自星系外部的扰动。目前所有这些工作对尘埃消光(红化)的改正都是基于Schlegel 等人^[20]的二维消光图,其不适用于盘星。对反银心方向银盘三维消

光的测量和分析也表明,尘埃在南北方向上的分布有显著的不对称^[22],因此对太阳近邻盘星速度场的精确测量和分析,还有待对尘埃消光效应做更为可靠的改正,如引入基于分光恒星配对法^[21]的高精度消光测量。

4.4 DA型白矮星光度、质量函数和诞生率

天空中大多数恒星最终都以白矮星的形式结束其演化之路。因此,我们可以称白矮星为“死亡”恒星。当一颗类似太阳的恒星演化到内部的核反应停止,外部的包层被抛出,其内部热的内核就会显露出来,并随着时间的推移而逐渐冷却,最终成为我们所说的白矮星。白矮星的这个冷却过程可用来进行宇宙纪年学的研究,如通过分析白矮星的光度函数来推算银河系的年龄。

得益于近年来的一些大型巡天项目,天文学家们已相继搜寻出了数以千计的白矮星。但是,受选择效应的影响,这些巡天项目倾向于观测白矮星族中较亮的那些样本。因此,目前发现的这些白矮星尚未能代表真实的白矮星族,仅是冰山一角。而LAMOST的LSS—GAC巡天旨在克服这种选择效应,采用了完善而明晰的选择判据,以等概率观测所有类型的白矮星。

北京大学博士后 Rebassa-Mansergas 等人^[45]分析了LSS—GAC巡天中的第一个白矮星样本,通过与前人的研究结果进行比较,他们发现大质量白矮星的数目其实相当多。而单星的恒星演化理论则告诉我们,这些大质量白矮星并不普遍;他们对反银心方向的白矮星族进行了4种不同的数值模拟,发现大质量白矮星的数目很少,这也与他们由LSS—GAC观测数据得出的结果不符(见图12)。因此他们推断,相当一大部分的大质量白矮星事实上是由一种密近双星系统——双白矮星并合的结果。如果他们的推论成立,那么银河系中双白矮星的并合率将会比前人预期的高很多,该发现可能会对宇宙学中意义非凡的Ia型超新星的形成研究有重要影响。

银河系中大量恒星是以双星或多星系统存在的,对白矮星来说,一种常见的双星存在形式就是和小质量主序星——M型矮星组成的白矮—主序双星系统。从观测上搜寻出大样本的白矮—主序双星系统对研究密近双星的演化过程,尤其是公共包层演化的物理机制等有着重要的意义。中国科学院国家天文台LAMOST 团组和北京大学的科研人员合作,采用了一种基于小波变换的方法从LAMOST DR1 的数据中搜寻出121 颗白矮—主序双星,并对它们的光谱进行了双星两成分的分解以及距离、恒星大气参数等信息的测量^[31]。通过对比LAMOST 和国际上另一个大型巡天项目SDSS(斯隆数字巡天)中的白矮—主序双星样本的属性,科研人员发现,与已有的SDSS 白矮—主序双星样本不同,LAMOST 中的白矮—主序双星样本多数位于离太阳较近的距离处(约50—450 pc),且由热白矮星和早型M 矮星组成的双星系统所主导。因此,该LAMOST 白矮—主序双星样本是对目前已有的双星光谱样本的一个重要补充。随着LAMOST 巡天的持续开展,不断增多的LAMOST 白矮—主序双星样本将会在密近双星的公共包层演化研究中体现出其独特的研究价值。

4.5 M31, M33 及其近邻天区背景类星体

仙女座大星云(M31)距离约750 kpc^[46],是本星系群中最重要的成员和离我们最近的典型旋涡星系,是研究遥远星系内部天体物理过程的理想实验室。近期的深度测光巡天揭示出M31 在非常延展的尺度上存在复杂的子结构,有些子结构从M31 一直延伸到距离其约200 kpc 的风筝星云(M33),这很可能是M33 被M31 潮汐力瓦解的遗迹,显示了M31 和M33 复杂的形成与演化历史^[47, 48]。M31 和M33 近邻天区背景类星体的证认和后续观测,为研究M31 和M33 及本星系群的形成和演化提供了重要的手段。首先,背景类星体由于其距

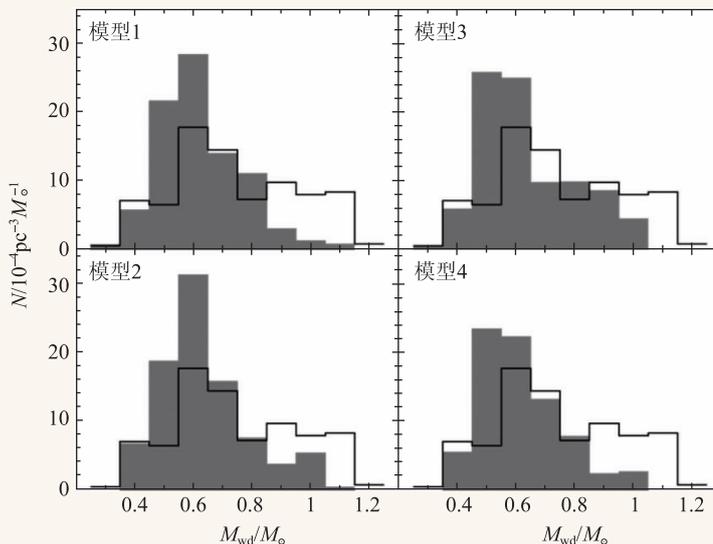


图12 LSS—GAC 巡天中的白矮星样本的质量函数(黑色实线),以及4种不同的数值模拟推出的白矮星质量函数(灰色)。图中纵坐标 N 为白矮星数目,横坐标 M_{wd} 为白矮星质量。可以看出,在白矮星质量大于约0.9 太阳质量时,这4种模型都无法解释LSS—GAC 巡天中大质量白矮星数目多的现象

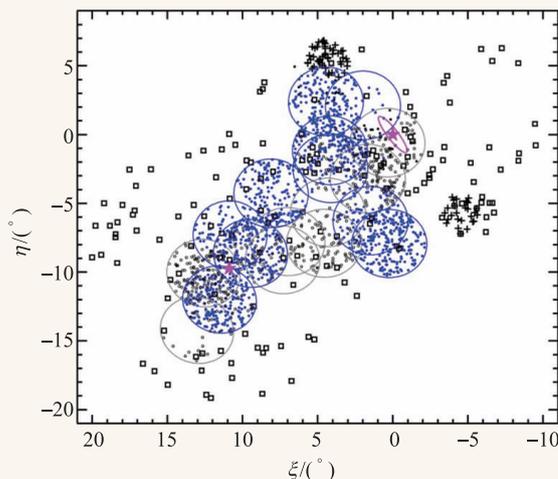


图13 M31 和M33 近邻天区背景类星体空间分布(蓝色实心点代表LAMOST 于2013 年观测季新发现的类星体,灰色空心圆是LAMOST 以前发现的类星体^[25, 36]。十字代表SDSS 发现的类星体,方块代表NED 中列出的已知类星体。紫色星分别标示出M31 和M33 的中心位置;紫色的椭圆标示M31 的光学盘大小, $R_{25} = 95.3$ 角分)

离遥远且亮度很高,可以看作是理想的静止不动的“点光源”,为精确测量M31 和M33 及其近邻潮汐子结构微弱的自行运动提供了理想的参照物。其次,低红移背景类星体光谱的吸收线系统包含M31 和M33 及周围子结构星际和星系际弥散介质分布、化学组成和运动学信息,且探测范围

比传统恒星分光或射电波段采用中性氢 21 cm 谱线观测所能达到的物理尺度更加延展。

北京大学博士后霍志英(现为中国科学院国家天文台副研究员)利用LAMOST对M31和M33近邻天区背景类星体开展了系统的搜寻和证认工作。基于2009年LAMOST性能调试和优化阶段的科学测试数据,发现了14个类星体^[25]。这是基于LAMOST数据发表的首批科学成果之一。随后霍志英等人通过对2010—2011年性能测试和先导巡天阶段获取数据的分析,在M31和M33近邻约135平方度天区内又新发现了500多颗背景类星体^[36]。该项工作曾入选2012年中国十大天文进展。截至2014年5月,LAMOST正式巡天第二年结束,在M31和M33近邻天区发现的背景类星体总数已达到2000(见图13)^[49]。这是我国天文学家基于自主设备获取的观测发现和证认出的最大的类星体样本。

与之前相比,SDSS在M31外晕的两个区域内曾经给出75个类星体;NED网站中列出的M31、M33半径10度内已知的类星体数目为155个;LAMOST在这一天区已发现类星体1908个。这些发现使这一天区内类星体的数目有了非常显著的增长。这些背景类星体是将来测量M31、M33及其周围子结构微弱自行——本星系群研究的重要特征参数——的理想坐标参考系。此外,在新发现的类星体样本中, i 星等亮于17.0/17.5/18.0星等的类星体数目分别由原来的

21/42/64增加到49/108/246个。这些低红移亮类星体是将来研究M31和M33及周围子结构星际介质以及本星系群星际介质性质的极好的样本。

5 结束语

LAMOST银河系光谱正式巡天计划已进入第三个年头,取得了重要的实质性进展。至2014年夏,已获得323万条信噪比大于10的约263万颗恒星的高质量光谱,并从211万条光谱导出了约173万颗恒星的基本参数,包括视向速度、有效温度、表面重力加速度和金属丰度。这是目前国际上规模最大的恒星光谱和参数数据库。LAMOST光谱巡天项目(以及为其提供高质量输入星表的反银心方向盱眙施密特望远镜CCD多色测光巡天计划)的实施,改变了我国无自主大型天文基础数据库的面貌。基于LAMOST巡天数据的研究成果开始涌现,并呈快速上升的态势,发现了一批各种类型的有特殊研究价值的天体(如白矮星、白矮星双星、超高速星、极端贫金属星候选体、移动星群、双活动星系核、类星体),基于大样本精确测量了太阳的本征速度,研究了DA型白矮星的光度、质量函数和诞生率。可以期待,随着巡天计划的进展和数据分析的深入,LAMOST银河系大规模光谱巡天计划必将对银河系星族、结构、化学动力学性质研究产生深远的影响,并极大地促进人们对银河系集成历史和星系的形成演化的认识。

参考文献

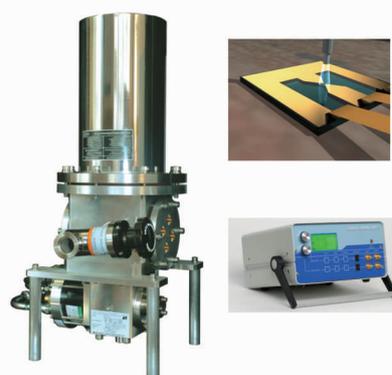
- [1] Nordström B *et al.* *Astronomy and Astrophysics*, 2004, 418: 989
- [2] York D G *et al.* *The Astronomical Journal*, 2000, 120: 1579
- [3] Yanny B *et al.* *The Astronomical Journal*, 2009, 137: 4377
- [4] Steinmetz M *et al.* *The Astronomical Journal*, 2006, 132: 1645
- [5] Allende Prieto C *et al.* *Astronomische Nachrichten*, 2008, 329: 1018
- [6] Freeman K C. *Galactic Archaeology: Near-Field Cosmology and the Formation of the Milky Way*. In: Aoki W, Ishigaki M, Suda T *et al.* eds, *Proc. ASP Conference (Vol. 458)*. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2012, 393
- [7] Perryman M A C *et al.* *Astronomy and Astrophysics*, 2001, 369: 339
- [8] Cui X Q *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 1197
- [9] Zhao G *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 723
- [10] Deng L C *et al.* *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12: 735
- [11] Liu X W *et al.* *Setting the scene for Gaia and LAMOST*. In: Felting S, Zhao G, Walton N *et al.* eds, *Proc. IAU Symp. 298*. Cambridge University Press, 2014. 310—321, preprint (arXiv: 1306.5376)

- [12] Yuan H B *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 448:855
- [13] Zhang H H *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2013, 13:490
- [14] Zhang H H *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14:456
- [15] Lee Y S *et al.* The Astronomical Journal, 2008, 136:2022
- [16] Lee Y S *et al.* The Astronomical Journal, 2008, 136:2050
- [17] Wu Y *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2011, 11:924
- [18] Bai Z R *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, in preparation
- [19] Xiang M S *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 448:822
- [20] Schlegel D J, Finkbeiner D P, Davis M. The Astrophysical Journal, 1998, 500:525
- [21] Yuan H B, Liu X W, Xiang M S. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430:2188
- [22] Chen B Q *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 443:1192
- [23] Chen B Q *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 448:2187
- [24] Yuan H B *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10:599
- [25] Huo Z Y *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10:612
- [26] Wu X B *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10:737
- [27] Wu X B *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10:745
- [28] Li H N *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10:753
- [29] Zhao J K *et al.* The Astronomical Journal, 2013, 145:169
- [30] Zhang Y Y *et al.* The Astronomical Journal, 2013, 146:34
- [31] Ren J J *et al.* Astronomy and Astrophysics, 2014, 570:A107
- [32] Zheng Z *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2014, 785:L23
- [33] Zhong J *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2014, 789:L2
- [34] Zhao J K *et al.* The Astrophysical Journal, 2014, 787:31
- [35] Huang Y *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 439:2927
- [36] Huo Z Y *et al.* The Astronomical Journal, 2013, 145:159
- [37] Dehnen W, Binney J. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1998, 298:387
- [38] Strömberg G. The Astrophysical Journal, 1946, 104:12
- [39] Huang Y *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015, 449:162
- [40] Schönrich R, Binney J. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2012, 419:1546
- [41] Quillen A C *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 417:762
- [42] Widrow L M *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2012, 750:L41
- [43] Williams M E K *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 436:101
- [44] Carlin J *et al.* The Astrophysical Journal Letters, 2013, 777:L5 (Erratum: ApJL, 2014, 784:L46)
- [45] Rebassa-Mansergas A *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, submitted
- [46] McConnachie A W *et al.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 356:979
- [47] Ibata R *et al.* The Astrophysical Journal, 2007, 671:1591
- [48] McConnachie A W *et al.* Nature, 2009, 461:66
- [49] Huo *et al.* 2014, in preparation



Count Photons

超导单光子探测系统
THz & Mid-IR探测系统



- ☑ 时间响应低至 50ps
- ☑ 10 cps 超低暗噪声
- ☑ 高量子效率(高达25%)
- ☑ 标准单模光纤输入
- ☑ 多通道可选



时间相关单光子计数器
德国 B&H 公司 TCSPC 产品

北京鼎信优威光子科技
010-8350 3853
info@dyna-sense.com
www.dyna-sense.com