LAMOST的科技创新

赵永恒

中国科学院国家天文台, 北京 100101

E-mail: yzhao@bao.ac.cn

LAMOST是大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope)的英文简称, 后冠名为“郭守敬望远镜”。LAMOST是由中国天文学家提出天文望远镜创新方案^[1], 并自主设计和研制的一架特殊的主动反射施密特望远镜。

20世纪90年代初, 我国计划筹建一批大型科学工程项目, 用以促进国家战略高技术的发展和基础科研水平的提高。1996年7月, 国家科技领导小组决策启动国家重大科学工程项目, LAMOST列入首批启动项目。作为中国天文界的第一个国家重大科学工程项目, LAMOST于1997年4月由国家批准项目立项, 2001年8月批准项目开工建设, 2008年8月完成全部项目建设任务, 2008年10月16日在国家天文台兴隆观测基地举行LAMOST落成典礼, 2009年6月LAMOST项目顺利通过国家验收。

LAMOST是中国天文学家瞄准国际天文学前沿, 创新性地提出世界上独一无二的、口径最大的大视场望远镜, 提出开展一次同时观测数千个天体的多目标光纤光谱观测, 开拓了国际天文领域大规模光谱巡天的先河。

1 LAMOST的组成

LAMOST由非球面主动反射施密特改正镜Ma、球面反射主镜Mb和焦面仪器等组成。天体的光线入射到Ma镜面上, 经Ma反射到Mb, 再经Mb反射后聚焦到焦面上, 形成天体的像。在直径为1.75 m的焦面上放置了4000根光纤, 观测时将每根光纤对准一个天体, 通过光纤将天体的光传输到16台光谱仪的狭缝上, 经光谱仪分光后由32台CCD(charge coupled device)相机记录下4000个天体的光谱(图1)。

LAMOST整个系统分为光学、主动光学和镜面支撑、机架和跟踪装置、望远镜控制、焦面仪器、圆顶结构、观测控制和数据处理、输入星表和巡天战略等8个子系统^[2], 具体分述如下。

(1) 光学系统。LAMOST的光学系统是由非球面主动改正镜Ma、球面主镜Mb和焦面构成的主动反射施密特系统。非球面主动改正镜Ma由24块对角线长1.1 m、厚度为25 mm的六角形子镜拼接而成, 尺寸为5.72 m×4.40 m; 球面主镜Mb由37块对角线长1.1 m、厚度为75 mm的六角形球面子镜拼

赵永恒 国家天文台研究员、博士生导师, 郭守敬望远镜(Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)运行和发展中心常务副主任, 中国天文学会常务理事。1990年于南京大学获理学博士学位。主要从事天文学和天体物理研究, 包括活动天体的理论研究、高能天体的观测分析、多波段观测、数

据分析技术、天文信息技术以及LAMOST项目的科学研究和工程管理工作。

接而成, 尺寸为6.67 m×6.05 m(图2)。LAMOST的有效通光口径为3.6~4.9 m, 球面主镜的曲率半径为40 m, 望远镜的焦距为20 m, 视场为5°。望远镜光轴与地平呈25°角, 南高北低, 以适应台址纬度和扩大观测天区(图3)。

(2) 主动光学和镜面支撑系统。LAMOST创新地发明了中星仪式主动反射施密特光学系统, 用主动光学技术实时得到在观测过程中用传统方法无法得到的变化非球面面形的施密特改正镜Ma。为了降低造价, 反射施密特改正镜Ma和球面主镜Mb分别采用24和37块六角形子镜拼接的镜面。主动光学技术是LAMOST项目最有挑战性的核心关键技术, 主动光学系统不仅能够实时校正光学系统的球差, 还能校正镜面支撑结构的重力变形、热变形、加工和安装误差。LAMOST的反射施密特改正镜Ma和球面主镜Mb均采用空间桁架作为镜面主体支撑结构。在半球形的支撑桁架上, 每块Ma子镜又有一套二级支撑机构, Ma子镜由34个主动位移促动器和3个定位点支撑并连接于下一级的3个主动位移促动器调节机构之上, 可同时实现薄镜面和拼镜面主动光学技术。每块Mb子镜则采用whiffle-tree机构支撑, 并直接通过主动位移促动器调节机构连接于主体桁架之上。

(3) 机架和跟踪系统。LAMOST的跟踪装置可驱动改正镜Ma和焦面按一定的规律运动, 以使天体的像在望远镜焦面上保持不动。机架和跟踪系统主要由Ma机架和焦面机构组成。

(4) 望远镜控制系统。为提高望远镜的工作效率, 对望远

图1 LAMOST的结构
Figure 1 Configuration of LAMOST

图2 两大拼接镜面
Figure 2 Two segmented mirrors

图3 LAMOST的光学系统
Figure 3 The optical system of LAMOST

镜的控制采用主从式的高速计算机网络控制技术。指向跟踪控制子系统用于控制Ma的高度和方位驱动、焦面板的像场旋转以及依据导星进行校正等,薄镜面主动光学控制和拼镜面主动光学控制子系统用于控制数以千计的力促动器和位

移促动器,实时环境监测和故障诊断子系统用于圆顶控制、风屏通风窗控制、雨露监控和远程监控等。

(5) 焦面仪器系统。主要由4000个光纤定位单元、4000根光纤、16台光谱仪和32台探测器等组成。望远镜收集来自天体的微弱信号,并成像在焦面上,然后通过焦面仪器进行分光、探测和数据记录。由于LAMOST的创新设计,望远镜具有直径5°的大视场,在其焦面上可以容纳多达4000根的光纤,使得LAMOST成为世界上最有威力的多目标光纤光谱系统。

(6) 圆顶系统。由Ma圆顶、Mb基墩塔楼和焦面光谱仪楼三部分组成,其下部是基墩和仪器设备室等建筑,上部安装望远镜本体并有围挡结构。

(7) 观测控制和数据处理系统。LAMOST是一个进行大规模天文光谱观测的望远镜,为了实现这种能力,就需要将观测中的各个环节有机高效地结合起来,形成一个高度自动化的系统,这就是观测控制系统。数据处理系统是对观测到的数据进行处理和分析,观测得到的原始光谱图像经过定标和改正后获得一维光谱,并通过光谱分析程序对已定标的光谱进行分析,获得有用的天体物理信息。

(8) 输入星表和巡天战略系统。建立光谱巡天所需要的星表数据库,并自动化地安排观测计划,以有序的方式来开展巡天观测,确保有效地使用观测时间。

2 LAMOST的技术创新

LAMOST是一架与传统望远镜在设计理念上差异很大的望远镜。为了解决大视场望远镜很难同时兼备大口径这一难题, LAMOST采用卧式中星仪形式,避免了工程上很难实现的超长镜筒;又采用反射施密特光学系统,克服了常规施密特望远镜无法得到大尺寸透射改正镜光学材料的障碍。这一

卧式子午仪式反射施密特望远镜的另一个特点是, 它的反射施密特改正板不仅要承担校正主镜三级球差的任务, 还同时承担对所观测目标跟踪的任务。但是, 新的光学系统又带来了新的矛盾——在跟踪天体过程中, 由于被观测目标光线入射角的变化, 反射施密特改正镜补偿球面主镜球差的非球面面形也要随之变化。通过采用在观测中实时变化非球面面形的施密特改正镜, 即采用薄镜面的主动光学技术, 实现了镜子曲面的连续变化, 很好地解决了这一问题。LAMOST应用主动光学首创了这一传统光学无法实现的光学系统(图4)^[3]。

LAMOST的Ma不仅采用了子镜实时面形变化的薄镜面主动光学技术, 还同时采用了拼接镜面主动光学技术, 在国际上开创了在一块大镜面上同时应用薄变形镜面主动光学和拼接镜面主动光学的主动光学技术。LAMOST还在一个光学系统中采用了两块大的拼接镜面, 并且实现了六角形可变形镜面, 这些技术都属于世界首创。

主动光学技术是当代大型和巨型望远镜的核心关键技术。LAMOST的成功研制, 使我国掌握了薄变形镜面主动光学技术和拼接镜面主动光学技术, 并开始在我国已经研制、即将研制和计划研制的各种望远镜, 特别是在南极天文台昆仑暗宇宙巡天望远镜(Kunlun Dark Universe Survey Telescope, KDUST)和中国大型光学红外望远镜(Large Optical-infrared Telescope, LOT)中得到应用。LAMOST的建成将主动光学技术发展到了新的国际前沿, 为我国自主研发未来巨型光学红外望远镜创造了条件。

LAMOST的另一关键技术——并行可控式光纤定位技术可谓另辟蹊径, 以其独特的优势满足了LAMOST光纤定位的需要^[4]。4000个光纤接收端同时按观测天区天体坐标各自定位, 可以在数分钟内定位完毕, 大大提高了工作效率。每根光纤定位精度优于 $40\text{ }\mu\text{m}$, 相邻的两单元机构工作范围有重合区, 提高了观测效率(图5)。LAMOST创新的光纤定位方法

图4 LAMOST主动光学系统

Figure 4 The schematic of the active optical system in LAMOST

将光纤定位的能力大为提升, 并被国际上数个大规模光谱巡天项目所仿效, 如美国DESI、SDSS-V和日本Subaru/PFS巡天计划均采用与LAMOST相同的光纤定位方式。LAMOST并行可控光纤定位技术可以说是多目标光纤定位的引领者。

LAMOST是集光学、精密机械、电子、自动控制和海量数据处理一体化的现代技术集成系统, 包括 $6.67\text{ m}\times 6.05\text{ m}$ 的主镜和 $5.72\text{ m}\times 4.40\text{ m}$ 的改正镜(由61块 1.1 m 达到衍射极限的高精度六角形光学镜面拼接而成)及其主动支撑、2000多个测量与控制光学镜面的传感器和促动器、 8 m 精密地平式跟踪机架、5维运动的焦面、 6 和 7 m 大镜面支撑结构、近10000只控制电机、4000根光纤(总长 130 km)及其光纤定位单元、16台多目标光纤光谱仪、32台科学CCD相机、4台导星相机、251台控制计算机和80余万行软件代码。LAMOST的视场中心像质小于 $0.2''$, 望远镜指向精度为 $4.9''$, 机架跟踪精度为 $0.3''$, 4000根光纤的重复定位精度优于 $15\text{ }\mu\text{m}$ 。LAMOST在大视场、口径、光纤数三项最重要的天体光谱巡天

图5 LAMOST光纤定位系统。(a) 光纤定位单元在焦面上的分布图;(b) 双回转光纤定位单元的定原理

Figure 5 The fiber positioning system of LAMOST. (a) Distribution of fiber positioning units on the focal surface; (b) principle of double revolving fiber positioning unit

指标上占据国际领先地位。

LAMOST的主要技术创新包括: (1) 在世界上首创镜面形状实时连续变化的光学系统, 突破国际天文界长期以来大视场望远镜不能兼备大口径的瓶颈; (2) 在世界上首创在一块镜面上同时应用薄变形镜面和拼接镜面主动光学的技术, 并开创性地在一个光学系统中同时应用两块大拼接镜面, 将主动光学技术推进到新的前沿^[5]; (3) 在世界上首创分区并行可控的光纤定位技术, 使4000根光纤能快速高精度地对准天体^[6]; (4) 建成世界上最大的多目标光纤光谱仪集群^[7], 发展了海量天文光谱数据处理方法^[8]。LAMOST将多目标光纤光谱观测能力从每次几百个天体提升到几千个甚至数万个天体。

LAMOST的成功建设和运行是我国天文望远镜研制的里程碑, 不仅将我国望远镜研制技术发展到了国际水平, 为研制更大的地面与空间光学望远镜创造了条件, 还大大推动了我国在光学仪器、精密机械、电子技术和自动控制等技术科学领域的发展, 显著提升了我国自主创新能力, 积累了宝贵的技术力量、人才队伍和运行管理经验。

3 LAMOST天体光谱巡天

在通过国家验收之后, 经过两年紧张有序的精密调试和科学试观测, 启动了LAMOST先导巡天。先导巡天自2011年10月24日开始, 到2012年6月24日结束, 共观测401个天区, 获得54万条信噪比大于10的恒星光谱和37万颗恒星参数星表^[8]。从2012年9月起, 为期五年的LAMOST一期正式巡天启动^[9], 到2017年6月一期巡天结束^[10]。

2017年9月, 开展LAMOST中分辨率光谱巡天测试观测^[11], 到2018年6月结束。经过一年测试观测, LAMOST中分辨率巡天策略、观测目标及数据处理能力均已达到巡天要求。2018年9月, LAMOST开启二期光谱巡天, 巡天模式与一期有所不同, 即在亮月夜进行中分辨率光谱巡天^[12], 在暗夜继续开展低分辨率光谱巡天, 计划于2023年6月完成二期光谱巡天工作结束。

2020年6月, LAMOST二期光谱巡天的第二年观测工作结束。经过数月的数据处理及质量分析, 2021年将发布包含先导巡天及正式巡天前8年的LAMOST DR8数据集。DR8数据集中包括低分辨率光谱数据和中分辨率光谱数据两部分, 其中低分辨率观测天区5207个, 中分辨率观测天区964个(图6)。光谱总数达到1714万条, 其中低分辨率光谱1109万条, 中分辨率非时域光谱149万条, 中分辨率时域光谱456万条。此外, DR8发布数据中还包括一个约776万组的恒星光谱参数星表, 其中部分恒星增加了碳、镁、钙等12种化学元素的金属丰度参数, 成为目前全世界最大的恒星参数星表。

LAMOST成为世界上第一个获取天体光谱数突破千万量级的光谱巡天项目, 这对天文学而言是具有划时代意义的里程碑事件。LAMOST率先使人类对天体有缝光谱观测数据提

图6 LAMOST天体光谱巡天的天区覆盖图(2011年10月~2020年6月)。(a) 低分辨率光谱巡天的天区覆盖; (b) 中分辨率光谱巡天的天区覆盖

Figure 6 Sky coverage of the spectroscopic survey of LAMOST. (a) Sky coverage of the spectroscopic survey in low resolution mode; (b) sky coverage of the spectroscopic survey in medium resolution mode

高到了千万量级, 是目前国际上其他巡天项目光谱观测数总和的2倍以上。发布的数据已经被国内外天文学家广泛用于科学研究, 产生了一批高显示度的亮点科学成果, 为中国在大样本天文学特别是银河系结构和演化、恒星物理等诸多研究领域走到国际前沿创建了平台。

4 LAMOST取得的科学成果

自开展巡天以来, 截止到2020年12月, 天文学家利用LAMOST数据已发表科研成果700余篇, 引用7000余次。2017~2020年, 在全球10个口径6 m以上的中大型地面光学望远镜中, LAMOST的科学产出排名第五; 在全球25个主要地面光学望远镜中, LAMOST的科学产出排名第六; 国外天文学家利用LAMOST公开数据发表成果占1/3, 充分体现了LAMOST数据的国际影响力。

目前, 利用LAMOST光谱数据已经在银河系结构与演化、恒星物理研究、特殊天体搜寻等重要前沿领域取得了一系列有影响力的研究成果, 主要成果如下。

4.1 银河系结构与演化研究

(1) 通常认为, 银盘有一个清晰的边界, 这个边界在距离银河系中心大约5万光年处, 该处银盘恒星的数目骤然下降, 如同银盘在此处被切割掉。通过LAMOST这样能够获得数百万条恒星光谱的巡天项目, 开启了银河系结构和演化更加精确研究的新篇章。利用LAMOST数据, 在2017年底发现银河

系具有一个更大的盘,并把银盘直径从之前认识的10万光年扩大到12.4万光年之后,银盘尺寸增大 $1/4$ ^[13]。2018年,研究发现,银河系的盘状结构原来如此巨大,直径大约是20万光年,比传统认识增大了1倍^[14]。

(2) 以前认为,银河系晕的结构特征是一个轴比不变的扁球体。利用LAMOST数据进行恒星计数的分析,确立银河系晕的结构是内部呈扁球状,到外部逐渐转变为球形,而且银晕中恒星的分布从内到外呈单一幂律分布^[15]。

(3) 暗物质是宇宙中最神秘的物质。由于暗物质粒子不参与电磁相互作用,因此它不会发光,天文学上只能通过其产生的引力作用来探测它的存在。使用天文观测对太阳附近的暗物质质量密度进行可靠测量是寻找暗物质粒子、理解暗物质在银河系中分布特点的重要一步。利用精心挑选的LAMOST巡天观测数据,采用假设较少、数学表达简单的垂向金斯方程模型,即垂直于银道面的引力分布与物质密度和恒星速度弥散之间关系的模型,对太阳附近的暗物质密度进行了重新估算^[16],得到了新的结果。

(4) 前人使用各种方法对银河系总质量进行了估计,其估计结果从5000亿太阳质量到2.5万亿太阳质量,相差达5倍。利用LAMOST等观测数据,计算出迄今为止最为精确的银河系旋转曲线并构建了银河系的质量模型,得到精确的银河系总质量为9000亿太阳质量^[17]。

(5) 银河系在形成历史中会吞吃其附近的矮星系,这些合并进来的矮星系会在银河系晕中被拉散形成“星流”,星流的探测对理解银河系的形成、结构和演化具有重要意义。利用大样本的LAMOST光谱数据,在运动学空间中发现了7个源自银河系合并过程的新星流,占国际同类发现总数的一半^[18]。

(6) 因为矮星系的化学成分与银河系的不同,可以在化学空间搜寻来自银河系以外的恒星。利用LAMOST搜寻以及国际大望远镜的后续观测,发现了33颗丰度不同于银河系普通恒星的“低 α 丰度恒星”,数目是国际上发现此类天体的两倍^[19]。首次在银河系中发现了低镁的快中子俘获过程元素超丰恒星,这颗恒星的化学成分与矮星系恒星高度吻合,明显不同于银河系的晕族恒星,表明这颗恒星来自被银河系瓦解的矮星系,是银河系合并事件确切和可靠的化学证据^[20]。

(7) 利用LAMOST数据中K巨星的三维位置和三维速度,在银河系中找到了40余组子结构,包含近2000颗恒星。在这些子结构中,包括大量的人马星流、麒麟星环、室女致密区、孤儿星流等银晕中已知子结构和其他未知子结构的成员星,并第一次给出了银河系晕中大样本子结构的六维参数信息。这些信息更加精确地展现出银河系现在的结构以及其过去的吸积历史^[21]。

(8) 人马星流是人马矮星系受到银河系强大的潮汐作用力瓦解而留下的痕迹。由于这次潮汐瓦解事件是最近几十亿年刚刚发生的,因此它的结构在空间中异常显著,就像一条炫舞九天的赤焰飞龙,由南向北跨过整个银河系。利用LA-

MOST数据中的3万颗M巨星样本,结合Gaia的精确自行数据,第一次在三维空间描绘出人马星流的空间轨道分布,在距离太阳10万秒差距以远追踪到该星流。并且,第一次在能量角动量空间对该星流进行了分析,展示了星流导臂和曳臂的能量角动量差异^[22]。

(9) 利用LAMOST巡天光谱数据并结合Gaia天体测量信息,发现年轻星团中的动力学加工效率非常高,只要几百万年就可以将双星系统破坏得面目全非。这说明,今天看到的场星中的双星统计性质已经不再反映它们原初的样子,而是经过动力学“加工”了的,这就给探索恒星形成的物理机制带来了相当大的挑战^[23]。

4.2 恒星物理和系外行星研究

(1) 基于LAMOST获取的海量恒星光谱数据,从中遴选出了包含近百万颗处于恒星演化主序拐点或亚巨星阶段的恒星样本,得出了这些样本恒星的精确年龄和质量估计,其中近一半恒星的年龄精度达到20%~30%。该样本将具有可靠年龄信息的恒星数量扩大了两个量级以上,而且大大拓展了它们的空间覆盖范围。同时,这些恒星具有三维位置、三维速度、铁元素和 α 元素丰度等信息且选择函数简单明确,为全面揭示银河系特别是银盘的星族、结构、起源和演化提供了独特和关键的数据^[24]。

(2) 利用LAMOST数据测量了近6000颗类太阳恒星的磁活动指数,通过分析所有产生超级耀斑的恒星,发现大约10%的磁场与太阳磁场强度相似甚至更弱,说明太阳的确具有爆发超级耀斑的可能^[25]。

(3) 结合LAMOST的光谱数据和Kepler卫星观测到的凌星光变曲线,得到了近700颗行星的轨道偏心率和倾角的统计分布规律,最终发现,约八成的行星轨道都如同太阳系,轨道为近圆形(平均偏心率小于0.1),只有两成左右的行星偏心率较大(平均值大于0.3)而显著地偏离了圆轨道。研究结果表明,太阳系在宇宙中是具有代表性的^[26]。

(4) 通过分析LAMOST望远镜的数据,为系外行星的重要类型——热木星找到了新的伙伴——热海星。与热木星类似,只有大约1%的恒星附近存在热海星^[27]。

(5) 利用“掩食时变”效应并结合LAMOST和Kepler望远镜数据,发现很多“掩食”行星周围都存在不共面行星,这是轨道共面假说所无法解释的。同时,统计数据传递出了新的多行星系统轨道分布规律:多行星系统中,越少行星的系统里各个行星轨道越不共面,而越多行星的系统里行星轨道越趋于共面^[28]。

4.3 发现黑洞和搜寻奇异天体

(1) 利用LAMOST数据挑选出1万余颗金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0$ 的贫金属星候选体,发布了世界上最大的贫金属星亮源表。这一源表中,80%以上的目标亮于16.5等,非常适合现有

地面观测设备进行高分辨率后续观测^[29]。首次对锂元素丰度异常超高的贫金属星进行了系统搜寻和研究,构建了该类天体的最大样本^[30]。

(2) 超高速星是一类稀有且重要的恒星,极快的运动速度使得它们能够摆脱引力势能的约束而从银河系逃逸,目前世界上已认证的超高速星仅有20余颗。在LAMOST近千万条光谱中,共发现了4颗超高速星,其中1个起源于银盘的超高速逃逸星(hyper-runaway star)^[31~33]。利用LAMOST DR7和Gaia数据发现了591颗高速星,其中43颗能够从银河系逃逸,使高速星的样本翻倍^[34]。

(3) 银河系中大约97%的恒星将最终演化为白矮星。通过观测白矮星,可以提供恒星形成的精确记录,研究银河系演化的历史。这样,利用LAMOST的大规模光谱巡天来寻找和研究白矮星就变得很有优势且有重要意义,现已发现了大量不同种类的白矮星^[35]。

(4) 发现了一颗迄今为止质量最大的恒星级黑洞,并提供了一种利用LAMOST巡天优势寻找黑洞的新方法。这颗70倍太阳质量的黑洞远超理论预言的质量上限,颠覆了人们对恒星级黑洞形成的认知,有望推动恒星演化和黑洞形成理论的革新^[36]。

(5) 发现了一颗奇特恒星,它的锂元素含量超级高,约是同类天体的3000倍,成为目前人类已知锂元素丰度最高的恒星,称得上富锂恒星中的超级“贵族”^[37]。确定了富锂巨星的真实演化阶段,颠覆了传统认知^[38]。基于LAMOST数据并利用国内外望远镜进行随后观测,认证了44颗富锂巨星,这是目前国际上一致性最好、数据量最大的高分辨率富锂巨星样本^[39]。利用LAMOST数据发现了1万颗富锂巨星,是以往所有发现的4倍^[40]。

(6) Oe星是一种非常稀少的天体,从1974年到现在,仅仅发现了13颗Oe星。利用LAMOST数据新发现了6颗Oe星,使Oe星样本增加了近50%^[41]。

(7) OB星是光谱型为O型和B型的早型恒星。利用LAMOST DR5发布的海量光谱数据,补充完善了OB星的详细分类特征;结合谱指数方法,构建了目前国际上同时具有光谱信息的、最大的OB星星表,包含16032颗OB星^[42]。

4.4 星系物理研究

(1) 利用LAMOST对斯隆数字巡天中由于光纤碰撞而没

有光谱观测的星系样本进行补充观测,得到了2400余个星系对。首次精确地测量了近距离星系对的二元光度函数,即不同光度的两个星系构成星系对的概率分布。根据大样本星系对的统计描述,可以在一定程度上反演出星系对的并合过程^[43]。

(2) 类星体是光度最高、释放能量最强的一类活动星系核,它们的光度可以高达普通星系光度的数万倍,是宇宙中最明亮的持续发光天体。利用LAMOST光谱巡天,已经认证了42552颗类星体,其中17128个是被LAMOST首次发现,这为研究类星体光谱变化、发现特殊类星体等研究工作提供了丰富的光谱数据^[44]。

LAMOST的进展和科研成果引起了国际天文界的广泛关注与合作兴趣,共有141所国内外科研院所和大学利用LAMOST数据开展研究工作,其中包括美国、比利时和德国等的著名天文研究机构。随着LAMOST进入中分辨率光谱和低分辨率光谱交替观测的新时代,天文学家将基于LAMOST千万光谱不断刷新人类对宇宙的认知,高显示度的研究成果将会不断涌现,这将极大地推进对银河系及恒星物理等方面的研究。

5 总结与展望

LAMOST是中国天文学家创新发明的新类型望远镜:在国际上首先创新性地应用主动光学技术,实现在观测中光学镜面曲面连续变化,不同瞬间形成不同反射施密特系统的新光学系统,突破了国际上长期以来望远镜大视场与大口径难以兼得的瓶颈。在国际上首先创新性地发明了分区并行可控双回转机器人光纤定位方法和技术,可在很短的时间内使4000根光纤精确对准天体,从而获得4000个天体的光谱。

LAMOST使我国成为在国际上率先开展一次可观测数千个天体光谱的大规模光谱巡天的国家,为我国在国际大样本天文学领域占有一席之地提供了极为难得的、重要的历史机遇。LAMOST数据首次在国际上实现了大规模光谱巡天在天区覆盖、巡天体积、采样密度及统计完备性等方面的重大突破,为开展银河系的系统研究提供了极好的、具有传承价值的样本。随着LAMOST光谱巡天观测的继续开展以及光谱数据的发布,越来越多的天文学家将利用LAMOST光谱数据在各个天文领域开展研究,高显示度的科研成果将如雨后春笋般涌现,从而推动人类对宇宙的进一步认识。

推荐阅读文献

- 1 Wang S G, Su D Q, Chu Y Q, et al. Special configuration of a very large Schmidt telescope for extensive astronomical spectroscopic observation. *Appl Optics*, 1996, 35: 5155–5161
- 2 Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST). *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 1197–1242
- 3 Su D Q, Cui X Q, Wang Y N, et al. Large Sky Area Multiobject Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) and its key technology. In: Stepp L M,

- ed. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1998, 3352: 76–90
- 4 Xing X Z, Zhai C, Du S H, et al. Parallel controllable optical fiber positioning system for LAMOST. In: Stepp L M, ed. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 1998, 3352: 839–849
- 5 Cui X Q, Su D Q, Wang Y N, et al. The optical performance of LAMOST telescope. In: Stepp L M, Gilmozzi R, Hall H J, eds. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2010, 7733: 773309
- 6 Hu H Z, Xing X Z, Zhai C, et al. New type optical fiber positioning unit device for LAMOST. In: Oschmann J M, Stepp L M, eds. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2003, 4837: 548–555
- 7 Zhu Y T, Hu Z W, Zhang Q F, et al. A multipurpose fiber-fed VPHG spectrograph for LAMOST. In: Mclean I S, Iye M, eds. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2006, 6269: 62690M
- 8 Luo A L, Zhang H T, Zhao Y H, et al. Data release of the LAMOST pilot survey. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 1243–1246
- 9 Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. LAMOST spectral survey—An overview. *Res Astron Astrophys*, 2012, 12: 723–734
- 10 Luo A L, Zhao Y H, Zhao G, et al. The first data release (DR1) of the LAMOST regular survey. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1095–1124
- 11 Hou Y H, Tang L L, Xu M M, et al. The LAMOST middle resolution spectrograph. In: Evans C J, Simard L, Takami H, eds. Proceedings of the Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2012, 10702: 107021I
- 12 Liu C, Fu J N, Shi J R, et al. LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan. 2005, arXiv: 2005.07210
- 13 Liu C, Xu Y, Wan J C, et al. Mapping the Milky Way with LAMOST I: Method and overview. *Res Astron Astrophys*, 2017, 17: 96–122
- 14 López-Corredoira M, Allende-Prieto C, Garzón F, et al. Disk stars in the Milky Way detected beyond 25 kpc from its center. *Astron Astrophys*, 2018, 612: L8–L13
- 15 Xu Y, Liu C, Xue X X, et al. Mapping the Milky Way with LAMOST–II. The stellar halo. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 473: 1244–1257
- 16 Xia Q, Liu C, Mao S, et al. Determining the local dark matter density with LAMOST data. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 458: 3839–3850
- 17 Huang Y, Liu X W, Yuan H B, et al. The Milky Way’s rotation curve out to 100 kpc and its constraint on the Galactic mass distribution. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 463: 2623–2639
- 18 Zhao J K, Zhao G, Chen Y Q, et al. Halo stream candidates in the LAMOST DR2. *Res Astron Astrophys*, 2015, 15: 1378–1391
- 19 Xing Q F, Zhao G. Newly discovered alpha-poor stars in the solar neighborhood. *Astrophys J*, 2015, 805: 146–151
- 20 Xing Q F, Zhao G, Aoki W, et al. Evidence for the accretion origin of halo stars with an extreme r-process enhancement. *Nat Astron*, 2019, 3: 631–635
- 21 Yang C, Xue X X, Li J, et al. Identifying Galactic halo substructure in 6D phase space using ~13,000 LAMOST K giants. *Astrophys J*, 2019, 880: 65–79
- 22 Li J, Fellow L, Liu C, et al. Detecting the Sagittarius stream with LAMOST DR4 M giants and Gaia DR2. *Astrophys J*, 2019, 874: 138–146
- 23 Liu C. Smoking gun of the dynamical processing of solar-type field binary stars. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 490: 550–565
- 24 Xiang M, Liu X, Shi J, et al. The ages and masses of a million Galactic-disk main-sequence turnoff and subgiant stars from the LAMOST Galactic Spectroscopic Surveys. *Astrophys J Suppl Ser*, 2017, 232: 2
- 25 Karoff C, Knudsen M F, De Cat P, et al. Observational evidence for enhanced magnetic activity of superflare stars. *Nat Commun*, 2016, 7: 11058
- 26 Xie J W, Dong S, Zhu Z, et al. Exoplanet orbital eccentricities derived from LAMOST–Kepler analysis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 11431–11435
- 27 Dong S, Xie J W, Zhou J L, et al. LAMOST telescope reveals that Neptunian cousins of hot Jupiters are mostly single offspring of stars that are rich in heavy elements. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 266–271
- 28 Zhu W, Petrovich C, Wu Y, et al. About 30% of sun-like stars have Kepler-like planetary systems: A study of their intrinsic architecture. *Astrophys J*, 2018, 860: 101–115
- 29 Li H, Tan K, Zhao G. A catalog of 10,000 very metal-poor stars from LAMOST DR3. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 238: 16–25
- 30 Li H, Aoki W, Matsuno T, et al. Enormous Li enhancement preceding red giant phases in low-mass stars in the Milky Way halo. *Astrophys J*, 2018, 852: L31
- 31 Zheng Z, Carlin J L, Beers T C, et al. The first hypervelocity star from the LAMOST survey. *Astrophys J*, 2014, 785: L23
- 32 Huang Y, Liu X W, Zhang H W, et al. Discovery of two new hypervelocity stars from the LAMOST spectroscopic surveys. *Astrophys J*, 2017, 847: L9
- 33 Li Y B, Luo A L, Zhao G, et al. A new hyper-runaway star discovered from LAMOST and Gaia: Ejected almost in the Galactic rotation direction. *Astron J*, 2018, 156: 87–93
- 34 Li Y B, Luo A L, Lu Y J, et al. 591 High-velocity stars in the Galactic halo selected from LAMOST DR7 and Gaia DR2. *Astrophys J Suppl Ser*, 2021, 252: 3–21
- 35 Guo J, Zhao J, Tziamtzis A, et al. White dwarfs identified in LAMOST DR 2. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 454: 2787–2797

- 36 Liu J, Zhang H, Howard A W, et al. A wide star–black-hole binary system from radial-velocity measurements. *Nature*, 2019, 575: 618–621
- 37 Yan H L, Shi J R, Zhou Y T, et al. The nature of the lithium enrichment in the most Li-rich giant star. *Nat Astron*, 2018, 2: 790–795
- 38 Yan H L, Zhou Y T, Zhang X, et al. Most lithium-rich low-mass evolved stars revealed as red clump stars by asteroseismology and spectroscopy. *Nat Astron*, 2020, doi: [10.1038/s41550-020-01217-8](https://doi.org/10.1038/s41550-020-01217-8), arXiv: [2010.02106](https://arxiv.org/abs/2010.02106)
- 39 Zhou Y, Yan H, Shi J, et al. High-resolution spectroscopic analysis of a large sample of Li-rich giants found by LAMOST. *Astrophys J*, 2019, 877: 104–113
- 40 Gao Q, Shi J R, Yan H L, et al. Lithium-rich giants in LAMOST survey. I. The catalog. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 245: 33–41
- 41 Li G W, Shi J R, Yanny B, et al. New Oe stars in LAMOST DR5. *Astrophys J*, 2018, 863: 70–79
- 42 Liu Z, Cui W, Liu C, et al. A catalog of OB stars from LAMOST spectroscopic survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 241: 32–47
- 43 Feng S, Shen S Y, Yuan F T, et al. Bivariate luminosity function of galaxy pairs. *Astrophys J*, 2019, 880: 114–127
- 44 Yao S, Wu X B, Ai Y L, et al. The Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) quasar survey: The fourth and fifth data releases. *Astrophys J Suppl Ser*, 2019, 240: 6

Summary for “LAMOST的科技创新”

Innovations in science and technology with the LAMOST

Yongheng Zhao

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

E-mail: yzhao@bao.ac.cn

The LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope) is a special reflecting Schmidt telescope with an effective aperture of 3.6–4.9 m, a focal length of 20 m and a field of view (FOV) of 5 degrees. Its optical system is designed with three major components, namely Ma, Mb, and a focal surface. The correcting mirror Ma (5.72 m×4.40 m) is made up of 24 hexagonal plane sub-mirrors; the primary mirror Mb (6.67 m×6.05 m) has 37 hexagonal spherical sub-mirrors. In the process of observation, Ma is capable of synchronously changing its specific aspherical figure to give excellent optical quality. The focal surface has 4000 precisely positioned fibers connected to 16 spectrographs with a distributive parallel-controllable fiber positioning system, thus LAMOST can observe up to 4000 objects simultaneously.

LAMOST adopts an innovative active optics technique, achieved by changing its mirror surface continuously to achieve a series different reflecting Schmidt systems. This novel concept and unique design broke through the bottleneck of former astronomical instruments that could not combine a large clear aperture with a wide FOV. The new active optics system creatively developed in LAMOST is used for correcting Ma, which is a combination of the thin deformable mirror active and segmented active optics. The distributive parallel-controllable fiber positioning technique is also an advanced technology which solved the problem of simultaneously and accurately locating 4000 astronomical objects. LAMOST opened up the ability to have a large scale optical fiber spectroscopic sky survey with as many as 4000 optical fibers.

The LAMOST project was approved as a national major science project by the Chinese government in April 1997. LAMOST started to be constructed in August 2001. The installation of all LAMOST systems was completed on time in August 2008. The telescope is located at the Xinglong Station of National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences (NAOC). After the two years commissioning period starting in 2009, a pilot spectroscopic survey was performed using LAMOST from October 2011 to June 2012. The regular survey of LAMOST began in September 2012. Up to June 2020, LAMOST has obtained more than 17 million spectra of celestial objects, in which the stellar parameters of 7.7 million stars were obtained. The data archive of LAMOST would be an exceedingly valuable resource for a variety of astronomical fields. It would be used as a “digital Galaxy” to understand our Galaxy.

As the telescope of the highest spectrum acquiring rate, LAMOST breaks through the “bottleneck” of spectroscopic observation in astronomy, becoming the most powerful spectroscopic survey telescope for researches of wide field and large sample astronomy. LAMOST yields a unique data set of more than 10 million stellar spectra and makes a substantial contribution to the study of stellar astrophysics and the research of the Galaxy, such as stellar populations, chemical composition, kinematics and structure of the disk and the halo, gravitational potential and dark matter distribution in the Galaxy, interstellar dust extinction, extremely metal-poor and hyper-velocity stars, and to ultimately advance our understanding of the assemblage of the Milky Way and other galaxies and the origin of regularity and diversity of their properties.

LAMOST, survey, spectrum, Milky Way, stellar physics

doi: [10.1360/TB-2020-1498](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1498)