

LAMOST 天体光谱巡天

赵永恒[†]

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

2014-12-01 收到

[†] email: yzhao@bao.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150401

Spectroscopic surveys of LAMOST

ZHAO Yong-Heng[†]

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

摘要 文章着重介绍了中国自主创新的LAMOST望远镜以及所取得的光谱巡天成果。LAMOST是一种新型的反射施密特望远镜,它突破了大规模光谱巡天所需要的大视场兼备大口径望远镜的技术瓶颈,成为世界上天体光谱获取率最高的望远镜。自2011年10月到2014年6月,LAMOST获得了413万条天体光谱,其中有378万条恒星光谱和包括220万条恒星光谱的参数星表。

关键词 天文, 巡天, 光谱, 银河系

Abstract The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST), a new type of reflecting Schmidt telescope, has been designed and produced in China. It marks a breakthrough for large scale spectroscopic survey observation in that both large aperture and wide field of view have been achieved. LAMOST has the highest spectrum acquisition rate, and from October 2011 to June 2014 it has obtained 4.13 million spectra of celestial objects, of which 3.78 million are spectra of stars, with the stellar parameters of 2.20 million stars included.

Keywords astronomy, sky survey, spectroscopy, the Milky Way

1 科学背景

现代天文学所研究的对象,即各种各样的天体,几乎都是“看得见而摸不着”的。1825年法国哲学家孔德在他的《实证哲学讲义》中预言:“恒星的化学组成是人类绝不能得到的知识。”以此来说明人类认识的局限性。然而,孔德的预言被30年之后的天体光谱技术打破了,方法就是将天体的光通过天文望远镜和光谱仪,分解成光谱,再把这光谱拍照下来进行分析研究。

利用天体的光谱,不但能够确定天体的化学组成,而且可以确定天体的温度、压力、密度、磁场和运动速度等物理条件。150多年来,天文学家们建造各式各样的望远镜和光谱仪,来观测

各种天体的光谱,使得人类对天体的化学组成和物理本质的认识有了突飞猛进的增长。迄今为止,光谱分析也是目前天文学研究中最成熟的工具之一。

对于天体的性质和行为的认识,光学波段光谱的物理信息含量最大,积累最多,运用也最成熟,从而导致了上世纪天体物理学的巨大进展。但是,由“成像巡天”记录下的数以百亿计的天文目标中,只有很小一部分(约万分之一)进行过光谱测量。天体光谱测量效率低的原因是分光后探测器上每个象元的光流量减少,而且一台望远镜单狭缝光谱观测时同一时间只能观测一个天体的光谱;这不同于成像观测,一次可以同时记录下成千上万个目标。解决光谱测量的低效率,首

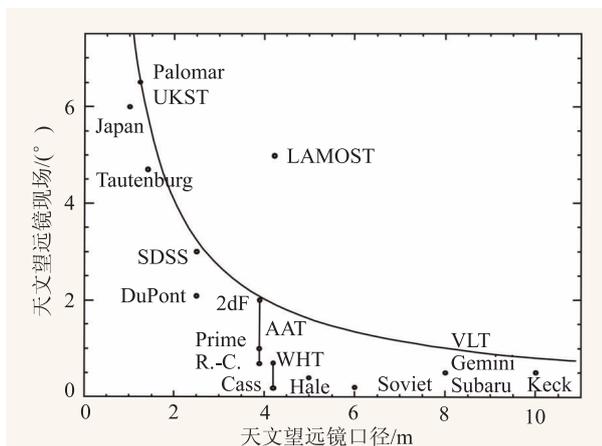


图1 国际光学望远镜口径和视场分布图(从图中望远镜的口径视场分布可以看出,世界上目前所有的望远镜没有超过这条曲线,但是LAMOST却在这条曲线之上。该曲线由英国剑桥大学R. V. Willstrop绘制)

先需要具有能够测量多个天文目标光谱的技术;同时,要做到新世纪所需要的大天区范围内的大规模光谱测量,必须同时具备两个条件:一是望远镜的口径必须足够大;二是望远镜的视场足够大。

天文望远镜从口径和视场上可以大致分为两种:一种是大口径望远镜,其视场很难做大(一般大口径望远镜视场只达十分之几度),用作天体的细节观测;另一种是大视场望远镜(典型类型是施密特望远镜),视场可达几度,一次可观测到很多天体,用作巡天观测,但口径很难做大,很难观测到更遥远的天体。“大口径和大视场难以兼备”是长期以来天文学上的一个难题,也是许多天文学家一直关心的问题。

自20世纪40年代末美国在帕洛玛天文台建成口径为5 m的大口径望远镜和口径为1.2 m的大视场施密特望远镜之后到20世纪90年代的近50年中,大口径望远镜已发展到口径为10 m,但大视场望远镜口径仍停留在1.3 m。其原因是:(1)施密特望远镜的非球面改正板一般为透视式,至今很难制造出大口径透射光学材料;(2)为了实现大视场,消除某些像差,施密特望远镜的非球面改正板必须放在球面主镜的球心,由此就有一个较长的镜筒。为了保证同样的像质和视场大小,口径增大就使得镜筒更长,从而增加了结构上实现

的难度。

在20世纪的后50年内,世界上的天文学家和技术专家从未放弃过对大视场兼大口径天文望远镜的追求。比如英澳天文台AAT的2dF(“2度视场”)计划,经过约11年的努力,在这台口径为3.9 m的望远镜的主焦点加一个改正镜,使视场扩大到2°,可以在焦面上放置400根光纤,同时观测400个天体。又例如美国的北银极数字巡天计划(SDSS计划)中的口径为2.5 m的巡天望远镜,在焦点处加非球面改正板获得3°视场,可同时观测660个天体,但这些计划都付出了很大的代价和努力才达到2°至3°视场,可见难度之大。另外,还有曾经建议的Willstrop望远镜方案,即用三块口径分别为3 m、4 m和5 m的非球面反射镜才能得到通光口径4 m和5°视场。Willstrop望远镜的方案,除了因3块大的非镜面镜造价十分昂贵,并且口径很难做得更大(如10 m和以上)以外,相对孔径大(即焦比太快),因而并不适合多目标光纤光谱的工作。

反射施密特望远镜的方案可以解决大口径透射施密特改正镜的材料无法得到的问题,但是要实现大口径反射施密特望远镜,需要至少几十米长的保证高精度成像质量的镜筒对准天体,以及其高精度跟踪的庞大的机架,这是非常困难和难以实现的,在国际上一直没有人敢问津。

20世纪80年代,在成功研制2.16 m望远镜后,我国天文学家王绶琯和苏定强在考虑下一步中国天文大设备时,瞄准了大天区范围大量光谱巡天观测的突破口,发明了“大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜”(The Large Sky Area Multi-object Fiber Spectroscopic Telescope, LAMOST)。这种新类型的望远镜方案,是中星仪式(光轴和镜筒固定在子午面内,主要观测天体过中天前后一段时间的)主动反射施密特望远镜^[1],即“王一苏反射施密特”望远镜。LAMOST突破了天文望远镜大视场不能兼备大口径的瓶颈,成为目前世界上口径最大的大视场望远镜(见图1),也是世界上光谱获取率最高的望远镜(见表1)。

表1 LAMOST光谱观测能力与国际上光谱巡天计划比较

指标	名称	2dF(英澳)	SDSS(美国)	LAMOST(中国)
口径		3.9 m	2.5 m	3.6—4.9 m
视场		2°	3°	5°
光纤数		400根	640根	4000根
获得光谱数		100000条	1000000条	10000000条
状态		完成	运行	试运行

2 LAMOST的组成、特点和创新

LAMOST由光学系统，主动光学和镜面支撑系统，机架和跟踪系统，望远镜控制系统，焦面仪器系统，圆顶系统，观测控制和数据处理系统，输入星表和巡天战略系统等8个子系统组成^[2]。

2.1 光学系统

LAMOST的光学系统是视场为5°、通光孔径为4 m、焦比(焦距与通光孔径之比)为5的主动反射施密特系统(王一苏反射施密特系统)，如图2所示，包括施密特改正镜 M_A (见图3(a))、球面主镜 M_B (见图3(b))和焦面^[3]。天体的光经 M_A 反射到 M_B ，再经 M_B 反射后成像在焦面上。其反射施密特改正镜是一块由24块对角线长1.1 m、厚度为25 mm的六角形子镜拼接成的5.72 m×4.40 m的大镜面(见图3(c))。球面主镜是由37块对角线长1.1 m、厚度为75 mm的六角形球面子镜拼接成的6.67 m×6.05 m的大镜面(见图3(d))。LAMOST光学系统的特点和创新是：

(1)巧妙地将光轴固定在子午面内(即镜筒固定)，用反射施密特改正镜进行跟踪。主要观测天体过子午面前后共1.5—4小时的赤纬-10°到+90°的天区。由此大大简化了望远镜的结构和造价。

(2)作为国际上首创，用主动光学实现一个常规光学方法不能实现的光学系统，即在观测的过程中，反射施密特改正镜的面形根据要求不断变化，从而形成一系列不同光学参数的光学系统。由此解决了国际上大视场反射施密特望远镜口径

很难做大的难题。这种方法同样也可以应用到任何其他望远镜的非球面反射光学系统中，实现传统方法不能实现的这类光学系统。

(3)主镜的球心位于光学系统之内，便于随时对主镜进行检测。

(4)由于用施密特改正镜进行跟踪，光学系统

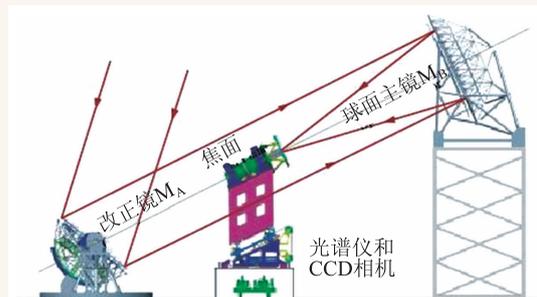


图2 LAMOST工作原理图

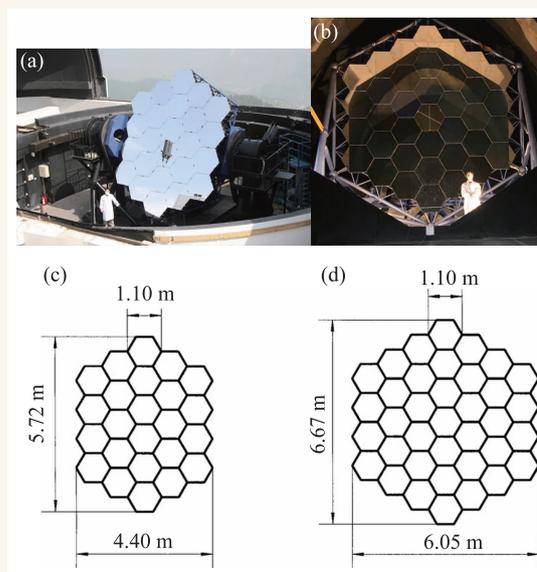


图3 (a)施密特改正镜 M_A 照片；(b)球面主镜 M_B 照片；(c)施密特改正镜 M_A 的结构(由24块六角形子镜拼接而成)；(d)球面主镜 M_B 的结构(由37块六角形子镜拼接而成)

的入瞳位于施密特改正镜处，在观测过程中，望远镜的入瞳大小和形状是在变化的。实际的通光孔径是3.6 m至4.9 m。

2.2 主动光学和镜面支撑系统

主动光学技术是LAMOST项目最有挑战和最核心的关键技术。采用主动光学技术，可以在观测中实时得到一系列不同非球面面形的施密特改正镜 M_A ，使LAMOST这种由我国天文学家创新的大视场兼备大口径的新型望远镜方案才得以实现^[4, 5]。LAMOST主动光学技术的特点和创新如下：

(1)由24块六角形子镜拼接而成的施密特改正镜 M_A 的每一块子镜，在观测过程中同时由主动光学技术控制其面形不断变化的非球面，因此在国际上开创了一种新的主动光学技术，即在一块大镜面上同时采用薄变形镜面主动光学和拼接镜面主动光学技术(国际上已有的主动光学技术中或仅有拼接镜面，如美国10 m Keck望远镜，或仅为薄变形镜面，如欧洲的VLT望远镜)。

(2) M_A 的主动光学系统与世界上已经采用的主动光学系统都不同，它不仅仅用主动光学校正维持大镜面的重力变形、热变形、加工和安装误差，它主要作用是在观测过程中实时地使24块子镜的面形由平面精确地变成所要求的非球面(每块子镜都是离轴的非球面)，面形精度控制在均方根值20—30 nm。

(3)反射施密特改正镜 M_A 和球面主镜 M_B 分别用24块和37块六角形子镜拼接而成的镜面，这

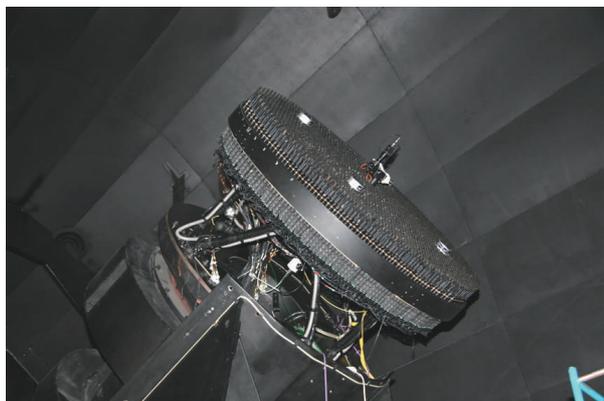


图4 装有4000根光纤和光纤定位单元的焦面板

是国际上第一架在一个光学系统中同时应用两块大口径拼接镜面的望远镜。

(4)首先在国际上采用了非圆形(六角形)可变形镜。

(5)在大小和形状变化的入瞳位置上进行波前检测，这在国际上也没有先例。

2.3 机架和跟踪系统

机架和跟踪系统分为两个部分：(1) M_A 地平式机架；(2)焦面旋转及调焦机架。LAMOST的机架和跟踪系统的特点是：(1)由于 M_A 采用镜面法线跟踪的方式，LAMOST的地平式机架与常规的地平式机架跟踪不同的是它没有跟踪的盲区。(2)由于观测模式为天体过子午面前后一段时间观测，跟踪过程中机架的高度轴变化很小。(3)方位轴和高度轴跟踪都采用摩擦传动，以消除高频跟踪误差。(4)因为是法线跟踪，对望远镜观测天区时的指向精度和观测天体时的跟踪精度都比传统望远镜高一倍。(5)由于没有传统望远镜的镜筒用于高度轴的平衡，LAMOST地平式机架高度轴采用特殊的反力矩齿轮机构平衡。

2.4 望远镜控制系统

望远镜控制系统由望远镜指向和跟踪控制，主动光学控制，圆顶控制及环境检测等三部分组成。望远镜控制系统的特点和创新之处是：(1)具有当代国际上大型天文望远镜控制系统的一系列特点：实时、可靠、网络化、多层次、分布式和易于扩展；(2)高精度地控制主动光学的上千个力促动器和位移促动器，以及实时进行上千个力传感器和位移传感器的信号采集和分析。

2.5 焦面仪器

焦面仪器系统如图4所示，它包括4000个光纤定位单元，16台中低色散多目标光纤光谱仪，32台4 k×4 k低噪声CCD。通过焦面上的4000根光纤将天体在焦面上的像传输到光谱仪，并在

CCD上得到光谱。其特点和创新之处如下。

2.5.1 光纤定位装置

4000根光纤的定位创新性地采用并行可控的光纤定位技术^[6]，可在数分钟的时间内将光纤按星表位置精确定位，突破了国际上用光纤板打孔插光纤和机械手放置数光纤只能到百根光纤的方法。光纤定位单元采用双回转运动形式，由两只步进电机驱动，最大定位误差为40 μm。

每个光纤定位单元由两只步进电机驱动，4000个光纤定位单元共有8000只步进电机。采用无线控制技术，避免了8000只电机的几吨重的几万根电线对焦面机架跟踪机构的影响。

2.5.2 多目标光纤光谱仪

多目标光纤光谱仪如图5所示。16台中低色散多目标光纤光谱仪^[7]的每台狭缝上可安排250根光纤。在低分辨率模式下，蓝区通道工作波段为370—590 nm，红区通道工作波段为570—900 nm，光谱分辨率本领为1000—2000。每台光谱仪还可以增加中分辨率光栅，使光谱分辨率本领达到5000—10000。

2.5.3 CCD相机

每台光谱仪各配红、蓝两台CCD相机，共有32台低噪声的天文CCD相机。CCD幅面是4096×4136像素，像素大小为12 μm×12 μm，分为红敏CCD和蓝敏CCD两种。它们具有很低的噪声特性，在200 kpix/s的快速读出速度下，读出整幅图像只需40 s时间，读出噪声低于4个电子。

2.6 圆顶

圆顶系统包括圆顶、温度、视宁度及风载的控制。其特点和创新之处有：(1)圆顶在观测时完全打开，简单且不需要随动控制；(2)利用固定风屏和6块可分别升降的活动风屏相结合，可显著地降低主动反射施密特改正镜M_λ在观测中的风载影响；(3)LAMOST具有60 m长光路，比世界上大多数望远镜的光路都长，圆顶视宁度的问题比较突出。采取了特别的制冷通风装置，加上温度传感器的监测，可较好地解决温度一致性问题 and 改善视宁度。

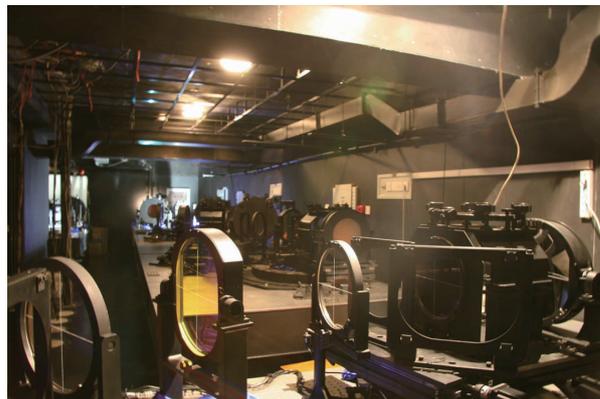


图5 LAMOST的光谱仪房中的部分光谱仪

2.7 观测控制 and 数据处理

LAMOST每个观测夜可观测上万个天体的光谱，而整个的巡天计划是观测上千万条光谱。为最有效地获得观测数据和取得最大的科学成果，LAMOST拥有一套完整的自动化观测、数据处理和存储的软件系统^[8, 9]，其中主要包括巡天战略系统(SSS)，观测控制系统(OCS)，数据处理，分析和存储系统(DPS)。

2.8 输入星表和巡天战略

LAMOST是一台能同时观测大量天体光谱的高效率望远镜。为了使LAMOST能正确有效地开展工作，必须进行输入星表的准备和巡天战略的研究工作，由此开发和使用了自动软件系统来提供LAMOST的观测计划和每次观测的星表。

3 LAMOST的关键技术和难点

根据LAMOST的光学镜面的总面积以及机架和光学系统尺度的规模(见图6)，可以说LAMOST在研制规模上已与目前国际上最大的8—10 m级望远镜相当，在主动光学技术和光纤定位技术上甚至更难，在光纤数、光谱仪数和CCD数上甚至超过。LAMOST的研制过程充满挑战，并且克服了这些挑战使LAMOST研制成功。其关键技术和难点主要有：



图6 LAMOST全景

(1)主动光学技术。包括：在一块大镜面上同时应用薄变形镜面主动光学技术和拼接镜面主动光学技术；在一个光学系统中采用两块大的拼接镜面；采用非圆形可变形镜；在形状和尺寸变化的瞳孔上进行波前检测。

(2)4000根光纤的定位技术。包括：4000个并行可控光纤定位单元的高精度定位技术；8000只电机的无线控制技术。

(3)大口径超薄光学镜面的磨制和检测。

(4)大口径超薄主动镜面的支撑。

(5)8 m地平式机架的精确跟踪控制(包括像场旋转补偿)。

(6)多目标光纤光谱仪和CCD相机。

(7)40 m光路上气流影响的改善。

(8)海量数据处理。

4 LAMOST 巡天观测

LAMOST项目作为国家重大科学工程于1997年8月由国家立项，2001年8月开工，2008年10月建成。在2009年6月通过国家验收后，经过两年紧张有序的精密调试和科学试观测后，启动了LAMOST的巡天观测，获得的天体光谱如图7所示。

LAMOST 先导巡天自2011年10月开始，到2012年6月结束，共观测401个天区(见图8(a))，获得61万条信噪比大于10的光谱和39万颗恒星参数星表^[10]。2012年9月LAMOST正式巡天启动，到2013年6月结束第一年巡天观测，共观测

808个天区(见图8(b))。包括先导巡天和第一年正式巡天的光谱数据——DR1数据集于2013年8月26日正式释放，供国内用户和国外合作者使用。DR1释放光谱数共计220万，其中信噪比大于10的恒星光谱172万条，已然超过目前世界上所有已知恒星巡天项目的光谱总数。在DR1发布的数据中，还包括一个108万条恒星光谱参数星表，是世界上最大的恒星光谱参数星表。

LAMOST 第二年正式巡天自2013年9月开始，到2014年6月结束，共观测725个天区(见图8(c))；LAMOST 第三年正式巡天自2014年9月开始，现正在顺利进行。

从先导巡天开始到2014年6月第二年正式巡天结束时，LAMOST 光谱巡天已经获得超过400万的天体光谱(表2)，包括先导巡天和前两年正式

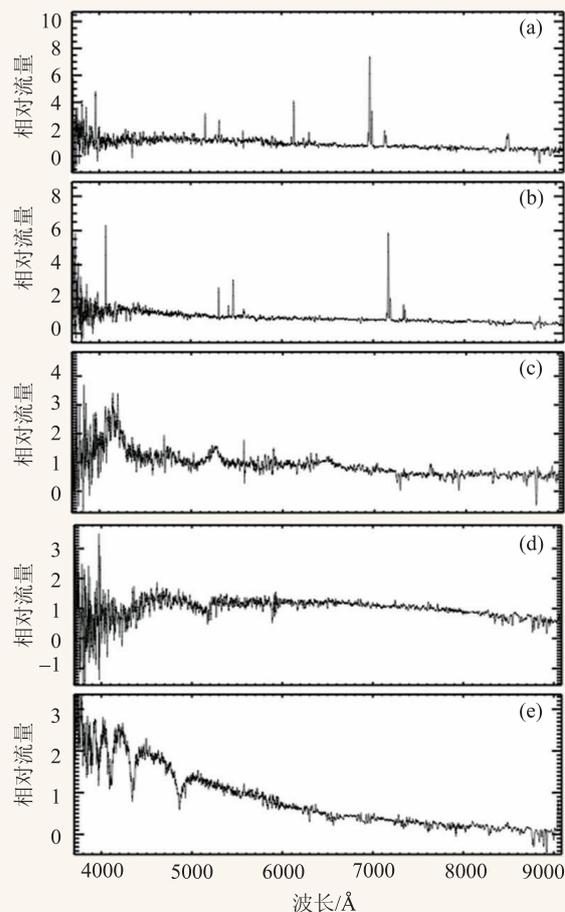


图7 LAMOST获得的天体光谱 (a)红移为0.061的发射线星系；(b)红移为0.09的发射线星系；(c)红移为2.4的类星体；(d)类型为K3的恒星；(e)白矮星

巡天的光谱数据——DR2数据集于2014年12月30日正式发布,供国内用户和国外合作者使用。DR2释放光谱数共计413万,其中还包括220万颗恒星的光谱参数星表(图9)。

利用LAMOST所获得的恒星光谱巡天数据,可以得到海量的恒星光谱参数,即有效温度、表面重力、化学组成和视向速度等(图9)。结合国内外其他天文设备的观测数据,天文学家们不仅可以探知银河系的物质(特别是暗物质)分布,还将揭示银河系中各组分的化学和动力学特征。这些研究将使人们对银河系的了解提高到前所未有的高度,也将启发人们对宇宙的形成和演化产生更加深刻的认识。

LAMOST 恒星光谱巡天将在5年时间里获得超过500万条高质量的恒星光谱,海量的恒星光谱数据将成为“数字银河系”的重要基石,对于研究银河系的结构、运动、形成和演化具有重要的科学价值。基于LAMOST光谱数据开展的研究,将取得一系列标志性科研成果,并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做出重大贡献。

5 结束语

LAMOST是目前世界上口径最大的大视场光学望远镜,也是世界

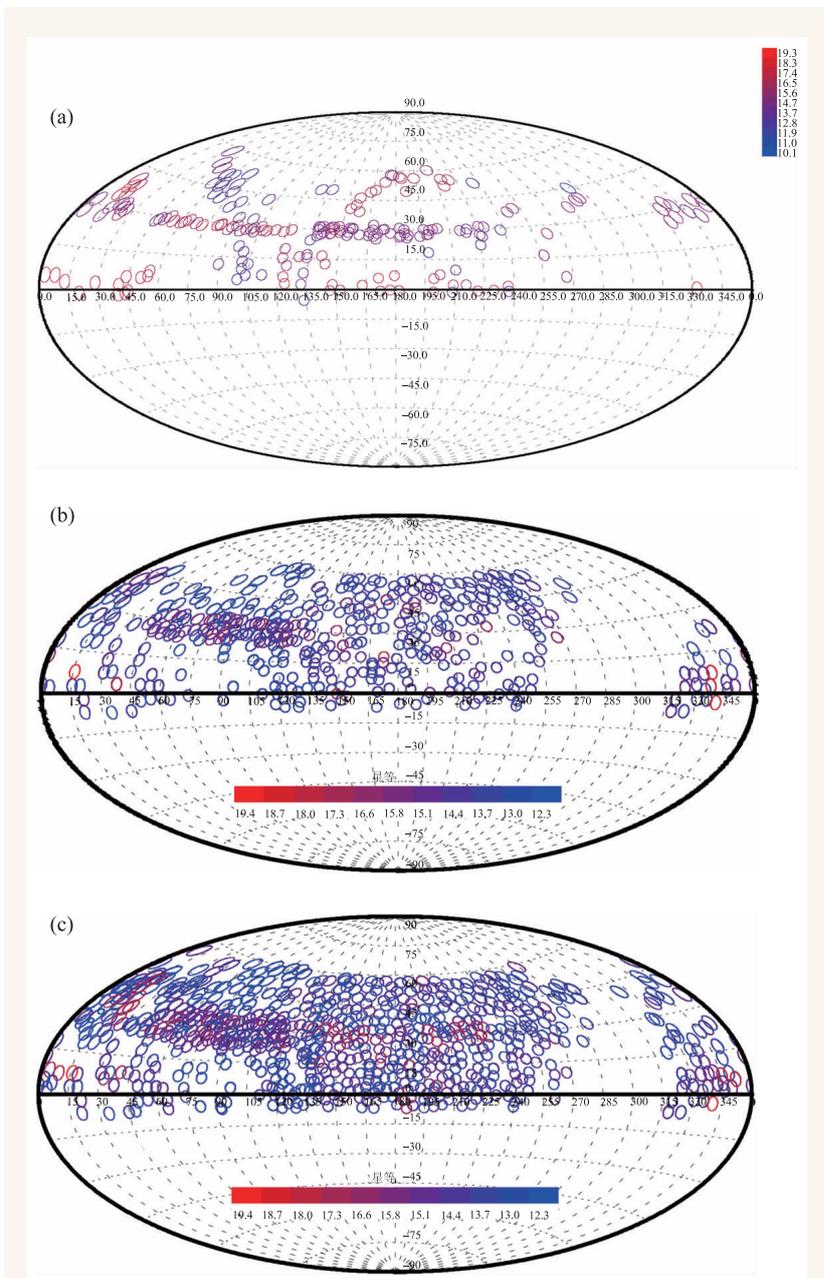


图8 LAMOST 光谱巡天的观测天区图 (a)先导巡天(2011年10月至2012年6月); (b)正式巡天第一年(2012年9月至2013年6月); (c)正式巡天第二年(2013年9月至2014年6月)

表2 LAMOST 巡天所获得的天体光谱数目

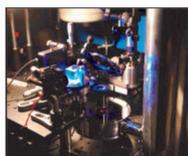
	先导巡天	正式巡天第一年	正式巡天第二年	总计
观测天区数	401	808	725	1934
发布光谱数	909520	1638216	1588746	4136482
恒星光谱数	809827	1511033	1463601	3784461
信噪比(s/n)大于10的光谱数	616526	1295355	1364061	3275942
恒星参数表	390095	822117	995576	2207788

Cryostats for Nanoscience

Micro-Spectroscopy



Ultra Low Vibrations
(3 - 5 nm)
Customized
Laboratory Systems
< 4 K to 800 K Operation

Photoluminescence
MicroscopeOptical image of resolved QD
array with cryocooler
operating

(courtesy of Prof E. Pelucchi)

Scanning Probe Microscopy
(SPM)

Ultra-High Vacuum
Atomically Resolved Imaging
Nanoscience Applications

Lattice resolved image of CNT with ultra-
low vibration liquid helium free system
(courtesy of Prof G. Nazin)

Advanced Research
Systems

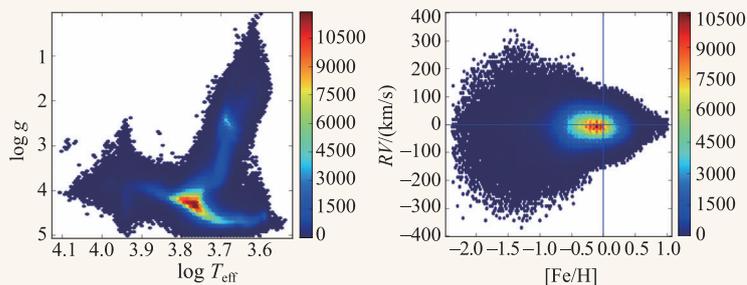
Email: ars@arscryo.comwww.arscryo.com

图9 220万条恒星光谱的参数分布图(左图为有效温度 T_{eff} 和表面重力加速度 g 的分布;右图为金属丰度 $[\text{Fe}/\text{H}]$ 和视向速度 RV 的分布)

上光谱获取率最高、最有威力的光谱巡天望远镜。LAMOST的研制成功不仅使我国大型望远镜研制技术走到了国际前沿,更为我国大视场、大样本的天文学研究提供了重要的观测平台。

LAMOST的建成和投入观测,将使我国具备世界领先的主动光学技术和多目标光谱观测能力,为我国天文学研究增添了高水平的观测设施和平台,为我国在星系形成与演化、银河系结构、恒星形成、暗物质与暗能量等相关领域的重大研究提供了必要的条件和技术支撑,成为我国大科学工程中既有国际领先的科学目标、又有独创的设计思想和技术创新的典范之作。国际著名天文光学专家、2010年Kavli奖获得者R. Wilson评价: LAMOST“包括了望远镜技术的所有方面……,她的建成,将中国望远镜研制技术推到了世界前沿的顶峰……,她的成功,不但是中国科技界的胜利,也是整个国际天文界的胜利”。

正如LAMOST国际评估报告(2005年6月)所指出的那样:“LAMOST将会是一个适合于研究广泛领域中重大天体物理问题的世界级巡天设备。”“LAMOST将会有非常好的科学产出。望远镜一定能够在河外天文学与银河系天文学方面产生世界级的研究成果。”

参考文献

- [1] Wang S G, Su D Q, Chu Y Q *et al.* Applied Optics, 1996, 35: 5155
- [2] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q *et al.* Research on Astronomy and Astrophysics, 2012, 12: 1197
- [3] Su D Q, Cui X Q, Wang Y N *et al.* Proc. SPIE, 1998, 3352: 76
- [4] Su D Q, Cui X Q. Chin. J. Astron. Astrophys., 2004, 4(1): 1
- [5] Cui X Q, Su D Q, Li G P *et al.* Proc. SPIE, 2004, 5489: 974
- [6] Xing X Z, Zhai C, Du H S *et al.* Proc. SPIE, 1998, 3352: 839
- [7] Zhu Y T, Hu Z W, Zhang Q F *et al.* Proc. SPIE, 2006, 6269: 62690M-1
- [8] Zhao Y H. Proc. SPIE, 2000, 4010: 290
- [9] Luo A L, Zhang Y X, Zhao Y H. Proc. SPIE, 2004, 5496: 756
- [10] Luo A L, Zhang H T, Zhao Y H *et al.* Research on Astronomy and Astrophysics, 2012, 12: 1243