

宇宙结构起源——从银河系的 精细刻画到深场宇宙的统计描述

1609年，当世界上其他地方的人们还在利用眼睛来观察星空的时候，此时的亚平宁半岛，一位对星空一直充满着兴趣、名叫伽利略的意大利人，无意间将一个口径只有2.5厘米的自制望远镜指向天空，看到了月球表面和木星的卫星，自此人类之前一直依靠肉眼探索宇宙的进程被彻底改变。在接下来的400多年中，望远镜的口径越做越大，探测方式和手段也发生了巨大变化：从最初的光学波段扩展到了几乎整个电磁波段，从电磁方式延伸到了宇宙粒子以至于新近的引力波，并且从地面走向了太空。正是这些探测方式的丰富性和探测手段的多样性，使人类对于宇宙的认识在短短的几百年中，尤其在过去的几个世纪中，发生了翻天覆地的变化。人类现在已经能够跨越宇宙演化的长河，描绘出浩瀚宇宙演化的历史：从早期宇宙的微小量子涨落经引力不稳定性放大，形成了今天宇宙多样化的结构——从致密黑洞到我们居住的银河系（图1）、

从星系团到宇宙纤维状的大尺度结构。借助于最先进的地面和太空望远镜观测和物理理论，我们对于天体物理学的研究已经步入了精确宇宙学的时代。这意味着我们不再简单地满足于发现一些新的天文现象，而是更关注主宰我们宇宙演化的基本物质成分的物理本质和宇宙结构起源的众多物理过程。而试图理解众多起源过程和它们的物理本质，正是宇宙结构起源——从银河系的精细刻画到深场宇宙专项的目标所在。

宇宙构成的基石是星系，在研究宇宙整体结构起源的同时，必然要对作为宇宙基本单元的星系的结构起源问题进行了解。长期起来，中国的天文研究不是全面投入，而是有选择、有重点地投入，在大型设备、人才储备、原创研究上呈现出新面貌，构建了我国天文研究体系以及大装置支撑系统。宇宙结构起源先导专项正是在此基础上组织开展的协同攻关，希望形成天文研究的高

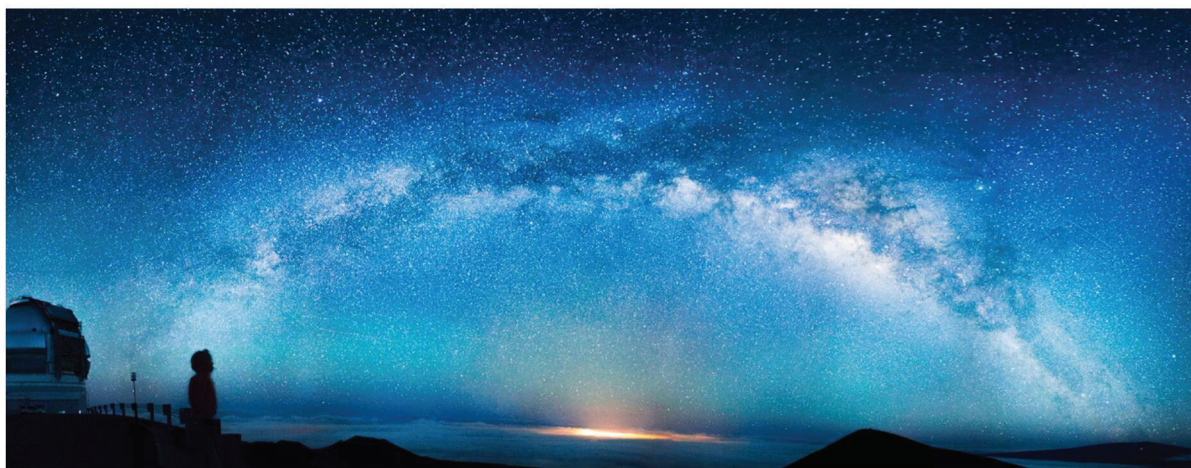


图1 从夏威夷莫纳克亚山看到的银河系

地，实现该领域的进一步发展。

1 专项简介

中科院战略性先导科技专项（B类）“宇宙结构起源——从银河系的精细刻画到深场宇宙的统计描述”于2014年立项，专项依托于中科院国家天文台，由中科院紫金山天文台、上海天文台、高能物理所、中国科技大学共同承担。首席科学家为毛淑德研究员，另外包括101名科研骨干，来自于国内17所科研单位及高校。

本专项紧密围绕结构起源这一领域，瞄准当前尚未解决的重大问题，依托国内大科学装置和特色设备，结合国际巡天计划、高精度数值模拟，开展从银河系、近邻宇宙到深场宇宙多个尺度的前沿研究，探索暗物质、暗能量和重子物质这三大宇宙基本组分的属性、本质和结构形成物理。专项以结构起源这一科学问题为中心，设置了与之紧密关联的4个项目：从银河系、近邻星系到深场宇宙多尺度出发，利用多波段观测、多种研究手段探索包括暗物质、暗能量本质的基本物理和结构形成的复杂天体物理过程，并探讨结构形成中很不确定的一个关键物理过程（黑洞的吸积、反馈对星系形成和演化的影响），在提供观测支撑的同时培育天文新兴领域研究。

2 专项进展

本专项自2014年立项以来，建立和完善国内、国际观测平台，为专项的顺利进行奠定基础。专项整合国内天文界与相关学界的力量，以天文研究为基本点，与粒子物理等领域交叉，同时与数学、高技术领域紧密合作，开展先导科学和技术研究。通过本先导专项的实施，我们在科研方面取得了一些在国际上有显示度的成果。

2.1 暗物质和暗能量基本物理

现代的天文观测表明暗物质和暗能量的存在，但到目前为止，对于暗物质和暗能量的本质却依然不知道，它们的本质问题属于现代物理的两个基本问题。

项目成员利用多种方法进行研究。通过国际合作，利

用国际最大的星系巡天BOSS项目，在多个红移处精确测定了重子声波振荡信号，从而利用该测量结果重建了暗能量状态方程随时间的演化历史。研究发现暗能量在3.5个标准偏差置信度上具有动力学演化的迹象，显著高于早期结果（2.5个标准偏差）。项目成员还与eBOSS（BOSS巡天项目的升级）国际合作组一起，完成了对该巡天的宇宙学预研究并发现eBOSS将有能力把暗能量状态方程的品质因数提高3倍左右，首次在更高置信度上发现了暗能量动力学，并区分了两种中微子质量的简并模式（图2）。

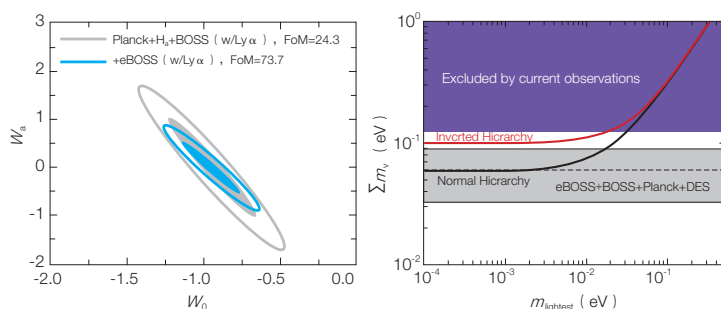


图2 下一代巡天对暗能量状态方程和中微子质量的限制

暗物质候选者通常分为冷暗物质和温暗物质两大类。冷暗物质和温暗物质模型在大尺度上预言类似结构的形成，但在小尺度温暗物质模型预言的结构要少很多。项目成员利用高分辨率流体动力学模拟，深入研究了温暗物质宇宙模型中银河系尺度的星系形成。研究发现，长度为几百万个秒差距（Mpc）的光滑致密细丝结构会在红移2左右形成，并导致特殊的延展莱曼-限制系统的形成。而从观测的角度而言，延展莱曼-限制系统的关联函数的测量可以用来检验暗物质性质。此项研究对于目前和未来的星系巡天研究暗物质提供了新的观测目标。

在红移巡天宇宙学分析中，一个关键假设是暗物质晕的速度偏置是在大尺度上为1，即暗物质晕和暗物质粒子的相对速度为零。然而，这种假设尚未通过数值模拟的验证。实际上，这与大尺度结构形成的经典理论，即BBKS理论相矛盾。深入了解在不同尺度上暗物质晕的偏置可以帮助减少在星系巡天数据分析中的系统误差，对于暗能量的研究至关重要。然而，精确测定暗晕的速

度偏置难度非常大。我们开发了新的理论方法精确测量暗晕的速度偏置，并采用高分辨率 N 体数值模拟验证了该方法的准确性。在国际上，这是首次利用数值模拟在 2% 的误差范围内测量暗晕的速度偏置。结果发现，在 3 亿光年尺度以下，暗晕的速度偏置不为 1，与之前的关键假设不一致。所以这项研究工作对于大尺度星系光谱巡天的宇宙学研究具有十分重要的意义。

2.2 极端天体物理：黑洞、超新星发现和吸积物理

项目成员利用有偿使用国外望远镜时间计划（TAP）中的时域望远镜发现了迄今为止最亮的超新星 ASASSN-15lh。该极亮超新星总辐射能量达到了 SLSN-I 流行供能机制磁中子星模型的上限，为揭开超亮超新星机制提供新线索（图 3）。ASASSN-15lh 引起了天文学家们的强烈兴趣，在被发现之后，世界上许多大型望远镜和美国 NASA 的“雨燕”X 射线太空望远镜马上投入到了后续观测之中。该发现结果已经在 *Science* 杂志上发表。时至今日，世界各地相关研究者们依旧在从射电、光学、X 射线等诸多波段对这颗超新星进行持续观测。

项目成员还利用中科院云南天文台丽江观测站的 2.4 m 光学望远镜和国台兴隆观测基地的 2.16 m 光学望远镜以及美国和澳大利亚的 3 台望远镜，发现了 72 颗红

移 5 左右的非常明亮类星体和 3 颗红移 5.7 以上的高红移类星体。其中红移 6.3、中心 120 亿太阳质量的黑洞是迄今为止发现的质量最大的高红移 ($z > 6$) 黑洞。该成果发表于国际顶级科学期刊 *Nature* 杂志上，受到国内外学者的广泛关注。*Nature* 特地为此发现举行了新闻发布，并在同期杂志的“新闻与评述”栏目中专门撰写评论文章。

项目成员选择了一批具有高吸积率的 AGN 和类星体（大约 30 个目标源）。利用丽江 2.4 m 望远镜对超爱丁顿吸积大质量黑洞样本进行了长期光谱监测，发现这类源的性质十分特殊，初步揭示了其基本特点。

项目成员也在 M81 超软 X 射线源 ULS-1 中发现了其光谱中具有高度蓝移的氢元素发射线，揭示了该系统中存在速度达到 0.2 倍光速的相对论性重子喷流。这是首次从超软 X 射线源发现相对论性高速喷流，打破了天文学界以往的认知，揭示了黑洞吸积和喷流形成的新方式。该成果已在 *Nature* 上发表。

2.3 结构形成物理

LAMOST（也称郭守敬望远镜，图 4）目前已经得到约 700 万条恒星光谱，这些光谱已成为世界上最大的恒星光谱库。利用该数据库，项目成员对恒星进行了类型证认和参数估计，在寻找和证认特殊恒星方面取得了一些成绩。比如目前已通过 LAMOST 发现极端贫金属星近 200 颗，占国际上已发现总数的近 1/4。同时对银河系暗晕的形状和径向分布做出了测定。在银盘的研究上重构了太阳附近径向和切向速度分量分布，从中发现一些新的子结构。项目成员还利用 LAMOST 恒星样本独立测定了当地的暗物质密度；现在精度约为 30%，后期还可以利用 LAMOST 更多数据进行进一步提高。

宇宙演化的数值模拟取决于合理的初始条件的选择。项目成员自主发展了一套方法，用于再构造邻近宇宙的初始条件。该方法已经成功运用于 SDSS 红移巡天星系样本，构造出近邻宇宙的初始密度场，并运行一组 $3\,072^3$ 粒子，500 Mpc/h 的近邻宇宙数值模拟。该模拟精确再现了真实宇宙在大尺度甚至小尺度上的物质结

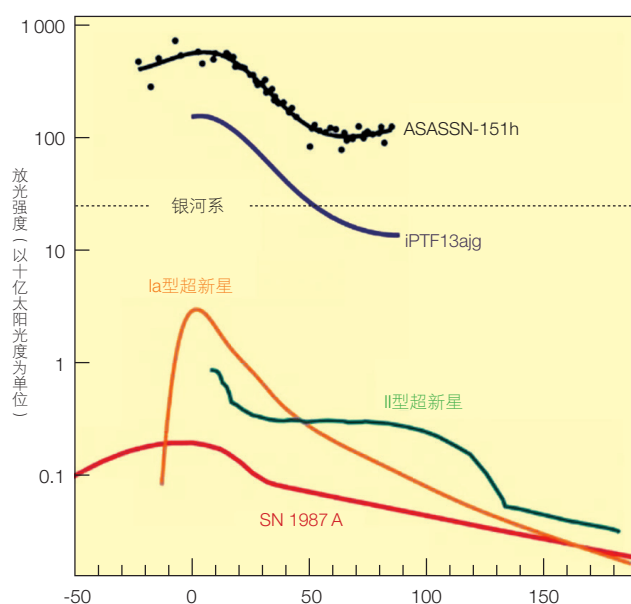


图 3 超新星亮度随时间的变化



图4 LAMOST（郭守敬）望远镜

构（包括暗晕子结构以及吸积历史）。这一模拟结果提供了一个有效的平台，让科研人员能够之后开展系列工作，深入研究星系形成中的重子物理过程，最终对星系的形成物理提供强有力的限制。

MaNGA 是 SDSS-IV 巡天中的三大计划之一，将提供世界上最多数量的、10 000 个星系的 IFU 数据。项目成员利用 SDSS-IV/MaNGA 试观测数据研究了星系内部恒星形成历史的二维分布，发现质量大于银河系的星系内部恒星形成活动的停止过程是从星系中央开始逐步向外围发展的，而小质量星系没有明显的梯度，表明星系内各区域演化过程趋于同步。同时发现质量是主导参量。该文章是 SDSS-IV 首批发表的 3 篇科学论文之一，后续工作有望取得有高显示度的成果。

2.4 领域贡献与人才培养

专项立项 2 年多来，在天文观测和高能天体物理等领域培养了几支优秀的团队，在中科院和高校间开展广泛的合作，进一步增强了科研人员的凝聚力，相关成果为今后的长远目标奠定了扎实的基础和必要条件。

专项在原有基础上，建立和完善国内、国际观测网络公共平台——有偿使用国外望远镜计划（TAP，图 5），该平台使中国天文学家能够在多波段使用国际先进设备，拓宽了国内已有设备能力，与国内观测设备有机结合，形成互补网络，为建设自主设备及其运行准备人才，并为国际公开的望远镜竞争提供基础和训练。另外在设备建设和国际合作等方面也发挥积极的推动作用，

为未来国际合作大设备（SKA，TMT）起到先导作用。本专项是国内天文领域宇宙结构形成和演化方向的重大项目，汇聚了中科院和高校在此研究方向的优势力量。在相关重大科学问题的牵引下，中科院成立了中科院天文大科学研究中心，同时中国科学院大学成立了科教融合的天文与空间科学学院。本专项的部分骨干成员在大科学中心和天文学院都起了关键作用，尤其是在天文学院中为相关教学、科研支撑和学生培养贡献力量。

3 小结与展望

专项自 2014 年立项以来，在暗物质-暗能量基本物理、极端天体物理和星系形成物理方面取得了若干高显示度成果，提升了天文科学前沿研究的国际认知度；形成了优势互补的国内外观测平台，为实现科学突破、培养下一代观测人才作出了贡献。2016 年 FAST 建成，DAMPE 暗物质卫星成功发射，HXMT 也即将于 2017 年发射，这些观测设备为本专项在后两年再上一个台阶提供了新的推动力；同时 LAMOST 和 SDSS-IV 大量巡天数据也为我国天文学家探索宇宙结构演化大展身手提供了国际舞台。

专项虽然目前进展良好，但本专项涉及人员与其他专项相比，人员较多，涉及多个单位，同时吸纳了约 15% 的高校人员，在管理上具有一定的挑战性。专项



图5 TAP 所用的光学、红外望远镜和亚毫米波（JCMT），太阳（BBSO）和时域望远镜（LCOGT）

正在加强专项推介和科普教育，进行少量人员调整，进一步凝聚课题，通过小型、高效讨论会加强内部合作，

（依托单位：中科院国家天文台）

专家点评

“宇宙结构起源”战略性先导科技专项所涉及到的大多数研究课题被国际同仁都认为是非常有趣的，这些课题同时也是地面和太空前沿设施主要项目的基础。该项目成员已在一些领域作出了一些尖端的贡献，尽管其他另外一些领域的发展在中国才刚刚开始。通过望远镜获取计划（TAP），该项目为提高中国的观测天文到国际水平作出了重大贡献。如果没有机会使用世界上最好的仪器，这些进步将是不可能取得的。项目团队的资深成员也在塑造中国天文学的未来，通过培训年轻的科学家，让他们参与领先的国际合作（理论和观测），使他们有机会与那些推动世界天文学发展的学者接触。

在其未来的计划中，该项目最好能够集中在高质量的国际参与的一些活动上，并适当降低主要影响本地和本国层面上一些项目的支持。

点评专家

西蒙·怀特 德国马普天体物理研究所所长，英国皇家学会院士和美国国家科学院外籍院士，曾获宇宙学最大奖 Gruber 奖、英国皇家天文学会金奖和美国天文学会 Helen B. Warner 奖等。提出了现代标准星系形成模型，

是利用数值模拟探索宇宙结构起源的先驱和现代标准宇宙学模型奠基人之一。共发表了近 500 篇学术论文，有逾 8 万次的引用，是世界上他引最高的天文学家之一。

专家点评

宇宙起源是自然科学的基本问题，长期以来，世界天文强国纷纷将该方向定为战略性支持方向，并投入了大量的科研资源。“宇宙结构起源”战略性先导科技专项紧密围绕结构起源这一方向，瞄准当前尚未解决的重大问题，依托国内大科学装置和特色设备，结合国际巡天计划、高精度数值模拟，开展了从银河系、近邻宇宙到深场宇宙多个尺度的前沿研究，探索暗物质、暗能量和重子物质这三大宇宙基本组分的属性及其本质。专项汇聚了国内院校顶尖人才，立项以来取得了多项重要成果，在国际顶级刊物发表了一批高水平文章，在若干方向取得了显著进展。专项还针对国内天文设备的现状，建立和发展了基于国外望远镜的观测网（TAP），在培养使用大型望远镜的观测人才和取得科学方面发挥了重要作用。

点评专家

李惕碛 中科院院士，高能天体物理学家，中科院高能物理所研究员、清华大学教授，在高能物理和天体物理两个学科及其交叉领域作出了重要贡献，研究涉及

实验观测、数据分析和理论模型研究三方面都有工作经验和重要成果，是硬 X 射线调制望远镜的项目首席科学家，该望远镜将于 2017 年发射。