

恒星与行星科学进展

周泽明^{1,2} 闫宏亮^{1,3}

(1. 北京师范大学天文与天体物理前沿研究所 102206; 2. 北京师范大学天文系 100875;
3. 中国科学院国家天文台光学天文重点实验室 100101)

恒星和行星作为宇宙中最普遍的天体,在宇宙演化历程中扮演着最基础和核心的角色。其形成和演化是当今天文学领域亟须解决的前沿问题之一。这一领域不仅是探究元素核合成、星系(包括我们赖以生存的银河系)的形成和演化的关键所在,更为我们揭示生命起源的奥秘提供了不可或缺的基石。要全面深入探索不同类型恒星和行星的形成与演化,依赖于覆盖全天的大规模光谱巡天观测以及多个巡天项目之间的紧密协作。在这一领域,大天区面积多目标光纤光谱型望远镜(LAMOST^[1],又称郭守敬望远镜)凭借其独一无二的光谱获取率,已成功发布超过2200万条天体光谱,构建了人类历史上最大的天文光谱数据库,并为我们提供了高精度的恒星大气参数。这些宝贵数据推动了天文基础研究在多个领域取得重要进展,本文将概述LAMOST巡天项目在恒星和行星科学领域取得的重要突破和研究进展。

一、探索恒星的奥秘

繁星点点的夜空,如诗如画,激发着我们对恒星诞生之谜的无限好奇。近年来,天文学家充分利用LAMOST光谱数据的大样本优势,在恒星物理、搜寻特殊天体等前沿科学领域取得了突破性进展。

1 星空档案:海量天体信息库

恒星和银河系的结构与演化,以及行星的形成、探测和动力学特性,构成了我国天文学探索的核心科学议题。为了深入揭示这些天体的物理特性,精确描述恒星的物理属性变得尤为关键。目

前,天文学家借助LAMOST数千万条光谱数据,计算出了约千万颗恒星的物理信息(例如有效温度、化学组成、视向速度等)^[2],其恒星物理参数的分布如图1所示。天文学家通过LAMOST数据证明,从分辨率约为1,800的光谱中可以估算出精确的恒星大气参数,例如恒星有效温度的测量精度可以达到200K,当信噪比足够高(>50)时,精度可以达到100K^[4]。

2 搜寻第一代恒星

第一代恒星在宇宙的初期扮演着关键的角色,它们的出现标志着宇宙黑暗时代的终结,并主导了早期宇宙化学增丰的演化历史。尽管理论预言了第一代恒星质量可能超过100倍太阳质量,但由于其寿命极短且仅存在于高红移的宇宙中,直接观测它们是极其困难的。

恒星的化学元素丰度保留了其诞生之时周围环境的特征,可以区别不同时期、经由不同过程所产生的各种恒星“家族”,这些元素丰度如同恒星的“化学DNA”一般。天文学家通过恒星光谱中的谱线,可以解读出各种元素的丰度,进而通过“化学DNA”反推恒星的形成历史。近期,天文学家就利用LAMOST光谱,在国际上首次于银晕恒星中发现了不稳定超新星(PISN,图2)存在的化学证据^[5],该成果已发表在《自然》杂志上。对不稳定超新星是第一代超大质量恒星因内部快速产生正负电子对,导致辐射压力和重力失衡,核心迅速坍缩并引发的全面爆炸现象,过去一直仅存在于理论之中。这一发现源自一颗化学丰度极其特殊的恒星(编号为LAMOST J1010+2358),其元素丰度展现出强烈

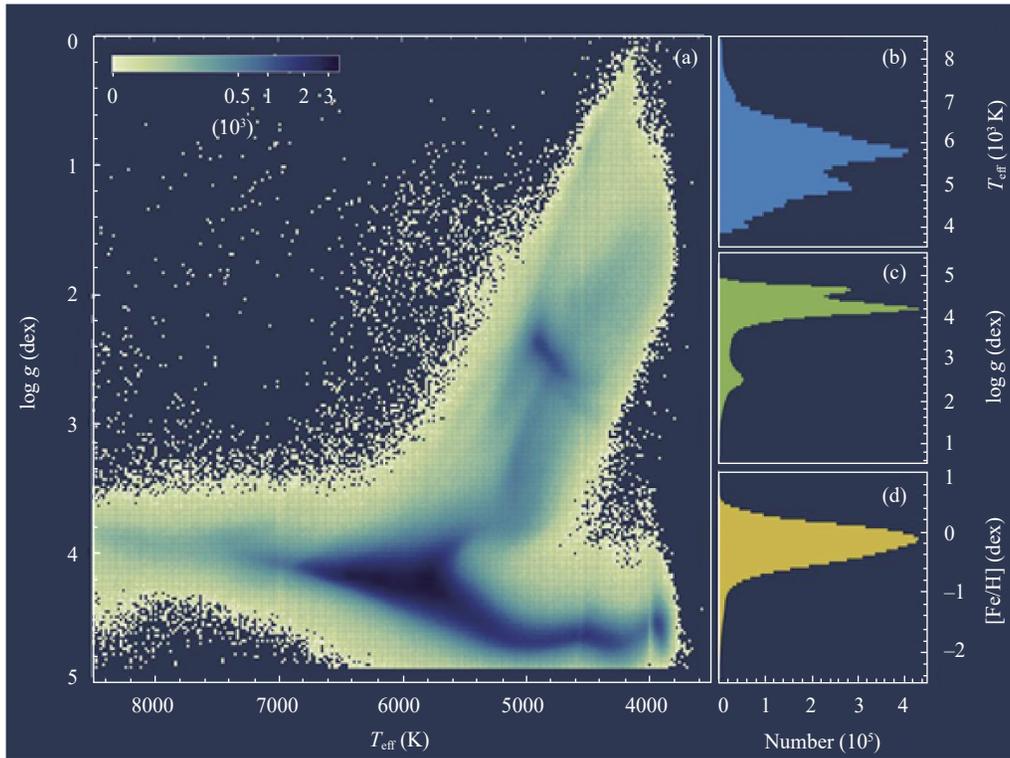


图1 LAMOST低分辨率光谱中恒星物理参数的分布 (a) 恒星有效温度(T_{eff})与表面重力($\log g$)参数空间的分布情况,其中颜色代表数密度(如左上角所示); (b)-(d)恒星分别随有效温度、表面重力和金属丰度的分布情况(图源:参考文献[3])



图2 第一代超大质量恒星演化成PISN的艺术图(图源:国家天文台)

的“奇偶效应”,且几乎不含中子俘获元素,这些特征与理论计算中260倍太阳质量的PISN结果高度吻合。该项研究不仅证实了第一代恒星的质量可以达到太阳质量的数百倍,刷新了我们对第一代恒星质量分布的认知,还揭示了PISN在宇宙早期化

学增丰过程中的关键作用,对研究第一代恒星的初始质量函数、元素起源、宇宙早期恒星形成和星系化学演化等领域具有重要意义,正如哈佛大学前天文系主任阿维·勒布所说:“发现PISN的证据是贫金属星研究领域的圣杯之一”。美国圣母大学教授

蒂莫·比尔斯认为,这是最近十年来第一代恒星研究领域最重要的成果之一。

3 奇异的特殊恒星

天文学家一直以来致力于建立描述恒星的大一统模型,事实上他们在这个方向上已经走了很远。但在实际的观测中,总有一些特殊恒星“游离”于标准恒星模型之外。这些特殊恒星表现形式各异,形成原因也不尽相同,但它们背后往往各自代表着一种尚未被理解的物理现象,对于特殊恒星的研究让天文学家能够及时发现现有恒星物理理论体系中的种种问题,并持续完善甚至重构这些基本物理。

锂元素是连接宇宙大爆炸、星际物质和恒星的关键元素之一。标准恒星模型预言锂元素会随着恒星演化逐渐被消耗。1982年,天文学家发现了第一颗虽然演化到晚期,但锂丰度却极高的恒星,这类被称为富锂巨星的天体对标准恒星模型提出了严峻挑战。近几年,天文学家利用LAMOST巡天大样本的优势搜寻并发现了超过一万颗富锂巨星,

其发现的数量是过去40年所有发现总和的4倍。值得一提的是,LAMOST还发现了锂丰度最高的恒星(如图3)^[6],其锂含量是太阳中的3000倍,被喻为宇宙中最大的“充电宝”。后续基于LAMOST的最新研究发现,富锂巨星的真实身份是红团簇星,而非以往所认为的红巨星^[7],彻底改变了人们对富锂巨星演化阶段的认知;更进一步地,部分基于LAMOST观测的数据表明,所有与太阳相似的恒星似乎都能够产生锂元素(这当然也包括我们太阳自己,只是它还没有演化到那个阶段)^[8]。以上种种都在对以往被广泛接受的观点——恒星中只会摧毁锂元素——提出了挑战。

类似富锂巨星这样的化学特征异常恒星还有很多,其中有一些可能揭示了一段银河系演化历史,是“星际大迁徙”的亲历者。近年来,天文学家依托LAMOST巡天数据在银晕中首次发现了一颗“外来移民”(如图4)^[9],其快中子俘获元素(如钫、铀、金)含量极高,而 α 元素(如硅、钙、钛)却异常低。这一化学成分与银晕恒星截然不同,却与银河系近邻

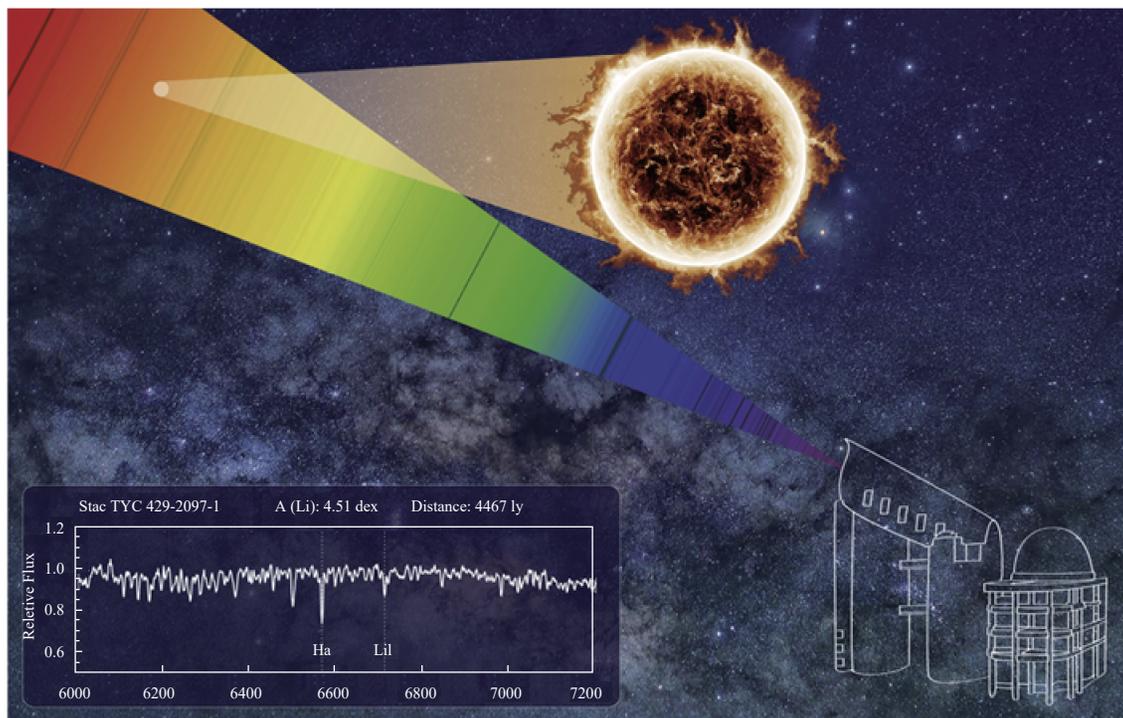


图3 LAMOST发现锂丰度最高恒星及其光谱的示意图(图源:参考文献[3])



图4 来自矮星系的银河系“外来移民”艺术图(图源: 国家天文台)

矮星系中的恒星极度吻合,表明其源自银河系吞并的矮星系。这项研究成果为银河系并合事件提供了确切可靠的化学证据,也为识别和研究银河系“外来移民”提供了新线索。

不仅如此,LAMOST目前正在系统地搜寻化学特殊星,并显著扩展了已知样本,其中还包括碳星、富氮恒星、贫 α 恒星、富s-和r-过程元素恒星等。与此同时,借助LAMOST庞大的恒星光谱数据库,也成功识别出了多种其他类型的特殊星,其中包括超高速星或候选体,双星和多星系统,质量极大的恒星以及极小的恒星等。

二、助力系外行星研究

在探索生命起源以及寻找宜居行星等重大科学问题的过程中,系外行星研究备受关注。近年来,开普勒(Kepler)卫星探测到数千颗系外行星候选体,但要准确测定其物理属性的关键在于对其宿主恒星进行光谱观测。然而,传统望远镜难以胜任这一任务。得益于LAMOST世界首屈一指的光谱获取率,LAMOST-Kepler项目结合光谱数据与时序测光数据,为Kepler目标提供精确的物理参数,并构建了大型同质数据库。

长期以来,太阳系的宏观特性,如内部行星尺寸和轨道参数等,是否在宇宙行星系统大家族中独一无二,一直是困扰天文学家的谜题。借助LAMOST-Kepler项目,天文学家逐渐揭开了它神秘的面纱。天文学家首次研究了系外行星轨道偏心率和倾角的统计分布规律,发现约八成的行星轨道如同太阳系为近圆形,且Kepler多行星系统的轨道参数符合太阳系规律。此外,研究人员利用“掩食时变”效应揭示了新的多行星系统轨道分布规律,并发现绝大多数系外行星系统也像太阳系一样拥有多个行星,且只有少数类太阳恒星周围存在超大行星。值得一提的是,另一项研究发现了系外行星新族群——热海星(Hot Jupiters,如图5)^[10]。这些热海星与其表亲——热木星有着相似的特性,即宿主通常为富金属恒星且仅约1%的系统中有热海星,并且这些行星系统通常为单凌星系统。这些重要发现不仅证实了太阳系在宇宙中的普遍性,还揭示了行星系统的多样性与复杂性,为探索宇宙奥秘、寻找外星生命及理解太阳系演化奠定了科学基础。

三、总结

LAMOST凭借其独特的优势,在恒星和行星科



图5 热木星(左下)和热海星(右下)想象图(图源:国家天文台)

学领域的研究中取得了重大突破。通过构建庞大的光谱数据库,以及与其他国际巡天项目的紧密合作,LAMOST 不仅使得天文学家能够发现各种具有特殊研究价值的天体,还为精确描绘银河系各个子结构提供了宝贵的物理信息。随着 LAMOST 巡天的继续开展和数据分析的深入,未来光谱数据的发布必将极大地推动我们对恒星物理、行星系统以及银河系演化的理解。

参考文献

- [1] Cui, X.-Q., Zhao, Y.-H., Chu, Y.-Q., et al. (2012). The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST). *Res. Astron. Astrophys.* 12, 1197–1242. doi:10.1088/1674-4527/12/9/003.
- [2] Luo, A.-L., Zhao, Y.-H., Zhao, G., et al. (2015). The first data release (DR1) of the LAMOST regular survey. *Res. Astron. Astrophys.* 15, 1095. doi:10.1088/1674-4527/15/8/002.
- [3] Yan, H., Li, H., Wang, S., et al. 2022, Overview of the LAMOST survey in the first decade. *The Innovation, The Innovation*, 3, 100224. doi:10.1016/j.xinn.2022.100224.
- [4] Xiang, M.-S., Liu, X.-W., Shi, J.-R., et al. (2017). Estimating stellar atmospheric parameters, absolute magnitudes and elemental abundances from the LAMOST spectra with Kernel-based principal component analysis. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 464, 3657–3678.
- [5] Xing, Q.-F., Zhao, G., Liu, Z.-W., et al. (2023), A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova, *Nature*, 618, 712–715. doi:10.1038/s41586-023-06028-1.
- [6] Yan, H.-L., Shi, J.-R., Zhou, Y.-T., et al. (2018). The nature of the lithium enrichment in the most Li-rich giant star. *Nat. Astron* 2, 790–795.
- [7] Yan, H.-L., Zhou, Y.-T., Zhang, X., et al. (2021). Most lithium-rich low-mass evolved stars revealed as red clump stars by asteroseismology and spectroscopy. *Nat. Astron* 5, 86–93. doi:10.1038/s41550-020-01217-8.
- [8] Kumar, Y.B., Reddy, B.E., Campbell, S.W., et al. (2020). Discovery of ubiquitous lithium production in low-mass stars. *Nat. Astron* 4, 1059–1063. doi:10.1038/s41550-020-1139-7.
- [9] Xing, Q.-F., Zhao, G., Aoki, W., et al. (2019). Evidence for the accretion origin of halo stars with an extreme r-process enhancement. *Nat. Astron* 3, 631–635. doi:10.1038/s41550-019-0764-5.
- [10] Dong, S., Xie, J.-W., Zhou, J.-L., et al. (2018). 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. U S A* 115, 266–271. doi:10.1073/pnas.1711406115.