



LAMOST发现第一代超大质量恒星化学遗迹

邢千帆¹, 赵刚^{1,2*}

1. 中国科学院国家天文台光学天文重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: gzhao@nao.cas.cn

Chemical relics of very massive first-generation stars from LAMOST

Qianfan Xing¹ & Gang Zhao^{1,2*}

¹ CAS Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: gzhao@nao.cas.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0586](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0586)

大质量的第一代恒星主导了宇宙早期的化学演化, 但目前对这类恒星的性质仍知之甚少, 如第一代恒星的质量分布范围和初始质量函数等问题都亟待观测数据给出相应的限制. 早期宇宙只含有氢、氦和极少量的锂铍硼, 缺乏重于氦的金属元素, 导致原始气体云不能有效地通过辐射进行冷却, 最早诞生的第一代恒星也因此具有相对较大的质量. 理论预言第一代恒星的质量处于数十倍到数百倍太阳质量之间^[1], 寿命约为几百万年. 它们在演化末期以超新星爆发的形式向周围抛射核合成产生的金属元素, 增加了气体云的金属含量, 提高了气体辐射冷却的效率, 极大地影响了下一代恒星的化学丰度和性质.

第一代恒星的质量决定了它们的演化过程. 依据恒星结构演化理论, 8~100倍太阳质量之间的第一代恒星由中心铁核坍缩形成的超新星, 称为核坍缩超新星(core collapse supernova, CCSN); 140~260倍太阳质量之间的第一代恒星由于演化过程中核心产生正负电子对而坍缩形成的超新星, 称为对不稳定超新星(pair-instability supernova, PISN)^[2]. 核坍缩超新星目前在天文上已经得到了众多观测的支持, 但对不稳定超新星自20世纪60年代提出以来一直缺乏直接的观测证据.

大质量的第一代恒星虽然已经消失, 但它们以超新星爆发终结时释放的物质在第二代恒星形成过程中被保留了下来. 第二代恒星一般为金属丰度极低的极贫金属星(金属丰度低于太阳的1%), 它们极可能诞生于第一代恒星终结时形成的气体云, 其化学丰度完整保留了第一代恒星演化产物的特征. 另一方面, 理论学家通过计算给出了不同质量的第一代恒星的超新星爆发产物的化学丰度, 通过比较超新星模型与观测得到的极贫金属星的化学丰度, 就可以确定组成极贫金

属星的物质源自何种类型的第一代恒星或其一定比例的混合成分.

数十年来, 贫金属星研究领域一直期望在极贫金属星中发现对不稳定超新星(前身星质量在140~260倍太阳质量之间)留存的化学遗迹, 但天文学家分析了上千颗极贫金属星的化学元素丰度, 发现与它们对应的超新星均为质量小于100倍太阳质量的第一代恒星引发的核坍缩超新星^[3], 表明保留了对不稳定超新星产物的第二代恒星可能极为稀少.

中国科学院国家天文台赵刚研究员带领的国际团队^[4]利用郭守敬望远镜(LAMOST)光谱巡天数据开展了大规模的贫金属星搜寻项目, 获得了包含上百万颗贫金属星的样本. 为深入研究早期宇宙的化学演化, 研究团队利用日本国立天文台8.2米昴星团望远镜对样本中的一大批贫金属星进行了高分辨率光谱观测, 精确确定了它们的化学元素丰度, 发现了一颗化学丰度极为特殊的恒星(LAMOST J1010+2358). 它的钠丰度是所有已知恒星中最低的, 低于太阳钠丰度的1%, 且基本不含镧、钡等中子俘获元素, 表明其未受到中子俘获过程的影响. 此外, 该恒星的化学元素丰度还显示出极强的“奇偶效应”, 即原子序数为奇数的元素丰度远低于相邻的原子序数为偶数的元素丰度, 比如钠比镁和钴比镍.

为分析恒星LAMOST J1010+2358化学丰度的起源, 研究团队详细比较了观测得到的丰度和超新星理论模型的计算结果, 首先排除了LAMOST J1010+2358的化学丰度来自多种超新星产物混合的可能. 核坍缩超新星与Ia超新星的混合模型虽然可以产生相对较低的镁比铁丰度, 但无法解释LAMOST J1010+2358极低的铬和锰丰度. LAMOST J1010+2358的化学丰度应该源自单一的超新星爆发, 比如核坍缩

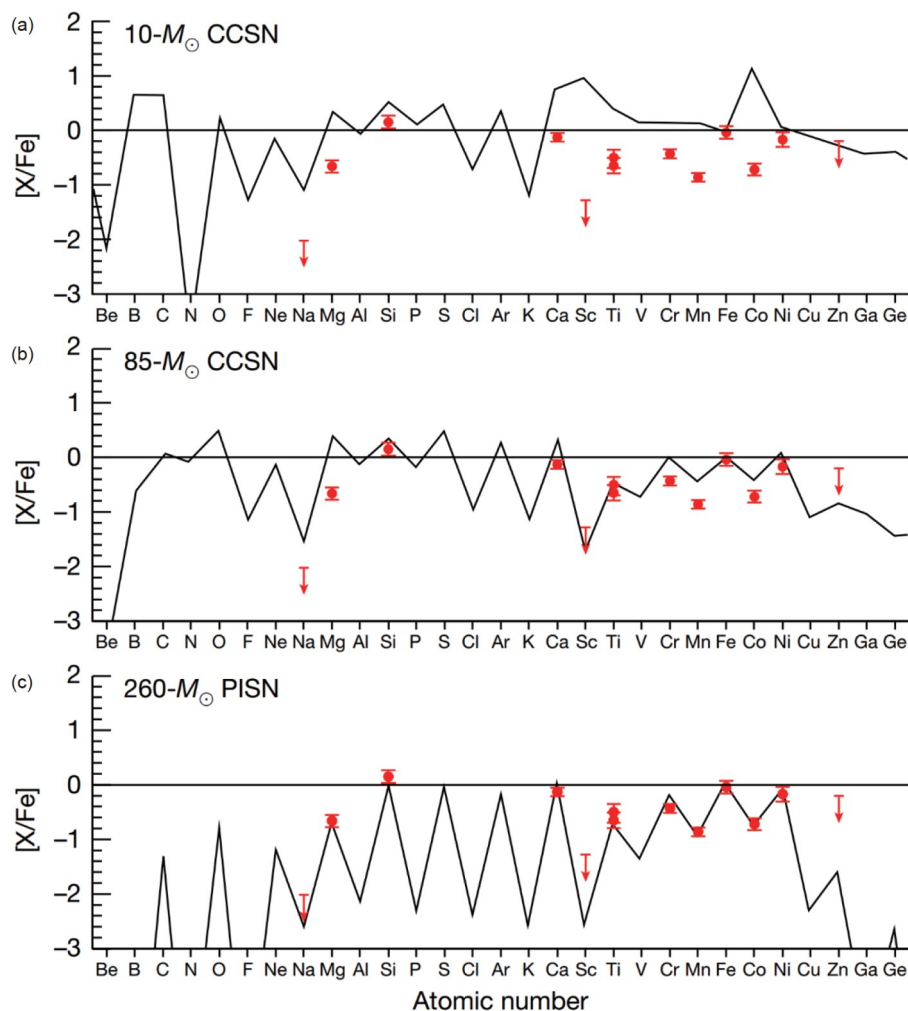


图 1 (网络版彩色)极贫金属星LAMOST J1010+2358与不同质量的超新星模型比较^[4]。圆点代表LAMOST J1010+2358的元素丰度,实线为理论模型计算给出的元素丰度,分别表示前身星质量为10倍太阳质量的核坍缩超新星(a)、85倍太阳质量的核坍缩超新星(b)和260倍太阳质量的对不稳定超新星(c)

Figure 1 (Color online) Comparison of the extremely metal-poor star LAMOST J1010+2358 and the supernova models with different mass^[4]. The dots represent the elemental abundances of LAMOST J1010+2358, the solid lines represent the elemental abundances calculated by the theoretical models: A 10 solar mass CCSN (a), an 85 solar mass CCSN (b), and a 260 solar mass PISN (c)

超新星或者对不稳定超新星,它们分别对应于8~100倍太阳质量和140~260倍太阳质量的第一代恒星。如图1所示,观测得到的元素丰度特征(例如极低的镁比铁和钴比铁)无法用核坍缩超新星模型解释,却与260倍太阳质量的第一代恒星演化形成的对不稳定超新星的理论模型高度吻合。对不稳定超新星不仅可以产生极低的钠丰度,还可以形成极强的“奇偶效应”。

这颗恒星的发现为对不稳定超新星的存在提供了清晰的化学证据,首次证实了第一代恒星的质量可以达到太阳质量的数百倍,改变了人们对第一代恒星质量分布的认知。众多理论研究均预言在金属元素极端匮乏的高红移原初气体

云中,恒星的初始质量函数决定了大质量的恒星占主导(a top-heavy initial mass function),会诞生大量超过100倍太阳质量的超大质量恒星。本次发现已经证实了在宇宙早期可以形成质量超过100倍太阳质量的第一代恒星,但宇宙早期的初始质量函数仍有待从观测上积累更多的样本才能够确定。研究团队未来计划利用LAMOST等光谱巡天数据发现更多保留了第一代超大质量恒星化学遗迹的贫金属星,通过与超新星模型比较分析,得到100倍太阳质量以上的第一代恒星的质量分布范围和初始质量函数,加深人们对宇宙早期恒星形成和星系化学演化的理解。

推荐阅读文献

- 1 Susa H, Hasegawa K, Tominaga N. The mass spectrum of the first stars. [Astrophys J](#), 2014, 792: 32
- 2 Heger A, Woosley S E. The nucleosynthetic signature of population III. [Astrophys J](#), 2002, 567: 532–543
- 3 Ishigaki M N, Tominaga N, Kobayashi C, et al. The initial mass function of the first stars inferred from extremely metal-poor stars. [Astrophys J](#), 2018, 857: 46
- 4 Xing Q F, Zhao G, Liu Z W, et al. A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova. [Nature](#), 2023, 618: 712–715