

When and how did the first stars and galaxies form?

第一代恒星与星系何时、怎样产生?

毛晓春

中国科学院国家天文台, 北京 100012

E-mail: xcmao@bao.ac.cn

2017-10-31 收稿, 2017-11-01 修回, 2017-11-02 接受, 2017-12-15 网络版发表

摘要 第一代恒星与星系的形成标志着宇宙从原初的平滑状态到当前的成团状态的转变. 标准宇宙学模型认为第一代恒星在红移等于30左右开始形成. 本文梳理了第一代恒星的形成理论, 并借助数值模拟手段介绍了恒星形成过程中的重要物理机制. 文章首先讨论了暗物质晕的演化及晕中原初气体的落入与冷却; 然后, 考虑了第一代恒星的反馈效应及其对吸积过程的影响, 这决定了第一代星系的性质. 在不久的将来, 现代的大型望远镜将实现对第一代星系的探测.

关键词 宇宙学, 星系形成, 恒星形成

宇宙微波背景(CMB)各向异性的探测证实了当今宇宙空间中的大尺度结构起源于演化早期微小的密度涨落. 引力的不稳定性使得密度较高的区域不断塌缩从而在愈来愈大的尺度上形成引力束缚体. 在结构形成的初期, 目前的观测技术尚难以触及, 科学家主要采用理论和数值模拟两种手段来研究第一代恒星和星系的形成过程.

根据热大爆炸宇宙学模型, 宇宙起源于约140亿年前的一个极端高温和高密度的原始火球, 并经历了一次暴胀过程. 在红移接近3500时, 宇宙的能量密度由辐射主导变成了物质主导. 此时的宇宙仍然高热, 气体处于电离状态, 电子-光子间的汤普森散射使得物质和辐射耦合在一起. 随着宇宙的膨胀, 当红移约等于1100时, 温度降低到3000 开尔文(K)以下. 这时, 电子与质子开始结合形成中性的氢原子, 电子与氦核结合形成中性的氦原子. 同时, 光子与物质粒子退耦, 开始在宇宙空间中自由传播, 形成了微波背景辐射. 通过对CMB的精确测量, 再结合其他的观测限制, 科学家们发现: 我们生活在一个平坦的宇宙中, 它由5%的重子物质、25%的暗物质和70%的暗能

量组成. 在标准暗物质模型下, 主流观点认为第一代恒星在红移30左右开始形成^[1,2].

第一代恒星形成的初始条件包括^[2]: (1) 均匀的宇宙背景上叠加了小的能量密度涨落; (2) 原初气体的化学成分相对简单, 金属元素没有出现; (3) 不涉及辐射反馈过程. 由此可以推测, 相较于当前宇宙中的恒星形成, 第一代恒星的形成过程会简单许多. 小尺度上的密度扰动通过吸积和并合过程经历了线性和非线性的引力增长, 质量从低到高的暗物质晕渐次形成. 当暗物质晕的质量超过金斯质量时, 重子物质的热压力不足以抵抗暗物质晕的自引力, 晕中的气体开始塌缩. 在气体落入暗物质引力势井的过程中, 其密度和温度都持续升高. 原初气体中, 可能存在多种冷却机制, 其中主要的一种是分子氢的形成^[2]. 气体的有效冷却使得塌缩过程得以继续, 暗物质晕中的气体变得愈加致密. 这些气体会积聚到晕中心形成一块大质量的气体云吗? 三维动力学数值模拟的结果表明暗物质晕中的致密气体很可能会碎裂成多块小的气体云, 其典型质量为 $10^2 \sim 10^3$ 个太阳质量^[3]. 这些小块的气体云仍然是引力束缚体系, 在

引用格式: 毛晓春. 第一代恒星与星系何时、怎样产生? 科学通报, 2017, 62: 4213–4215

Mao X C. When and how did the first stars and galaxies form (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 4213–4215, doi: 10.1360/N972017-01130

引力不稳定性的作用下会进一步吸积和塌缩. 第一代恒星(POP III)¹⁾最终在此诞生.

第一代星系的组建过程要远复杂于第一代恒星的形成. 这主要是因为后者的反馈效应会从多方面改变原初气体的性质和状态. 恒星的反馈分为两种: 辐射反馈和超新星反馈^[4]. 一旦恒星中心开始了核燃烧, 其发出的高能辐射会逐步电离周围的中性气体. 随着分子氢被离解, 原初气体中的冷却效率明显降低, 气体的塌缩过程受到影响, 这会降低恒星的形成率, 延迟后续的恒星形成进程. 此外, 原初气体温度的升高会导致金斯质量的增加, 这意味着更大质量的 POP III 星将陆续出现. 在个别暗物质晕中, 分子氢被高能辐射破坏殆尽, 高温气体甚至会直接塌缩形成黑洞^[5]. 第一代恒星演化到末期, 可能以超新星的形式爆发. 届时, 恒星内部核反应生成的重元素,

如碳、氧和铁, 被喷射到原初气体中. 超新星的爆发还会带来巨大的动能, 爆发形成的激波能将气体加热到几千 K 的高温. 相较于气体, 冲击波对暗物质的影响要小得多, 暗物质晕可以持续增长, 质量大到足以形成第一代星系. 此时, 暗物质晕的典型质量为 10^8 个太阳质量, 气体的典型温度接近 10^4 K^[5]. 在第一代星系中, 重元素作为一种新的冷却剂可以有效降低金属增丰气体的温度, 使其塌缩形成贫金属星(POP II)²⁾. 目前普遍认为, 第一代星系中存在低质量的第二星族星^[4].

科学家已经坚定地踏上了搜寻第一代恒星和星系的征程. 正在建设的美国詹姆斯韦伯太空望远镜(JWST)和地面 30 米红外望远镜(TMT)都将直接探测第一代发光天体的辐射作为主要的科学目标. 一场关于早期结构形成的认知革命即将来临.

参考文献

- 1 Barkana R, Loeb A. In the beginning: The first sources of light and the reionization of the Universe. *Phys Rep*, 2001, 349: 126–238
- 2 Glover S. The formation of the first stars in the Universe. *Space Sci Rev*, 2005, 117: 445–508
- 3 Loeb A. First Light. 2006, arXiv: astro-ph/0603360
- 4 Bromm V, Yoshida N. The first galaxies. *Annu Rev Astron Astr*, 2011, 49: 373–407
- 5 Johnson J. Formation of the First Galaxies: Theory and Simulations. Berlin: Springer-Verlag, 2013



毛晓春

中国科学院国家天文台副研究员, 硕士研究生导师. 2009 年毕业于中国科学院研究生院, 获理学博士学位. 于 2012 和 2015 年以访问学者身份赴美国加州大学开展学术交流. 主要研究领域: 宇宙早期的结构形成, 宇宙再电离时期的探测.

1) 第一代恒星中不含有金属元素, 故被称为无金属星, 即第三星族星
2) 第二星族星, 其金属丰度的典型值约为 10^{-3} 太阳丰度

Summary for “第一代恒星与星系何时、怎样产生?”

When and how did the first stars and galaxies form?

MAO XiaoChun

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
E-mail: xcmao@bao.ac.cn

The formation of the first stars and galaxies marks the transformation of the Universe from its smooth initial state to its clumpy current state. In standard cosmological models, the first generation of stars began to form at redshift $z=30$. Here, we survey the theory of the formation of the first stars, with a focus on the results of numerical simulations to illustrate a number of the key processes that define their properties. We firstly discuss the evolution of the dark matter halos and the infall and cooling of the primordial gas within them. We then consider the interplay between protostellar accretion and feedback that serves to determine the character of the first galaxies. Modern large telescopes will discover the first galaxies in the near future.

cosmology, galaxy formation, star formation

doi: 10.1360/N972017-01130