



同时揭秘暗物质与第一代星系性质的21厘米森林探针

徐怡冬^{1,2}, 张鑫^{3,4,5*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;
2. 中国科学院射电天文与技术重点实验室, 北京 100101;
3. 东北大学辽宁省宇宙学与天体物理重点实验室, 沈阳 110819;
4. 东北大学工业智能与系统优化国家级前沿科学中心, 沈阳 110819;
5. 东北大学智能工业数据解析与优化教育部重点实验室, 沈阳 110819

* 联系人, E-mail: zhangxin@mail.neu.edu.cn

The 21-cm forest capable of simultaneously unveiling properties of dark matter and the first galaxies

Yidong Xu^{1,2} & Xin Zhang^{3,4,5*}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ Key Laboratory of Cosmology and Astrophysics (Liaoning), Northeastern University, Shenyang 110819, China;

⁴ National Frontiers Science Center for Industrial Intelligence and Systems Optimization, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

⁵ Key Laboratory of Data Analytics and Optimization for Smart Industry (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China

* Corresponding author, E-mail: zhangxin@mail.neu.edu.cn

doi: [10.1360/TB-2023-0750](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0750)

宇宙在大爆炸之后迅速膨胀、冷却, 大约在宇宙年龄38万年(红移约1100)时, 质子与电子复合形成氢原子. 从那时起, 直至第一代恒星和星系形成(理论估计宇宙年龄约1亿年, 红移~30)的这一时期被称为宇宙的“黑暗时代”(dark ages). 黑暗时代的宇宙没有可观测天体, 但在万有引力的作用下, 宇宙原初的密度扰动开始增长并形成最早的结构. 在这个过程中, 暗物质扮演着至关重要的角色. 暗物质在引力的作用下聚集起来, 形成一定质量分布的暗物质晕. 重子物质落入到暗物质晕的引力势阱中, 并通过辐射冷却进一步集结成团, 最终形成星系以及星系中的大量恒星. 可以说, 宇宙中如果没有这些不发光的暗物质, 就不会形成各种发光的天体. 宇宙从黑暗走向光明的“幕后推手”正是不发光的暗物质.

在暗物质的帮助下, “幕前主角”逐渐登场——第一代星系形成了. 它们发出的光重新照亮了周围的星系际介质, 宇宙迎来了黎明时期(cosmic dawn). 星系发出的紫外辐射把周围的中性氢气体再次电离并加热, 并在其周围形成电离氢区; 同时更高能的X射线光子会传播更远的距离, 把更大范围的气体加热. 这就是宇宙的再电离(cosmic reionization). 根据现有的观测, 氢的再电离结束的时刻大约为宇宙年龄10亿年(红移~6).

要探究宇宙是如何从黑暗走向光明的, 关键在于理解“幕后推手”——暗物质的性质, 以及“幕前主角”——第一代星系的性质. 暗物质的本质是什么? 暗物质是“冷”还是“温”, 其粒子质量多大? 宇宙中第一代星系是如何在暗物质晕中形成的? 它们如何照亮黑暗时代并迎来宇宙黎明? 宇宙早期的星系际介质是如何被第一代星系电离并加热的? 这些问题一直是天文学领域致力于解答的重大科学难题.

对宇宙黎明和再电离过程的探测, 目前已知的直接观测手段只有中性氢的21厘米谱线^[1]. 21厘米谱线是中性氢原子基态的电子自旋反转跃迁所产生的谱线, 该谱线在本地静止坐标系下的波长为21 cm(频率1420.4 MHz). 中性氢的21厘米谱线为宇宙黎明与星系际介质的再电离过程提供了独一无二的探测手段, 利用21厘米谱线探测宇宙黎明与再电离也是平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)最重要的科学目标之一.

宇宙黎明时期的中性氢21厘米信号有多种观测模式, 主要可以分为3类. 常见的两种观测模式以宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)为背景源. 第一代发光天体直接和间接产生的莱曼阿尔法光子导致气体自旋温度偏离当时的CMB温度, 形成可探测的21厘米吸收或发射信

号^[2]。第一类是测量全天平均的21厘米信号。宇宙不同演化时刻的信号经过宇宙学红移,出现在不同的观测频率,因此可以测量全天平均的21厘米频谱,也叫21厘米整体谱测量。不同的21厘米吸收和发射谱反映了黑暗时代和宇宙黎明的历史,可揭示第一代发光天体的性质,检验宇宙学基本理论。2018年颇具争议的EDGES实验结果^[3],以及2022年SARAS-3实验的结果^[4],都是对宇宙黎明21厘米整体谱的探测。第二类是测量21厘米信号在不同方向上的空间扰动。因为不同的观测频率对应不同红移(即不同演化时刻)的信号,我们可以用21厘米观测对宇宙做断层扫描,因此这种测量也叫21厘米层析观测。通过21厘米层析观测,不仅可以对宇宙黎明和再电离时期的整体电离和加热历史进行重建,还能对电离源和电离区的空间分布及其形态演化进行全面刻画。这正是目前LOFAR、MWA、HERA,以及在建的SKA等低频射电阵列的首要科学目标。第三类观测模式是过去讨论得比较少的,叫21厘米森林观测。不同于前两种,21厘米森林以高红移射电点源为背景辐射,在其连续谱上测量沿途各种结构产生的21厘米吸收线。来自不同红移的结构会在不同频率上产生密集的吸收线,类似于莱曼阿尔法森林,这种21厘米的吸收线丛被形象地称为21厘米森林。

21厘米森林有两个重要特点:一是吸收光深反比于自旋温度,信号对温度特别敏感,因此21厘米森林可以作为宇宙黎明时期星系际介质温度的灵敏探针^[5]。第二,宇宙黎明时期21厘米吸收线的主要贡献者是中性的小尺度结构,特别是小暗晕(minihalo)及其周边介质。因此,21厘米森林可以用于探测宇宙黎明时期的小暗晕和矮星系,它是探测结构形成早期小暗晕的唯一直接探针^[6]。值得注意的是,宇宙中小暗晕的数密度与暗物质的性质息息相关。不同的暗物质粒子质量会导致宇宙中小质量暗晕的丰度不同。在温暗物质模型下,较小的暗物质粒子质量会抑制宇宙中的小尺度结构形成,使得小暗晕的数目减少。如果对21厘米森林吸收线进行计数,那么吸收线的数密度就反映了暗物质的性质。

21厘米信号里蕴藏着丰富的宇宙学信息,因此国际上已竞相开展了21厘米探测实验。对于21厘米整体谱测量和21厘米层析观测,国际上都已经有一些实测数据,并已对信号给出了测量上限,而至今唯独没有开展21厘米森林的探测尝试。这是因为21厘米森林信号从理论建模到实际观测,都面临着种种挑战。一方面,21厘米森林信号的理论计算需要极高动态范围的物理建模。信号受到百兆秒差距尺度上宇宙大环境的影响,同时21厘米吸收的主要贡献者为千秒差距尺度上的小暗晕结构。因此,要准确计算吸收线强度,需要在线尺度上跨越5个多数量级,或者说在质量尺度上跨越15个数量级,对气体密度轮廓、温度轮廓、电离与复合等过程进行建模。另一方面,21厘米森林信号微弱,且信号敏感于温度,一旦早期星系辐射的X射线对气体加热程度较高,信号幅度将急剧下降。即使利用LOFAR、SKA等大型射电望远镜,对信号的有效探测都需

要上千小时的积分时间。而且,21厘米森林信号的探测依赖于宇宙黎明时期的射电亮源的获取,使得多年来21厘米森林探测面临极大挑战。更严重的是,21厘米森林信号同时受到第一代星系加热效应和暗物质性质的影响,观测上很难区分这两种效应^[7]。这使得21厘米森林探测在提出以来的20多年中,难以实际用于限制第一代星系的加热效应或暗物质的性质。

最近,中国科学院国家天文台和东北大学的联合研究团队对宇宙黎明的21厘米森林信号开展了深入研究,通过采用跨尺度混合建模的方式突破动态范围限制,模拟了不同暗物质粒子质量、不同气体加热率下的21厘米森林信号^[8]。研究发现,早期星系形成对气体的加热效应和温暗物质带来的效应造成21厘米吸收线在各个尺度上的成团性不同,因此通过测量一维功率谱,其幅度和形状特征使得信号的尺度依赖性被显现出来(图1)。模拟测量结果显示,由于气体加热,21厘米吸收深度整体降低,使得功率谱在全尺度上被压低(图1(a)),且大尺度压低效应更为显著。而温暗物质模型通过抑制小尺度结构,使得小暗晕贡献减少,功率谱将在小尺度被压低,变得更为陡峭(图1(b))。该研究提出了一维交叉功率谱测量这一统计测量方案,利用信号的尺度依赖特征打破两种效应的简并性,从而可同时限制气体加热效应和暗物质粒子质量。

同时,模拟结果显示,一维交叉功率谱这种统计测量方式能够显著压低噪声,提高测量灵敏度,使得21厘米森林探测所需的积分时间大为减少,探测变得切实可行。根据SKA低频阵列的设计方案,研究发现,如果在宇宙黎明X射线发射率大约是今天的10%,那么利用SKA一期低频阵列就可以同时对早期的气体加热率和暗物质粒子质量给出精确限制(温暗物质粒子质量精度约20%,气体温度精度约6%);如果早期的X射线发射率与今天相当,那么我们将需要SKA二期低频阵列,此时暗物质粒子质量的限制精度将达到约10%,同时气体温度的限制精度约为15%。早期的X射线发射率直接反映了宇宙第一代星系的辐射特征,因此21厘米森林的一维功率谱测量将能够限制宇宙第一代星系的性质。不仅如此,该观测还可以同时测量温暗物质粒子的质量。

为实现21厘米森林探测,我们需要宇宙黎明时期的射电亮源作为背景辐射源,它们可以是高红移的射电噪类星体或是高红移伽马暴的射电余晖。目前红移大于6的类星体已发现了约250个,其中有12个是射电噪类星体;伽马暴在红移8以上已发现了2个。这些源都可以作为21厘米森林的背景源来开展探测尝试。在不久的将来,我们预期将有更多宇宙黎明时期的射电噪类星体和伽马暴逐步被发现。因此,21厘米森林的一维功率谱确实可以成为一箭双雕的宇宙学探针。

利用宇宙黎明时期的探测来回答暗物质到底是“冷”还是“温”的问题,将有助于构建暗物质性质及演化的完整图景;通过测量宇宙热演化历史,可以揭示第一代发光天体的性质。21厘米森林测量还可以和其他两种21厘米探测手段相结合,进行交叉验证,对宇宙黎明与再电离过程开展联合观测研究。

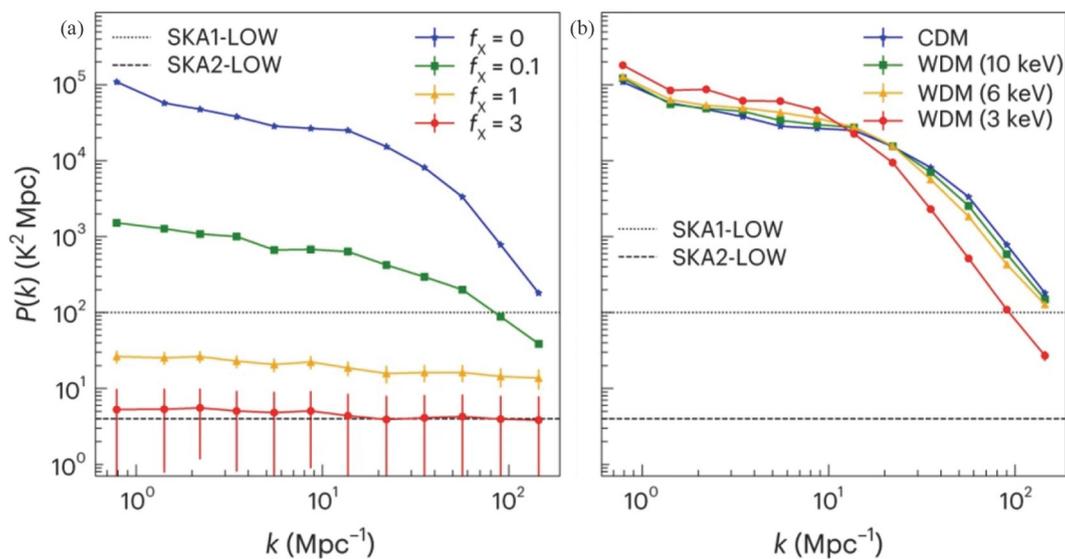


图 1 (网络版彩色)模拟得到的21厘米森林一维功率谱^[8]. (a) 冷暗物质模型下, 宇宙黎明不同加热率的21厘米森林功率谱信号. (b) 未加热的星系际介质中, 不同暗物质粒子质量下的21厘米森林功率谱信号. 点线和虚线分别为一期和二期SKA低频阵列的热噪声水平, 误差棒为SKA二期低频阵列的测量误差. 功率谱的形状和幅度将能用于区分温暗物质和加热效应

Figure 1 (Color online) The one-dimensional power spectra of the 21-cm forest from simulations^[8]. (a) The power spectrum signals of the 21-cm forest with varying cosmic dawn heating rates under the cold dark matter model. (b) The power spectrum signals of the unheated intergalactic medium with different dark matter particle masses. Dotted and dashed lines represent the thermal noise levels of Phase 1 and Phase 2 of the SKA-LOW array, respectively, while the error bars denote the measurement errors for SKA-LOW Phase 2 array. The shape and amplitude of the power spectra could be utilized to distinguish between warm dark matter and cosmic heating effects

利用宇宙黎明时期21厘米森林信号的一维功率谱测量, 未来SKA将能够同时揭秘宇宙第一代星系和暗物质的性质. 这对

于解开暗物质和宇宙早期天体形成的奥秘以及揭示宇宙结构形成和演化的过程具有重要意义.

推荐阅读文献

- 1 Madau P, Meiksin A, Rees M J. 21 centimeter tomography of the intergalactic medium at high redshift. *Astrophys J*, 1997, 475: 429–444
- 2 Chen X, Miralda-Escude J. The spin-kinetic temperature coupling and the heating rate due to Ly α scattering before reionization: Predictions for 21 centimeter emission and absorption. *Astrophys J*, 2004, 602: 1–11
- 3 Bowman J D, Rogers A E E, Monsalve R A, et al. An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum. *Nature*, 2018, 555: 67–70
- 4 Singh S, Nambissan T J, Subrahmanyan R, et al. On the detection of a cosmic dawn signal in the radio background. *Nat Astron*, 2022, 6: 607–617
- 5 Xu Y, Chen X, Fan Z, et al. The 21 cm forest as a probe of the reionization and the temperature of the intergalactic medium. *Astrophys J*, 2009, 704: 1396–1404
- 6 Xu Y, Ferrara A, Chen X. The earliest galaxies seen in 21 cm line absorption. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 410: 2025–2042
- 7 Shimabukuro H, Ichiki K, Inoue S, et al. Probing small-scale cosmological fluctuations with the 21 cm forest: Effects of neutrino mass, running spectral index, and warm dark matter. *Phys Rev D*, 2014, 90: 083003
- 8 Shao Y, Xu Y D, Wang Y G, et al. The 21-cm forest as a simultaneous probe of dark matter and cosmic heating history. *Nat Astron*, 2023, doi: 10.1038/s41550-023-02024-7