SKA与21 cm宇宙学

徐怡冬¹, 张鑫^{2*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 东北大学理学院物理系, 沈阳 110819

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

收稿日期: 2020-02-06; 接受日期: 2020-02-19; 网络出版日期: 2020-04-15

摘要 探测中性氢原子的21 cm信号对于理解宇宙最初十亿年的演化历史至关重要, 同时可以为研究宇宙的膨胀历史、暗物质与暗能量的性质, 以及结构形成与演化提供重要的宇宙学探针. 平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)是一个国际大科学工程项目, 建成后将成为世界上最大的射电望远镜. 在未来的几十年内, SKA将推动21 cm宇宙学迈入一个新时代.

关键词 平方公里阵列射电望远镜, 21 cm宇宙学, 宇宙黎明与再电离, 暗能量, 中性氢巡天

PACS: 95.36.+x, 98.80.Es, 98.80.-k

宇宙大爆炸之后, 当宇宙年龄为38万年的时候, 质子俘获电子形成中性氢原子, 从此光子不再与电子频繁碰撞从而可以在宇宙中自由行走了. 这些光子在漫长的岁月中传播了很远的距离, 如今已主要集中在微波频段(温度约为2.7 K, 每立方厘米约有410个这种原初光子), 被称为“宇宙微波背景”(Cosmic Microwave Background, CMB). 近30年来, 人们通过一系列卫星实验(COBE, WMAP和Planck)对CMB上的微小的温度涨落进行了精确的测量, 绘制出CMB温度随空间变化的天图, 并由此对CMB功率谱进行了精确测量(参见文献[1]; CMB温度涨落天图及温度角功率谱, 见图1). 宇宙学的发展从CMB天图中获益良多. 正是对CMB的精确测量将宇宙学的发展推进到了一个精确宇宙学时代^[2,3].

CMB温度和极化功率谱的测量为宇宙学参数提

供了强有力的限制. Planck卫星的观测结果明确支持一个仅包含6个基本宇宙学参数的宇宙学模型, 即所谓的宇宙学常数冷暗物质(Λ Cold Dark Matter, Λ CDM)模型, 该模型的预言与几乎所有的宇宙学观测都符合得很好, 因此如今已被普遍视为一个宇宙学的标准模型^[4].

在CMB形成之后直至第一代恒星和星系形成(理论估计此时的宇宙年龄约1亿年, 对应的红移约为30)的这段时期里, 宇宙中的普通物质主要以氢原子和氦原子气体的形式存在. 但是这些原初气体几乎是隐形的, 而宇宙中也尚未形成恒星、星系等发光天体. 宇宙在这段时期是黑暗的, 因此宇宙学家将这一时期称为“黑暗时代”(Dark Ages, DA). 宇宙学中的一个非常重要的问题是, 宇宙是如何从黑暗走向光明的. 即, 这

引用格式: 徐怡冬, 张鑫. SKA与21 cm宇宙学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 079801

Xu Y D, Zhang X. The Square Kilometre Array and 21 cm cosmology (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 079801, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0030

图 1 (网络版彩图) CMB 的温度涨落. (a) Planck 卫星所测得的 CMB 温度涨落的天图. CMB 的温度几乎是完美的各向同性的(温度为 2.725 K), 但是其上仍存在微小的各向异性, 温度涨落幅度约为 10^{-5} , 如图中的热斑(橙色)和冷斑(蓝色)所示. (b) CMB 温度涨落角功率谱(Planck 2018 观测结果). 红点为观测数据, 误差棒表示一个标准偏差的不确定度. 上图中的蓝线为根据 Λ CDM 模型所得到的最佳拟合的理论功率谱. 下图则显示相对于这个理论结果的残差. (a) 取自 ESA 网站(http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck); (b) 取自文献[1]

Figure 1 (Color online) Temperature fluctuations on the CMB. (a) Map of the temperature fluctuations of the CMB observed by the Planck satellite. The temperature of the CMB is almost perfectly isotropic (with the temperature of 2.725 K), but there are still extremely small anisotropies in the temperature, with the fluctuations of about 10^{-5} , as shown by the hot (orange) and cold (blue) spots. (b) CMB temperature angular power spectrum (derived from the Planck 2018 observation). The red dots represent the observational data, and the error bars represent the uncertainties of one standard deviation. The blue curve in the upper panel is the best-fit theoretical power spectrum assuming a Λ CDM model. The residuals with respect to this model are shown in the lower panel. (a) is taken from the ESA website (http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck), and (b) is taken from ref. [1].

样一片均匀的气体是如何演化成恒星、星系和行星的? 这一谜团关乎到我们自身是如何起源的^[5].

解开这一谜团的钥匙在于中性氢原子的一种极其微弱的辐射. 氢原子中仅有一个电子, 它在基态上有两种可能的自旋方向, 这两种状态的能量差极小. 当电子

在这两种自旋方向对应的状态之间变化时, 就会放出或吸收一个频率极低的光子, 其波长为 21 cm (频率为 1420 MHz). 探测到这条谱线就能了解中性氢在宇宙的极早期是如何分布以及如何演化的. 在黑暗时代之后, 还有两个重要的阶段, 分别被称为“宇宙黎明”(Cosmic Dawn, CD)和“再电离时期”(Epoch of Reionization, EoR). 宇宙黎明是指第一代恒星与星系开始形成并重新照亮宇宙的时期, 再电离时期是指大量星系形成并把星系际介质中的氢原子再次电离的时期. 在这些时期中性氢 21 cm 信号有非常显著的变化^[6]. 由于宇宙膨胀, 光子的波长会被拉长, 来自宇宙黑暗时代的 21 cm 光子的波长到今天已经被拉伸到 6.5 m 以上 (频率 45 MHz 以下); 来自宇宙黎明与再电离时期的 21 cm 光子的波长大约在 1.5–6.5 m 之间 (对应频率 45–200 MHz).

在黑暗时代, 氢原子随宇宙膨胀而冷却, 其温度逐渐低于 CMB 的亮温度, 它们吸收的背景辐射光子比放出的多, 因此在 21 cm 亮温度谱上呈现出一个吸收谷. 从宇宙年龄约为 1 亿年开始, 物质聚集在一起已开始形成第一代恒星和星系, 宇宙进入黎明时期, 此时恒星和星系向星系际空间释放紫外辐射, 其中莱曼阿尔法频率的光子使得星系际介质中的氢原子变得更容易吸收 21 cm 光子, 因此在 21 cm 亮温度谱上呈现出另一个吸收谷 (比黑暗时代的吸收谷更深). 此后, 星系产生更多的紫外与 X 射线光子, 使得气体被加热. 当气体温度高于 CMB 温度时, 中性氢气体开始发亮 (辐射 21 cm 光子). 随着星系的大量形成, 它们逐渐把星系际介质中的氢原子电离, 产生没有 21 cm 信号的电离泡泡, 这些电离泡泡逐渐变大、融合, 因此星系之间发亮的氢原子气体越来越少, 这一再电离过程在 21 cm 亮温度谱上呈现出一个低矮平滑的发射鼓包. 图 2 展示了 21 cm 中性氢信号的演化 (上述的全天平均 21 cm 整体谱信号的演化如图 2(b) 所示).

对宇宙黎明和再电离过程的观测和探索, 对于获取宇宙演化的完整图景、理解宇宙结构的起源, 以及探索宇宙的基本物理规律都是非常重要的. 一些正在进行或筹备之中的 21 cm 射电天文学实验正在试图探测 EoR. 除了上述 21 cm 整体谱信号, 还可以测量宇宙中不同位置处 21 cm 信号的涨落. 通过对 21 cm 信号的断层扫描 (在不同红移处, 对应于不同的波长), 可以绘制出中性氢随时间演化的三维图谱. 此外, 还可以借助

图 2 (网络版彩图)中性氢 21 cm 信号在黑暗时代、宇宙黎明和再电离时期的演化. (a) 21 cm 亮温度涨落的演化, 从黑暗时代一直到再电离时期结束. 该演化是由一个个红移切片拼接所得, 每个红移切片是宇宙学数值模拟在一个宇宙演化时刻的输出结果. 不同颜色代表不同的 21 cm 亮温度. (b) 预期的 21 cm 亮温度全天平均值的演化, 从黑暗时代开始一直到再电离时期结束. 取自文献[6]

Figure 2 (Color online) The evolution of the 21 cm signal from neutral hydrogen during the dark ages, the cosmic dawn, and the epoch of reionization. (a) The evolution of fluctuations in the 21 cm brightness from dark ages to the end of the epoch of reionization. This evolution is obtained by piecing together redshift slices from a cosmological simulation. Colors are used to indicate different strengths in the 21 cm brightness temperature. (b) The expected evolution of the sky-averaged 21 cm brightness from the dark ages to the completion of reionization. This figure is taken from ref. [6].

再电离时期的射电点源(如类星体, 或伽马暴的射电余辉), 探测视线方向上不同结构产生的 21 cm 吸收线(这被称为 21 cm 线丛或 21 cm 森林). 利用这些手段, 人们试图描绘出电离泡泡何时形成、形状如何、如何增长和渗透融合的种种细节, 以及电离源的性质.

已经有一系列低频射电阵列实验(如荷兰的 LOFAR、澳大利亚的 MWA、南非的 HERA, 以及中国的 21CMA)开始开展 EoR 探测. 最具雄心的射电天文学项目是“平方公里阵列射电望远镜”(Square Kilometre Array, SKA), 它是由全球超过 10 个国家合资建造的世界最大的综合孔径射电望远镜阵列, 其等效接收面积达平方公里级.

SKA 的概念在 1993 年即提出, 由包括中国在内的 10 个国家的天文学家联合倡议筹划建造. 经过近 20 年的持续发展, 在 2011 年由包括中国在内的 7 个创始成员国成立了独立法人机构——国际 SKA 组织(SKA Organization, SKAO). 目前 SKAO 有 13 个成员国(澳大利亚、加拿大、中国、印度、意大利、新西兰、南非、西班牙、瑞典、荷兰、英国、法国和德国). SKA 规模空前, 它最终将建设上千面反射面天线和 100 多万个低频天线, 天文学家将利用这一庞大的射电望远镜阵列

以极高的精度监测天空中的种种细节, 其扫描整个天空的速度远远快于当前的任何射电望远镜.

SKA 将分阶段建设. 建设准备阶段(包括详细设计、技术实现、工程研发、合同准备等)从 2012 年开始并持续到 2021 年, 为 SKA 一期阵列(SKA1)的建设做好准备. SKA1 的建设将从 2021 年持续到 2028 年, 第二阶段(SKA2)将在 2028 年以后开始建设.

SKA1 的设计方案在 2019 年 11 月 SKA 上海大会暨第六届 SKA 工程大会之后就正式确定下来了. SKA1 将由位于南非的中频阵列(SKA1-MID)、位于澳大利亚的低频阵列(SKA1-LOW)和位于英国的 SKA 总部组成. SKA1-MID 将由 150 km 范围内的 197 面碟形天线组成, SKA1-LOW 将由 60 km 范围内的 13 万个双极化的对数周期天线组成. 整个 SKA1 射电阵列覆盖的频率范围为 50 MHz–20 GHz. 两个站址所采集的庞大数据经过本地预处理, 将传递到分布于全球的 5 个区域数据中心进行科学数据处理, 再提供给科学家进行科学研究. 可以说, SKA 是一个典型的在宏伟科学目标驱动下实施的国际大科学工程, 它由世界诸多国家的科学和技术人员共同参与建造, 共同运行和管理, 是一个超越国界的全球大科学装置(图 3).

图 3 (网络版彩图)在夜间运行的SKA(艺术效果图). 取自SKA网站(<https://www.skatelescope.org>)

Figure 3 (Color online) An artist's impression of the SKA at night. This figure is taken from the SKA website (<https://www.skatelescope.org>).

SKA的首要科学目标就是利用中性氢21 cm信号进行EoR成像观测, 以及进行CD和EoR功率谱测量. 利用SKA1低频阵列, 可在50–200 MHz进行21 cm观测, 直接通过成像观测展示EoR图像. EoR成像观测可揭示宇宙第一代恒星或黑洞的形成以及气体再电离的复杂过程, 重现宇宙从黑暗走向光明的历史. 与前述的目前正在运行的SKA探路者项目相比, SKA1低频阵列是唯一可实现EoR成像观测的实验装置, 具有重大的历史意义. 利用SKA低频阵列的大面积天区巡天观测还可以统计探测红移6–27的21 cm信号功率谱, 描绘出三维中性氢气体的分布或断层扫描图像. 未来, SKA2将大大提高阵列的角分辨率和灵敏度, 其目标是在更大的尺度范围内对黎明时期和再电离时期的宇宙进行更为精确的测量.

EoR成像观测只是SKA诸多科学目标中的一个, 它将在许多重要领域孕育重大的科学发现. 经各国科学家共同进行科学目标凝练, 目前已形成了SKA项目的五大科学目标: (1) 宇宙黎明和再电离时期探测; (2) 星系演化、宇宙学与暗能量研究; (3) 孕育生命的摇篮; (4) 利用脉冲星进行基础物理检验; (5) 宇宙磁场的起源和演化. 利用SKA这一大科学装置, 在未来我们将能够从根本上回答宇宙学中的一些最基本的问题, 而随着这些基本问题的解答, 人类对宇宙的认识也将进入一个新时代.

中国参与SKA的最大驱动和终极目标是获得丰硕的科学回报. 近年来, 中国射电天文学界已成立了中国

SKA科学团队. 由10个科学研究课题组组成, 已确立了清晰的科学目标和发展路线图, 即在SKA1的实施阶段, 确保两个优先突破领域(宇宙黎明与再电离探测; 脉冲星搜寻、测时和引力检验)和若干具有中国特色的研究方向, 概括为“2+1”推进战略. 此发展战略与国际SKA1遴选的优先科学目标高度契合.

开展中性氢21 cm宇宙学研究也是中国SKA科学团队所致力于取得重要突破的方向之一. 利用SKA中频阵列可以研究晚期宇宙的演化, 特别是可以探索暗能量的性质.

暗能量是宇宙学家假想的一种弥漫在宇宙中所有空间中的均匀的能量成分, 它最奇特的性质在于它所产生的万有引力并不是吸引性的, 而是排斥性的^[7–9]. 根据当前宇宙学的观测, 暗能量正在主导宇宙的演化, 它占据宇宙总能量的约68%(暗物质占比约27%, 而普通原子物质只占宇宙总能量的5%左右), 因此暗能量的排斥力正在驱动宇宙加速膨胀. 可见, 正是由于暗能量的存在, 宇宙当前并不是在减速膨胀, 而是在加速膨胀. 宇宙加速膨胀的事实是在1998年由超新星观测发现的, 这一发现已被授予2011年度的诺贝尔物理学奖.

暗能量的性质决定了宇宙的最终命运. 在目前的宇宙学标准模型(即 Λ CDM模型)中, 暗能量被认为是宇宙学常数(它等效于真空能密度), 它的能量密度在不断膨胀的宇宙中一直保持不变. 关于暗能量的另一种观点认为它的密度还是应该随着宇宙的膨胀而缓慢变化的, 其中一种可能的情况是其密度随宇宙膨胀而

缓慢稀释, 而另一种看起来十分匪夷所思的可能情况是它的密度不仅不被稀释, 反而随着宇宙的膨胀而缓慢增大. 这些不同情况所导致的宇宙命运也十分不同. 总的来说, 理解暗能量的本质属性是现代宇宙学中的核心课题之一. 暗能量的性质主要由它的状态方程 (Equation of State, EoS) 来刻画, 因此精确测量暗能量的 EoS 就成为了破解暗能量之谜的必由之路.

利用 Planck 卫星的 CMB 功率谱观测可以很精确地测量一些宇宙学参数, 但是由于 CMB 观测是对早期宇宙的观测, 并不能很有效地限制晚期宇宙的物理, 比如暗能量的 EoS. 对于包含一般动力学暗能量的宇宙学模型, CMB 限制通常会产生较强的参数简并 (即只能测量一些参数的组合), 因此一般需要用晚期宇宙的 (低红移) 观测来打破参数简并. “重子声波振荡” (Baryon Acoustic Oscillations, BAO) 是一种重要的破除 CMB 参数简并和测量暗能量的宇宙学探针. 关于 BAO 的介绍, 参见文献 [10]. BAO 为宇宙膨胀历史的探索提供了一把“标准尺”, 可以量出不同红移处所对应的角直径距离和宇宙膨胀率.

利用 SKA 中频阵列可以开展中性氢巡天观测, 研究中性氢的大尺度结构. 一种有效的巡天方式是所谓的强度映射 (Intensity Mapping) 巡天, 它采用低角分辨率的方式, 在每个像素中包含许多星系, 可以以极高的效率获得中性氢在大尺度上的分布. SKA 中性氢 21 cm

巡天观测可以精确测量中性氢功率谱以及相关的 BAO 和红移空间畸变等效应, 从而测量宇宙的膨胀历史, 为暗能量 EoS (以及修改引力模型参数) 提供有效的限制. SKA1 中频阵列的频率覆盖范围为 350 MHz–14 GHz, 在中性氢和连续谱巡天观测中主要使用的馈源和接收机将覆盖频带 1 (350–1050 MHz, 对应红移 0.35–3) 和频带 2 (950–1750 MHz, 对应红移 0–0.5).

我国在中性氢巡天和宇宙学研究方面已有较好的基础, 已自主建成国内的 SKA 探路者“天籁”阵列和世界上最大的单天线射电望远镜“天眼” (FAST). 利用这两个实验装置 (分别为干涉阵和单口径望远镜), 我们已经积累了丰富的经验, 并在相关领域培养了一些人才, 而且对 SKA 的中性氢巡天和 21 cm 宇宙学也开展了大量的预先研究 [11–21].

最近, 由中国 SKA 科学团队撰写的《中国 SKA 科学报告》在科学出版社正式出版 [22], 报告分析了国内射电天文学的发展趋势, 明确了 SKA 的科学目标、技术挑战和研究基础. 我国将在基于 SKA 的 21 cm 宇宙学研究中投入巨大的人力、物力和财力.

SKA 建成后会成为世界上最大的射电望远镜, 在未来的几十年内, SKA 将推动 21 cm 宇宙学迈入一个新时代, 并孕育出一系列重大的科学发现. 中国科学家也将有机会在 SKA 的相关研究中发挥关键性作用并取得重要的科学成果.

参考文献

- 1 Aghanim N, et al. (Planck Collaboration). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. 2018, arXiv: 1807.06209
- 2 Cho A. A recipe for the cosmos. *Science*, 2010, 330: 1615
- 3 Fan Z H. Precision cosmology (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 1367–1377 [范祖辉. 精确宇宙学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1367–1377]
- 4 Cho A. Boxed in. *Science*, 2013, 341: 1056–1059
- 5 Castelvecchi D. Into the dark ages: Radio astronomers take aim at the Universe's first billion years. *Nature*, 2019, 572: 298–301
- 6 Pritchard J R, Loeb A. 21 cm cosmology in the 21st century. *Rep Prog Phys*, 2012, 75: 086901, arXiv: 1109.6012
- 7 Peebles P J E, Ratra B. The cosmological constant and dark energy. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 559–606, arXiv: astro-ph/0207347
- 8 Frieman J A, Turner M S, Huterer D. Dark energy and the accelerating universe. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2008, 46: 385–432, arXiv: 0803.0982
- 9 Zhang X. Dark energy and accelerating expansion of the Universe (in Chinese). *Science*, 2017, 69: 57–60 [张鑫. 暗能量与宇宙加速膨胀之谜. 科学, 2017, 69: 57–60]
- 10 Eisenstein D J, Bennett C L. Cosmic sound waves rule. *Phys Today*, 2008, 61: 44–50
- 11 Xu Y, Wang X, Chen X. Forecasts on the dark energy and primordial non-Gaussianity observations with the Tianlai cylinder array. *Astrophys J*, 2015, 798: 40, arXiv: 1410.7794

- 12 Xu Y, Hamann J, Chen X. Precise measurements of inflationary features with 21 cm observations. *Phys Rev D*, 2016, 94: 123518, arXiv: [1607.00817](#)
- 13 Xu X, Ma Y Z, Weltman A. Constraining the interaction between dark sectors with future HI intensity mapping observations. *Phys Rev D*, 2018, 97: 083504, arXiv: [1710.03643](#)
- 14 Yohana E, Li Y C, Ma Y Z. Forecasts of cosmological constraints from HI intensity mapping with FAST, BINGO & SKA-I. arXiv: [1908.03024](#)
- 15 Zhang J F, Gao L Y, He D Z, et al. Improving cosmological parameter estimation with the future 21 cm observation from SKA. *Phys Lett B*, 2019, 799: 135064, arXiv: [1908.03732](#)
- 16 Zhang J F, Wang B, Zhang X. Forecast for weighing neutrinos in cosmology with SKA. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 280411, arXiv: [1907.00179](#)
- 17 Liu Y, Zhang J F, Zhang X. Real-time cosmology with SKA. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 304, arXiv: [1907.07522](#)
- 18 Jin S J, He D Z, Xu Y, et al. Forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard siren observation from the Cosmic Explorer. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, 3: 051, arXiv: [2001.05393](#)
- 19 Huang Q Z, Wu F Q, Chen X L. A high-resolution self-consistent whole sky foreground model. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 989511, arXiv: [1812.10084](#)
- 20 An T. Science opportunities and challenges associated with SKA big data. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 989531, arXiv: [1901.07756](#)
- 21 Xu Y, Zhang X. Cosmological parameter measurement and neutral hydrogen 21 cm sky survey with the Square Kilometre Array. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 270431, arXiv: [2002.00572](#)
- 22 Wu X P. Chinese SKA Science Book (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [武向平. 中国SKA科学报告. 北京: 科学出版社, 2019]

The Square Kilometre Array and 21 cm cosmology

XU YiDong¹ & ZHANG Xin^{2*}

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

² Department of Physics, College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Detecting the 21 cm signals of neutral hydrogen atoms is crucial to understanding the physics of the Universe during its first billion years, and can also provide an important cosmological probe to the expansion history of the late universe, the properties of dark matter and dark energy, and the formation and evolution of various structures. The Square Kilometre Array (SKA) is an international big-science project, and it will be the largest radio telescope in the world after its completion of construction. In the forthcoming decades, the SKA will undoubtedly push the 21 cm cosmology into a new era.

Square Kilometre Array, 21 cm cosmology, cosmic dawn and reionization, dark energy, neutral hydrogen sky survey

PACS: 95.36.+x, 98.80.Es, 98.80.-k

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0030](#)