21 cm宇宙学的探索——天籁与鸿蒙实验

陈学雷^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

E-mail: xuelei@cosmology.bao.ac.cn

2020-10-19 收稿, 2020-12-22 修回, 2020-12-24 接受, 2020-12-24 网络版发表

政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0120800)、国家自然科学基金(11633004, U1631118, U1501501, 11473044, 11773031)、中国科学院前沿科学重点项目(QYZDJ-SSW-SLH017)、中国科学院修缮购置项目、国家天文台预研项目、中国科学院空间科学战略先导科技专项(XDA15020200)、中国科学院科研仪器重点项目(ZDKYYQ20200008)和中以合作项目(20171352322)资助

摘要 自宇宙大爆炸结束, 中性氢广泛分布于宇宙, 为研究从宇宙黑暗时代、宇宙黎明与再电离时期, 直到再电离之后的宇宙历史、精密测量物质分布提供了重要探针。但是迄今为止, 由于灵敏度的限制, 中性氢观测还主要局限于近邻宇宙。要进行更高红移的观测, 必须在比其强几个数量级的前景中将21 cm信号提取出来, 这对观测设备的设计和数据处理分析都提出了极高的要求。近年来, 国际上出现了很多针对21 cm的观测实验, 21 cm宇宙学正处在突破的前夜。我国也开展了21 cm宇宙学的探索性实验。本文介绍了暗能量射电探测关键技术实验(天籁实验阵列)和绕月超长波天文观测阵列(鸿蒙实验)的基本情况和研究进展。天籁实验阵列位于新疆巴里坤县红柳峡观测站, 是用于试验中红移的大尺度结构21 cm强度映射的关键技术。鸿蒙实验则拟发射一个线形编队的卫星阵列, 环绕月球飞行, 进行全天频谱和干涉成像观测。这将打开一个新的观测窗口, 并探索宇宙黑暗时代和宇宙黎明。

关键词 中性氢, 21 cm辐射, 宇宙学, 射电天文学, 宇宙黎明, 月球轨道

氢是在宇宙大爆炸中就已形成的、丰度最高、分布最广的元素。中性氢原子的基态被超精细相互作用分裂, 其间的跃迁产生波长为21 cm的谱线, 经过宇宙红移 z 后, 这一谱线的波长是 $21(1+z)$ cm, 不过习惯上仍称为21 cm辐射。21 cm谱线是射电天文学中第一条被预言和观测到的谱线, 对银河系和近邻星系也有大量观测和许多重要成果, 但是其辐射振子强度较低、信号较弱, 且其频率较低, 而低频天空亮度较高, 因此其观测难度较大。迄今为止, 21 cm谱线观测仍主要局限于较低红移, 红移 $z>0.2$ 的21 cm发射线观测还比较稀少。

21 cm观测在科学上蕴藏着巨大的潜力。例如, 在大爆炸以后到第一代恒星和类星体形成以前, 宇宙处

在“黑暗时期”(dark age), 21 cm观测差不多是观测这一时期仅有的方法。这一时期的宇宙尚未经过非线性的演化, 因此这一观测可以探测到原初扰动, 理论上其中蕴藏的信息以可测的原初密度场傅里叶模的数量度量比宇宙微波背景还要多几个数量级。之后, 第一代恒星、星系和类星体在黑暗时期末期开始形成, 此即所谓宇宙黎明(cosmic dawn)。大量恒星和类星体发出的紫外光子导致宇宙再电离(reionization), 21 cm为这一过程提供了最直接的观测手段。结合21 cm观测和光学红外等其他观测, 可以获得这些宇宙黎明时期天体的性质, 以及它们是如何影响周边环境、造成再电离的。再电离以后, 中性氢主要存在于星系等高密度环境中, 那里的高复合率可以保持其不被电离。对这些中性氢

引用格式: 陈学雷. 21 cm宇宙学的探索——天籁与鸿蒙实验. 科学通报, 2021, 66: 1385–1398

Chen X L. Exploring the 21 cm cosmology: The Tianlai and Hongmeng experiments (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1385–1398, doi: 10.1360/TB-2020-1349

的观测可以给出物质分布. 对中性氢大尺度结构分布的观测, 可以勾绘出物质大尺度结构的分布. 通过对大尺度结构中重子声波振荡(baryon acoustic oscillation, BAO)峰的测量, 可以研究宇宙膨胀历史, 测量暗能量的状态方程; 通过对大尺度结构的精密测量, 还可以还原宇宙暴胀历史, 检验暴胀模型, 测量中微子质量等. 因此, 21 cm宇宙学研究是一个具有广阔前景但尚待突破的领域^[1,2]. 图1演示了宇宙的演化历史和相应的21 cm全天平均谱.

本文中, “中红移”指再电离之后, “高红移”指再电离时期或更早宇宙时期的21 cm观测. 中、高红移21 cm观测一直是射电天文学所追求的目标, 规模最大的国际合作望远镜项目平方千米阵(Square Kilometre Array, SKA)最初之所以定下平方千米级的接收面积作为其主要参数, 正是因为根据简单估算, 这是探测中红移星系中性氢的灵敏度要求. 目前筹划的SKA-1的有效面积虽然小一些, 但是仍将大幅度超越以往的射电望远镜, 有望在21 cm观测中取得重大的突破. 我国已建成的世界最大的单天线望远镜FAST(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)本亦肇始于此^[3,4]. 由于FAST, SKA这类综合性射电望远镜有多种科学目标, 观测时间紧张, 且造价很高, 因此, 近年来世界各国也出现了很多专门或主要针对21 cm辐射的实验. 例如, 针对再电离时期的实验包括中国的21 CMA、荷兰等欧洲国家建造的LOFAR(LOW-Frequency ARray)、澳大利亚和美国合作的MWA(Murchison Widefield Array)、美国与南非合作的PAPER(Precision Array for Probing the Epoch of Reionization)、美国的MITEoR

(Massachusetts Institute of Technology Epoch of Reionization experiment)等, 美国、英国、南非等国也正在研制HERA(Hydrogen Epoch of Reionization Array). 针对再电离以后时期的中红移21 cm实验, 其目标为观测大尺度结构中的重子声波振荡信号, 从而精确地测量暗能量状态方程. 这些实验采用了21 cm强度映射(intensity mapping)方法, 即并不分辨单个星系, 而只观测大量体积元内的21 cm辐射总强度, 单个体积元内有很多星系, 因此可以用较低的角度分辨率观测^[5,6]. 我们参与了国际合作, 用美国GBT(Green Bank Telescope)和澳大利亚Parkes望远镜进行观测, 成功测出了红移0.8处21 cm辐射强度与采用光学方法观测的星系密度的互相关功率谱^[7], 给出了对自功率谱的限制(目前自功率谱测量误差比信号约大一个数量级)以及由此导出的对该红移中性氢宇宙密度的限制^[8]. 2012年, 加拿大和我国同时启动了第一批21 cm强度映射巡天项目, 即CHIME(Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment)实验和天籁实验. 继加拿大和我国后, 南非启动了HIRAX(Hydrogen Intensity and Real-time Analysis eXperiment)实验. 英国与巴西等国联合开展了BINGO(Baryon Acoustic Oscillations in Neutral Gas Observations)实验, 印度对其Ooty望远镜进行了改造, 这些实验都在进行当中. 此外, 美国宇宙学界目前也正在进一步论证建设针对红移 $3 < z < 6$ 的更大规模的21 cm巡天阵列PUMA(Packed Ultra-wideband Mapping Array)的设想^[9,10].

除建设大型望远镜阵列观测21 cm分布外, 宇宙平均21 cm谱可以用小型单天线进行观测, 其因投资很少, 也引起了人们的兴趣. 特别是, 宇宙黎明时期可能形成

图1 宇宙历史和21 cm信号全天谱信号示意图

Figure 1 A sketch of the cosmic history and 21 cm signal evolution

较强的21 cm吸收信号。目前,已有EDGES(Experiment to Detect the Global EoR Signature), SARAS(Shaped Antenna measurement of the background RAdio Spectrum), SCI-HI(Sonda Cosmológica de las Islas para la detección de Hidrógeno neutro), PRIZM(Probing Radio Intensity at high-Z from Marion), BIGHORNS(Broadband Instrument for Global HydrOgen Reionisation Signal), REACH(Radio Experiment for the Analysis of Cosmic Hydrogen)等实验进行了尝试。其中,EDGES实验组于2018年宣布,他们在80 MHz附近测到了一个很强的吸收槽,这一频率正对应宇宙黎明的红移,因而引起了研究者的广泛兴趣^[11]。由于EDGES观测到的吸收信号比标准模型中的最大值高2倍,因此,一方面,这一结果的可靠性受到很多怀疑,另一方面,如能被证实,则其意义非常重大,比如暗物质与重子物质的异常相互作用可能可以冷却重子物质^[12],从而产生观测到的频谱。无论如何,精确测量宇宙21 cm平均谱将对我们理解宇宙黑暗时代、宇宙黎明和再电离有着非常重要的价值。

21 cm实验有相当的难度,这是因为银河系、河外射电星系等在这一频段上均有很强的连续谱辐射,由于其辐射源位于待测的21 cm辐射天体与我们之间而被称为前景辐射。其中银河系电子同步辐射比21 cm信号约强几十万倍。原则上,这些前景辐射有比较光滑的频谱,而21 cm辐射则随红移(频率)而变化,因此可以减除光滑前景恢复21 cm信号。但是,实际的望远镜系统本身响应并不光滑,且这个响应还需要通过观测精密定标才能得到,因此实际区分前景和21 cm信号有相当大的难度。目前,上述的各种21 cm实验都还在进行中,除EDGES实验以及GBT的21 cm-光学互相关测量外,其他实验都还未得到阳性探测结果,只给出了21 cm功率谱上限,这些上限普遍比理论预期的21 cm信号大1~2个数量级。因此,现阶段仍需要继续改进实验设备和数据处理方法,提高观测精度,才能探测到宇宙21 cm信号。

本文将介绍目前笔者参与的两项实验:暗能量射电探测关键技术(天籁实验)^[13~16]和绕月超长波天文观测阵列(鸿蒙实验)^[17~21]。

1 天籁实验

驱动宇宙加速膨胀的暗能量约占宇宙总密度的70%,且具有非常特别的性质,暗能量问题是当前科学

中的一个重大问题。目前,研究暗能量性质的主要方法是精密测量不同红移的宇宙膨胀速度。如果能探测到宇宙大尺度结构的21 cm信号,就可以用其精密测量大尺度结构的功率谱,用其中的重子声波振荡峰作为已知长度的标准尺进行这种测量。此外,与宇宙微波背景辐射的二维测量相比,这种三维大尺度结构测量在探测宇宙暴胀产生的功率谱振荡特征方面也是非常强有力的^[22]。为了探索这种暗能量射电探测方法,我们决定研制天籁实验阵列。

考虑到21 cm信号极其微弱,需要好的电磁环境,我们进行了全国范围内的选址,其方法是,在现有天文单位的地方附近,选取人口比较稀少的地方,首先用谷歌卫星地图等选取若干可能的站址(主要要求是有足够大的平地可以容纳阵列,没有明显的地质灾害隐患,最好周边有一些山地以阻隔电磁干扰),然后逐一踏勘并进行环境电磁频谱测量。我们在北京、河北、内蒙、吉林、贵州、新疆、青海、西藏等地踏勘了多处站址,测量电磁频谱两百多条,最终选定了电磁环境优越、后勤支撑也比较容易的新疆红柳峡站址^[23]。该地为半荒漠草原地形,海拔高度1500 m,位于新疆哈密地区巴里坤县大红柳峡乡,距巴里坤县城约160 km;人口密度较低,比较偏远,但有道路可达,也有电力、通讯等便利条件,冬季有雪但通常不大。我们将天线区设在一片丘陵地中,而站房则设在直线距离6 km外的红柳峡村,之间连有10 kV输电线路和光缆。该阵和站房于2014年开始建造,2016年进行了初光观测。

对于河外巡天来说,具体观测哪个天区并不是特别重要,但大尺度结构的精密观测需要有较大的天区面积,可能占全天的一个相当大的分数。因此,设想的望远镜拟采用固定在地面上的天线,利用地球自转进行漂移扫描巡天,这样可以省去昂贵的天线驱动系统,同时也容易实现观测条件的稳定性。考虑到声波第一振荡峰(即尺度最大的振荡峰)对应的尺度大约是130 Mpc,在 $z=1$ (波长0.42 m)处对应的角度为 2° 左右。为了探测这样的信号,耐奎斯特(Nyquist)采样分辨率要求的角分辨率最低值为 1° ,对应的天线孔径是23 m。一般认为,100 m大小的阵列可以满足观测BAO第一峰的需求,甚至有可能探测到更高的峰^[5,24]。当然,望远镜越大越好,但是显然更大的阵列也需要更多的经费投入。

目前大部分21 cm实验采用多个天线组成的阵列,天籁实验也是如此。射电干涉阵的每个单元接收电波

信号并数字化, 各个单元之间做互相关并进行短时间积分所得的结果称为干涉显示度, 是干涉阵的原始数据. 每一对单元的干涉显示度对应于天空辐射亮度的一个傅里叶模, 其波矢是以波长为单位的基线矢量, $\mathbf{u}_{ab} = (\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_a) / \lambda$:

$$\begin{aligned} V_{ab}(\nu) &= \langle E_a^*(\nu) E_b(\nu) \rangle \\ &= g_a^*(\nu) g_b(\nu) \int d^2\mathbf{n} B(\mathbf{n}, \nu) I(\mathbf{n}, \nu) \\ &\quad \exp[-i2\pi \mathbf{u}_{ab} \cdot \mathbf{n}], \end{aligned} \quad (1)$$

其中, E_a , E_b 分别是 a, b 点的信号电场强度, 尖括号表示平均, g_a , g_b 分别是 a, b 处天线接收单元的复增益, 等式右边的 $B(\mathbf{n}, \nu)$ 是天线单元对方向 $\mathbf{n}$ 、频率 ν 的响应, $I(\mathbf{n}, \nu)$ 给出了天空的辐射强度.

利用综合成像算法, 可以从干涉显示度反推天空亮度. 以往射电天文中的很多阵列是稀疏阵, 即天线之间的间距远大于天线的尺寸. 但是对于 21 cm 观测来说, 一个重要的考虑是减除前景, 这需要利用前景在频谱上光滑的特性. 但是, 同样物理长度的基线在不同频率上对应不同的天空角尺度, 即望远镜阵列在不同频率上看到的是不同天空尺度的信号, 因此, 要进行这种减除就困难了. 为此, 21 cm 阵列采用密集阵列设计, 以保证对每个尺度都有一定的测量数据^[25,26].

天线反射面可以考虑选用旋转抛物面(碟形)或抛物柱面, 馈源配置在主焦点(碟形)或主焦线(柱形)上. 碟形阵是射电天文广泛使用的天线, 技术成熟. 不过, 碟形天线的视场是天空中的一小片, 在漂移扫描中, 通常让其指向子午线上的一点, 其扫过的天区是沿着天球纬线的一个窄条. 如果要扫描整个天空, 则需要多次改变其仰角, 分别进行扫描. 由于这种改变只是在完成一个纬度的观测后做一次, 可以采用比较低成本转轴, 甚至依靠人力调整, 南非的 HIRAX 以及针对再电离的 HERA 即采用了这种形式的天线. 抛物柱面的一个优点是, 它的视场是天球上的一个长条, 面积相当大, 如果让这一长条沿着南北方向, 那么随着地球旋转, 就可以很快实现全天可见部分的巡天. 另外, 由于整个柱面平放在地上便于支撑, 单位面积成本也比较低. 柱面望远镜也有一些缺点: 柱面波束的对称性不如碟形, 给确定其波束带来了一定困难; 尽管整个柱面面积很大, 但在观测某个特定天体时, 每个馈源收到的电波只来自较小的一块面积的反射, 因此灵敏度较低; 另外, 从我们的实验结果来看, 同一柱面上馈源之间的相互耦合比较强, 产生较强的相关性噪声(correlated noise), 导

致这部分干涉显示度数据很难使用. 不过, 历史上柱形望远镜也建造了很多台, 在 21 cm 实验中 CHIME 也选用了柱形望远镜.

我们建造了一个由三个宽 15 m、长 40 m 柱形反射面组成的柱形天线阵(其结构设计请参考文献^[27]), 柱形阵两端有一定的边界效应, 通常不使用, 40 m 长度允许在扣除两端边界后仍有大于 23 m 的可用长度. 由于经费的限制, 柱形阵天线并未完全利用, 仅用了中间 12.4 m 的一段. 目前共安装了 96 个馈源, 三个柱形天线上分别为 31, 32, 33 个. 三个天线安装不同数量是因为当馈源间隔大于半波长时会出现栅瓣(grating lobe), 选取同样的总长度而略微不同的数目可以压低栅瓣^[26]. 由于目前阶段的实验目的在于验证 21 cm 观测技术, 又建造了一个由 16 面 6 m 碟形天线组成的碟形天线阵, 配备了遥控的方位和俯仰转轴. 这两个天线在一个地方, 见图 2. 二者所用的电子学设备是类似的, 但除了一些专门的实验外, 二者一般是各自独立观测的. 今后通过对二者的比较, 可以更好地理解这两种设计的优缺点. 这两套天线阵列中最长基线的长度均为 30 多米, 已可对感兴趣的尺度进行一些实验测试.

由于馈源数量较多, 且低频天空本身比较明亮, 选用了比较简单的常温馈源^[28]. 馈源上配有低噪声放大器(low noise amplifier, LNA), 放大后的信号用长 15 m 的射频电缆连到阵列旁的屏蔽盒转换成光信号, 通过光缆传到站房再转回电信号, 经过射频滤波、变频、放大后数字化. 数字后端对每路信号进行多相滤波和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)后, 经过数据交换, 进行互相关和积分. 整个系统框图见图 3, 碟形天线阵系统也与此类似. 两套阵列系统的详细描述见文献^[29,30].

自 2016 年以来, 我们开展了巡天观测实验^[31], 其中柱形阵是固定的观测, 碟形阵则主要指向北天极方向, 以获取更长时间的观测数据. 作为例子, 图 4 展示了碟形阵一对接收单元在 2018 年 1 月 2~11 日的干涉显示度数据瀑布图. 图中, 横坐标为恒星时, 纵轴排出了 11 d 的数据, 每一天内则展示了观测带宽内不同的频率. 这里, 图示亮度表明干涉显示度强度, 而颜色则表明其相位; 右侧较亮的部分对应白天. 可见, 系统有较好的重复性, 随着太阳每天沿黄道移动, 日出和日落对应的恒星时每天逐渐改变. 由于太阳的辐射较强, 白天的干涉条纹主要来自太阳, 在夜间则可看到更多其他天体产生的干涉条纹. 此外, 一些随着时间没有明显改变的条纹

图2 天籁阵列俯视图, 可看到碟形天线阵(东)和柱形天线阵(西), 校准源位于左侧白线标志处

Figure 2 A topview of the Tianlai arrays with dish array (east) and cylinder array (west), the calibrator source is at the left border, marked by white lines

图3 天籁阵列系统框图

Figure 3 A schematic of the Tianlai array system

则反映了系统中的一些相关噪声, 可能来自不同天线之间的耦合。

对于射电阵列, 每个单元的复增益会随时间改变, 需要校准。干涉阵信号对相位比较敏感, 因此仪器相位的校准尤为重要。在天籁阵中, 系统的射频信号通过光

纤从天线传到机房。光纤由于热胀冷缩, 其延时会发生变化, 各路光纤变化量并不一样, 因此会导致不同单元的相位差发生漂移。我们的光缆是架空的且长度比较长, 因此这个效应比较明显。我们在观测中发现, 夜间特别是午夜之后的相位漂移很小, 可以不进行校准, 但

图 4 天籁碟形阵在2018年1月2~11日的一组干涉显示度数据瀑布图. 纵向每天为一条, 共11 d, 每条内的纵坐标为频率, 横坐标为恒星时. 每点的亮度代表信号幅度, 颜色则给出信号相位

Figure 4 A waterfall plot for the visibility data of a pair of receivers of the Tianlai dish array from Jan. 2nd to 11th 2018. Each of the 11 strips shows the visibility data for one day, with ordinate within each strip is the frequency and abscissa the local sidereal time. The brightness at each pixel is proportional to the intensity, and the color shows the phase

白天的漂移是较大的. 通过观测已知源可以实现复增益校准, 为此我们发展了一种基于本征矢量分解的校准方法^[32], 并应用于天籁阵列校准. 但对于固定式阵列而言, 只能等待已知亮天文源穿过其视场. 但是, 这样的源比较稀少, 因此我们在阵列附近架设了一个人工噪声源, 每隔几分钟播放一次, 用于相位相对校准.

整个离线数据的基本处理流程如图5所示, 包括射频干扰识别、强射电源校准、基于人工源的相位相对校准、数据质量检查. 在完成这些预处理后, 依据其恒星时, 将不同天的观测数据合并成图, 并进行天文源识别、前景减除和功率谱估计等进一步处理. 目前, 我们已开发了一套基于Python的数据处理软件^[33].

我们对2016年9月和2018年的柱形阵观测数据进行了分析, 结果表明阵列各单元的波束指向偏差在 0.1° 左右. 各接收单元的仪器相位在一天内可以有几十度的漂移, 但经过校准后, 使用闭合相位法检验, 可以达到 0.1° 左右的精度. 平均系统温度为89 K, 但不同单元

的温度值有一些分布^[29]. 但是, 实验发现, 目前系统响应随频率的变化较大, 可达20%, 且每个单元各不相同, 这给21 cm探测带来了一定的困难. 这些系统响应的变化可能与邻近接收单元的互耦以及天线上和电路中的反射和驻波有关. 我们使用延迟谱的方法对反射和驻波进行了分析, 即将频谱作为一个序列, 对其再做傅里叶变换得到的谱(其自变量具有时间量纲, 通常称为“延迟”(delay))^[34]. 同时, 我们也进行了碟形天线的数据分析, 所得的结果与柱形阵相似^[30].

沿着子午线的固定式柱形阵实验数据分析中的一个主要难题是, 天线南北方向的波束响应是未知的. 通常波束响应可以通过扫描点源测出, 但柱形阵只能利用射电源中天观测校准其东西方向的响应, 而对南北方向无能为力. 我们研发了一种新的波束测量方法, 即使用无人机携带噪声源飞临其上空进行校准测量. 我们首先使用无人机对天籁阵的6 m碟形天线进行了试验测量^[35], 获得了稳定、一致的测量结果, 如图6所示.

图5 天籁数据离线处理流程图

Figure 5 Tianlai data off-line processing flow diagram

不过, 要满足天籁柱形天线的电磁波远场条件, 要求无人机有较高的飞行高度, 因此这一测量仍有一定难度, 将是我们下一步的工作。

在21 cm前景减除等方面, 我们此前做过一些初步的研究^[36,37], 今后将试验使用实际数据进行分析处理, 同时探索新的方法。我们拟与国际合作者对北极进行

深度巡天, 并与光学观测相关联, 推动21 cm实验技术的发展。

另一方面, 快速射电暴(fast radio burst, FRB)是近年来射电天文学中的重要新发现, 也是热门的研究题目。只要配备具有快速在线分析能力的FRB终端, 天籁阵列的大视场也比较适合FRB的搜寻。遗憾的是, 尽管我们很早就注意到这一可能性, 但由于得到资助较晚, 天籁阵列在这方面远远落后于CHIME和UTMOST等国外阵列, 错过了FRB的黄金机遇期。不过, 目前我们已研制了一套FRB搜寻终端, 用于碟形天线阵FRB搜索^[38], 并提出了一种新的基于Hough变换的快速射电暴算法^[39]。目前, 该终端已安装在碟形阵上, 正在进行FRB搜索实验, 柱形阵的FRB搜寻终端也在研制中。

2 鸿蒙实验

21 cm宇宙学的终极目标是探索宇宙黑暗时代^[40]。如果对于再电离后的宇宙, 甚至宇宙黎明与再电离时期尚可用光学红外波段观测, 那么21 cm观测则几乎是宇宙黑暗时代唯一的观测手段。在这一时期, 宇宙中的原初扰动还基本处于线性演化阶段, 这些原初扰动是宇宙极早期形成的, 是研究宇宙起源和暗物质性质极重要的信息来源。由于这时还没有恒星、星系等天体, 对这一时期的观测主要依靠对中性氢发出的21 cm信号观测。考虑到中性氢自旋温度的演化, 可观测的红移范围为红移200~30之间, 对应的频率为7~47 MHz。原则上, 这种观测可以提供大量关于极早期宇宙的信息,

图6 天线方向图无人机测量实验。(a) 实验原理图; (b) 不同日期和飞行高度获得的测量结果

Figure 6 Antenna beam profile measurement with unmanned aerial vehicle (UAV). (a) The principle of measurement; (b) the results obtained on different dates and with different flight heights

是其他观测所难以企及的^[41].若能对宇宙黑暗时代的物质分布及其演化进行三维测量,将能够精确限制宇宙原初的非高斯性、宇宙原初密度扰动谱等关键物理量.

标志黑暗时代结束的是宇宙黎明,即宇宙中第一代发光天体开始形成并重新照亮宇宙的时期,这时气体的温度低于宇宙背景辐射温度,在第一代恒星莱曼阿尔法光子的Wouthuysan-Field耦合机制作用下,产生可观测的21 cm强吸收谱特征,成为宇宙黎明的标志信号,如图1所示^[42].此后,恒星、吸积黑洞等产生的紫外与X射线光子逐渐把周围星系际介质中的氢原子电离,宇宙从此进入再电离时期,并逐渐演化为我们今天观测到的宇宙.宇宙黎明时期的第一代恒星和星系由于距离遥远难以直接观测,因此红移21 cm信号也是主要的观测手段.这一转变发生在红移30~10,对应47~130 MHz.

对于宇宙黑暗时代和黎明的观测,频率较低,低频天空被银河系宇宙线电子同步辐射主导,即使在高银纬方向,仍有

$$T(\nu) \approx 300 \text{ K} \left(\frac{\nu}{150 \text{ MHz}} \right)^{-\gamma}, \quad (2)$$

其中,谱指数 $\gamma \approx 2.5$.频率越低,天空亮度越高,观测也更加困难,需要巨大的阵列才能完成成像观测.不过,作为第一步,可以考虑使用单天线进行全天平均谱的探测,前述EDGES等实验^[11]即是如此.

在使用单天线精密测量全天频谱时,为了达到所需的高精度,常给系统配有内校准装置.图7是这种测量装置的示意图.系统通过切换天线输入信号和校准源信号,校准源可以使用加温或常温的电阻负载作为校准噪声源,并根据低温和高温负载的温度差进行噪声绝对校准,另设噪声二极管以校准电路响应随时间的变化.另外,由于天线和射频电路的阻抗也可能发生随时间的漂移,系统也内置了矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)测量子系统,用于定期测量天线和低噪声放大器(low noise amplifier, LNA)电路阻抗.VNA本身则通过接入短路、开路 and 负载实现自校准.这些不同的测量和校准通过自动控制的微波开关实现.整个系统所要求的精度非常高(约 10^{-5} 量级),因此技术上具有很强的挑战性.

要准确地测量频谱上的特征,不仅需要天线具有较宽的带宽(黑暗时代和宇宙黎明时期21 cm吸收谱较宽),而且要求这一天线的方向图不随着频率发生大变

图7 全天谱测量装置示意图

Figure 7 A conceptual schematic of the global spectrum measurement system

化,否则在不同频率上系统收到的天线信号对应不同大小或方向的天区,势必影响测量的准确性。我们目前考虑采用经过优化设计的盘锥天线,该天线响应随频率的变化较小。但是,即便天线具有良好宽带和频率不变性能,电离层的折射及其湍流引起的波动仍有可能影响测量的准确性。

前文提到,宇宙黑暗时代和宇宙黎明的低频观测受到地球电离层的影响。目前,从伽马射线到射电的电磁频谱已基本被天文观测所覆盖,只有极少数频段还基本空白,电磁频谱中频率低于30 MHz、波长大于10 m的部分就是这样的频段。这一频段受到电离层的强烈折射和吸收,并且电离层也将全球各地的人工电波反射到远处,给地面观测造成强烈干扰。本文将30 MHz以下的频段称为超长波(*ultralong wavelength*)。实际上,对于0.03 MHz以下的频段,无线电波在传播中会受到星际空间等离子体的强烈吸收,电波传播距离很短,对天文观测来说价值不大。因此,可以说,0.03~30 MHz的超长波频段是电磁频谱中最后的处女地。目前,这一频段只有很少的地面观测资料^[43]。空间观测方面,20世纪60年代末~70年代初,美国发射了RAE-1、RAE-2、IMP-6等卫星,但是限于当时的技术水平,所得的天图分辨率较差,甚至难以分辨出单个天体^[44],不同卫星测得的全天平均频谱也有较大差别^[45]。此后,一些太阳、空间环境或行星探测卫星如STEREO、WIND、GALILEO、ULYSSES、CASSINI、PARKER等航天器也携带了低频射电探测载荷,但主要用于观测太阳爆发或行星射电辐射。

对每一个频段的观测,往往都会产生新的发现,揭示新的天文现象。因此,如果对这一频段进行观测,有可能揭示完全未知的新现象,发现新的天体类型。除了发现未知的新现象外,目前已经知道有许多天体可以产生低频射电辐射,因此对回答许多天文学问题都会提供新的线索,例如,太阳活动如耀斑和日冕物质抛射、日地空间环境、地球以及太阳系行星特别是其电离层和磁场活动、褐矮星和地外行星、脉冲星、超新星遗迹、宇宙线的加速和传播、星系介质的分布和湍流、银河系结构、类星体射电源的辐射机制、星系团、星系际介质与磁场、大尺度结构乃至宇宙起源等^[19,46,47]。

由于地面观测受到电离层的影响,这种观测需要在空间进行,但是地球本身会产生较强的干扰,近地轨道观测并不理想。因此,利用月球背面或月球轨道开展

观测是超长波天文发展的方向。在月球背面的超长波阵列可以利用月球遮挡来自地球的干扰,月球表面也提供了一个稳定的平台,但是需要解决一系列复杂的技术问题,包括如何着陆,如何安装、部署,如何解决月夜期间的供电问题,如何传输、处理数据,并将数据传回地球等,其成本也相当高。

目前,技术和经济上最为可行的方案是利用运行在环绕月球轨道上的卫星进行超长波探测。卫星环绕月球飞行,在月球背面轨道部分观测,在正面(面向地球的一面)传回数据。由于无须着陆,因此可以省去着陆系统所需的推进剂和减震系统重量,同时由于月球轨道周期一般只有两个多小时,可以用太阳能电池而无须担心能源问题。卫星可以在轨道中未被月球遮掩的弧段与地球进行通讯,把观测数据传回地球,无须另外的专门通讯中继卫星。另外,月球对地球遮蔽效果好,有时还能同时遮蔽地球和太阳甚至行星,有助于微弱信号探测。自20世纪80年代以来,人们先后提出了多种这种类型的实验概念,但均尚未实现,如美国的DARE(Dark Ages Radio Explorer)和DAPPER(Dark Ages Polarimetry Pathfinder)等绕月单星方案^[19,47]。

观测角分辨率取决于天线尺寸与波长之比,由于在低频波段波长较长,受限于天线的尺寸,单星观测的角分辨率较低。为了提高角分辨率,实现超长波天空成像,笔者在2005年提出了绕月轨道卫星组成干涉阵列进行观测的设想^[48]。一种工程上便于实现的方案是,由一颗母星和若干子星沿同一轨道运行,排成线阵。各子星开展射电天文观测,其数据传输汇集到一颗较大的母星上,在母星上进行干涉处理。地球与卫星阵列的通讯由母星负责,从而省去了每个子星上的对地数据传输系统。这一系统可以组成一个整体用单枚火箭发射,在进入月球轨道后再逐次释放子星形成阵列。基于这一思路,2014年,中国-波兰-荷兰联合提出了DSL(Discovering Sky at Longest wavelength)项目概念^[17,18],此后发展为鸿蒙计划(图8),由来自中国科学院国家天文台、国家空间科学中心、上海微小卫星创新研究院、上海天文台等单位组成的团队在2018~2020年期间开展了背景型号研究。另外,在我国嫦娥4号工程期间,哈尔滨工业大学曾自主研制了两颗微卫星龙江-1号和2号,利用发射鹊桥中继卫星的火箭搭载发射,欲对这一项目进行概念验证^[49]。但遗憾的是,由于故障,龙江-1号失控,只能进行部分验证。

在这一方案中,由于各星基本排列在同一轨道上,

图 8 鸿蒙月球轨道卫星阵列示意图

Figure 8 An artist's concept for the Discovering Sky at Longest wavelength array in lunar orbit

基本构成一条直线, 只有微小的偏离, 因此可以较容易地实现稳定的自主编队控制, 也便于各子星与排在队首或队尾的母星进行微波通讯(通讯天线只需对准轨道前方或后方即可). 子星与母星间的微波通讯不仅实现了数据传输, 而且其微波载波也用于实现母星和各子星之间的时间频率同步, 并采用双向单程测距(dual one way ranging, DOWR)方法测定母星和各子星之间的距离. 同时, 在母星上设置发光装置, 子星用星空相机拍摄, 通过星图识别确定与母星连线相对于恒星的位置, 从而精确测定基线方向(图9). 各子星的天文观测数据结合上述测定的基线矢量可用于干涉成像. 不过, 由于卫星基本排成线形阵列, 基线基本都沿着同一

方向, 瞬时的观测只在垂直于这些基线的方向上有分辨率, 需要等一段时间, 待卫星沿轨道转过一定角度, 才能形成二维分布的基线, 综合不同时刻的观测数据成像.

现有的干涉阵大多为地面上的阵列, 由于视场往往较小, 因此从干涉数据成图基本等效于逆傅里叶变换. 但是, 鸿蒙阵列所面临的干涉数据成图问题与此有很大差异. 首先, 由于波长太长, 天线的方向性弱, 基本等效于全天视场. 其次, 虽然在一个轨道周期内, 沿轨道运行的线形阵列不同时刻的观测可以形成二维基线分布, 但是轨道面的两侧又存在镜像对称, 无法区分(地面阵列不存在这一问题, 因为大地遮挡了地面下方的

图 9 鸿蒙阵列相对定位原理

Figure 9 Principle of the relative localization for the DSL array

图 10 鸿蒙阵列成像模拟. (a) 输入天图; (b) 单轨道面成像中的镜像效应; (c) 轨道面进动形成三维基线分布后成像

Figure 10 Simulation of DSL synthesis imaging. (a) Input map; (b) map with single orbit plane which shows the mirror effect; (c) map with 3D distribution baselines formed after orbital plane precession

信号). 只有经过一段时间, 轨道面发生进动, 形成三维的基线分布, 才能实现全天成像. 而且, 必须考虑到, 在轨道的不同部分, 月球会遮挡天空的不同部分, 因此成像也不能直接使用简单的三维傅里叶变换. 不过, 轨道不同部分的遮挡是可以预知的, 因此原则上仍可综合不同时刻的观测实现全天成像, 如图10所示^[19]. 图10(a)为输入天图(该图天空模型基本依据现有的全天射电观测构建^[50], 但其中有几个亮点源是为了测试成图算法而人为加入的, 并非真实射电源); 图10(b)展示了如果全部测量都在同一轨道面上, 由于镜像对称产生的成图效果; 图10(c)展示了假定随着轨道进动形成了三维基线分布后成图的结果, 可见, 这种情况下可以较好地还原输入天图. 从上述讨论看, 轨道面的进动对完成成像非常重要. 选择倾角约30°的轨道比较合适: 在这种情况下, 轨道面有比较明显的进动, 且进动速度也比较快, 经过几个月后可以形成三维基线分布. 目前, 我们正在考虑噪声、轨道测量误差等现实中出现的问题基础上开展对鸿蒙阵列成像的进一步仿真模拟.

总之, 鸿蒙计划采用月球轨道阵列形式, 进行

30 MHz以下超长波天空高分辨成像和30~120 MHz高精度全天谱测量, 对宇宙黑暗时代和黎明进行探索. 通过在轨干涉观测, 获得了较高分辨率的超长波天图, 为天文学打开了一扇新的观测窗口. 这也蕴含着巨大的发现潜力. 另一方面, 所发展的高精度测量技术、变基线阵列成像方法等, 也可能在未来找到更广泛的应用.

3 总结与展望

在天文学历史上, 很多难度较高的天体探测都是经过长期的摸索和改进后取得成功的, 如宇宙微波背景辐射各向异性测量、超新星探测、系外行星探测、引力波探测等都是如此. 21 cm宇宙学观测目前正处在这些探测曾经所处的位置, 虽然从原理上讲可以实现, 但目前只有依靠与其他信号互相关、大量星系叠加等, 才能偶尔探测到信号, 或者探测到的信号未得到其他实验的证实. 这需要不断改进实验, 才能最终取得突破. 天籁和鸿蒙就是这样的实验. 我们希望通过这样的尝试, 使我国在这一极具潜力的实验领域成为真正的创新者, 并做出科学上的重要发现.

参考文献

- 1 Chen X L. Redshifted 21 cm Line Observation. In: Lu T, ed. Modern Astrophysics, vol II (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2014 [陈学雷. 红移21 cm谱线观测. 见: 陆埏. 现代天体物理(下). 北京: 北京大学出版社, 2014]
- 2 Chen X. Mapping the Universe with 21 cm Observations. In: Kong L, Huang T, Zhu Y, et al, eds. Big Data in Astronomy, Scientific Data Processing for Advanced Radio Telescopes. Amsterdam: Elsevier, 2020
- 3 Peng B. Long March to the SKA. In: Garrett M A, Greenwood J C, eds. Resolving the Sky-Radio Interferometry: Past, Present and Future. Proceedings of the RTS 2012 Conference Proceeding, SKA Organization, 2013
- 4 Wu X P, China SKA Science Team. China SKA Science Report (in Chinese). Beijing: Science Press, 2019 [武向平. 中国SKA科学团队. 中国SKA科学报告. 北京: 科学出版社, 2019]
- 5 Chang T C, Pen U L, Peterson J B, et al. Baryon acoustic oscillation intensity mapping of dark energy. Phys Rev Lett, 2008, 199: 1303
- 6 Kovetz E, Breyse P C, Lidz A, et al. Astrophysics and cosmology with line-intensity mapping. Bull Am Astron Soc, 2019, 51: 101
- 7 Masui K, Switzer E R, Banavar N, et al. Measurement of 21 cm brightness fluctuations at $z \sim 0.8$ in cross-correlation, Astrophys J Lett, 2013, 763: 20

- 8 Switzer E R, Masui K, Bandura K, et al. Determination of $z \sim 0.8$ neutral hydrogen fluctuations using the 21 cm intensity mapping auto-correlation. *Mon Not Roy Astro Soc Lett*, 2013, 434: 46
- 9 Cosmic Visions 21 cm Collaboration, Ansari R, Arena E J, Bandura K, et al. Inflation and early dark energy with a stage II hydrogen intensity mapping experiment. *Soc Opt Photonics*, 2018, arXiv: [1810.09572](https://arxiv.org/abs/1810.09572)
- 10 Bandura K, Castorina E, Connor L, et al. Packed Ultra-wideband Mapping Array (PUMA): A radio telescope for cosmology and transients. *Bull Am Astron Soc*, 2019, 51: 53
- 11 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
- 12 Barkana R. Possible interaction between baryons and dark-matter particles revealed by the first stars. *Nature*, 2018, 555: 71–74
- 13 Chen X L. Radio detection of dark energy—The Tianlai project (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 1358–1366 [陈学雷. 暗能量射电探测—天籁计划简介. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 1358–1366]
- 14 Chen X. The Tianlai project: A 21 cm cosmology experiment. *Int J Mod Phys Conf Ser*, 2012, 12: 256–263
- 15 Chen X L. The Tianlai project: A 21-cm intensity mapping experiment. *Asso Asia Pac Phys Soc Bull*, 2015, 25: 29–34
- 16 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
- 17 Boonstra A J, Garret M, Wise M, et al. Discovering the Sky at the Longest wavelengths (DSL). In: IEEE Aerospace conference, 2015
- 18 Wu J, Hong X Y, Yan J Y, et al. Ultralong wavelength Radio Astronomical Telescope (in Chinese). In: 28th National Space Exploration Conference, Lanzhou, 2015 [吴季, 洪晓瑜, 阎敬业, 等. 超长波射电天文望远镜. 见: 第二十八届全国空间探测学术研讨会, 兰州, 2015]
- 19 Chen X L, Burns J, Koopmans L, et al. Discovering the Sky at the Longest wavelengths with small satellite constellations. 2019, arXiv: [1907.10853](https://arxiv.org/abs/1907.10853)
- 20 Chen X L, Yan J, Deng L, et al. Discovering the Sky at the Longest wavelengths with a lunar orbit array. *Philosophi Trans A*, 2020, 379: 20190566
- 21 Huang Q, Sun S, Zuo S, et al. An imaging algorithm for a lunar orbit interferometer array. *Astron J*, 2018, 156: 43
- 22 Xu Y, Hamann J, Chen X. Precise measurements of inflationary features with 21 cm observations. *Phys Rev D*, 2016, 94: 123518
- 23 Wu F Q, Wang Y G, Zhang J Y, et al. Site Selection for the Tianlai experiment. In: Proc XXXIst URSI General Assembly and Scientific Symposium JP.1, 2014
- 24 Seo H J, Dodelson S, Marriner J, et al. A ground-based 21 cm baryon acoustic oscillation survey. *Astrophys J*, 2010, 721: 164–173
- 25 Zhang J, Ansari R, Chen X, et al. Sky reconstruction from transit visibilities: PAON-4 and Tianlai dish array. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 461: 1950–1966
- 26 Chukwude A E, Chidi Odo F. Assessing the effects of timing irregularities on radio pulsars anomalous braking indices. *Res Astron Astrophys*, 2016, 16: 150
- 27 Zhu J L, Chen Z P, Chen X L, et al. Structural design and mechanical analysis of the Tianlai experimental parabolic cylinder antenna array (in Chinese). *Astron Res Tech*, 2015, 12: 14–22 [朱加炉, 陈志平, 陈学雷, 等. 天籁实验抛物柱面天线阵结构设计 with 力学分析. *天文研究与技术*, 2015, 12: 14–22]
- 28 Cianciara A J, Anderson C J, Chen X, et al. Simulation and testing of a linear array of modified four-square feed antennas for the Tianlai cylindrical radio telescope. *J Astron Instrum*, 2017, 6: 1750003
- 29 Li J X, Zuo S F, Wu F Q, et al. The Tianlai cylinder pathfinder array: System functions and basic performance analysis. *Sci China Phys Mech Astron*, 2020, 63: 129862
- 30 Wu F Q, Li J X, Zuo S F, et al. The Tianlai Dish Pathfinder Array: Design, operation and performance of a prototype transit radio interferometer. *Mon Not Roy Astro Soc*, 2011, arXiv: [2011.05946](https://arxiv.org/abs/2011.05946)
- 31 Das S. Progress in the construction and testing of the Tianlai radio interferometers. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy IX, 1070836. 2018, arXiv: [1806.04698](https://arxiv.org/abs/1806.04698)
- 32 Zuo S, Pen U L, Wu F, et al. An eigenvector-based method of radio array calibration and its application to the Tianlai cylinder pathfinder. *Astron J*, 2019, 157: 34
- 33 Zuo S, Li J, Li Y, et al. Data processing pipeline for Tianlai experiment. *Astron Comput*, 2020, 34: 100439
- 34 Li J X, Wu F Q, Sun S J. Reflections and standing waves on the Tianlai cylinder array. *Res Astro Astrophys*, 2007, arXiv: [2007.11129](https://arxiv.org/abs/2007.11129)
- 35 Zhang J Y, Liu J X, Wu F Q et al. Beam measurements of the Tianlai dish radio telescope using an unmanned aerial vehicle. *IEEE Mag Ant Prop*, 2007, arXiv: [2007.09351](https://arxiv.org/abs/2007.09351)
- 36 Zuo S, Chen X, Ansari R, et al. 21 cm signal recovery via robust principal component analysis. *Astron J*, 2019, 157: 4
- 37 Huang Q Z, Wu F Q, Ansari R, et al. Extracting 21 cm signal by frequency and angular filtering. *Res Astron Astrophys*, 2018, 18: 114
- 38 Niu C H, Wang Q X, MacMahon D, et al. The design and implementation of a ROACH2+GPU based correlator on the Tianlai dish array. *Res Astron Astrophys*, 2019, 19: 102

- 39 Zuo S, Chen X. A radio burst detection method based on the Hough transform. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 494: 1994–2003
- 40 Chen X L, Xu Y D, Yue B, et al. 10000 Challenging Science Problems—Astromomy (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010 [陈学雷, 徐怡冬, 岳斌, 等. 10000个科学难题·天文学卷. 北京: 科学出版社, 2010]
- 41 Loeb A, Zaldarriaga M. Measuring the small-scale power spectrum of cosmic density fluctuations through 21 cm tomography prior to the epoch of structure formation. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 211301
- 42 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*, 2003, 602: 1–11
- 43 Reber G. Hectometer Radio Astronomy. *J Roy Astron Soc Canada*, 1994, 88: 297
- 44 Novaco J C, Brown L W. Nonthermal galactic emission below 10 MegaHertz. *Astrophys J*, 1978, 221: 114–123
- 45 Keshet U, Waxman E, Loeb A. Imprint of intergalactic shocks on the radio sky. *Astrophys J*, 2004, 617: 281–302
- 46 Jester S, Falcke H. Science with a lunar low-frequency array: From the dark ages of the Universe to nearby exoplanets. *New Astron Rev*, 2009, 53: 1–26
- 47 Koopmans L. Peering into the Dark (Ages) with low-frequency space interferometers. 2019, arXiv: [1908.04296](https://arxiv.org/abs/1908.04296)
- 48 Chen X L. Some thoughts on developing our country's space-based low frequency radio astronomy (in Chinese). In: Proc 2nd Academic Annual Meeting of the Deep Space Exploration Branch of the Chinese Aerospace Society, 2005 [陈学雷. 关于开展我国空间低频射电天文学研究的一些设想. 见: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第2届学术会议论文集, 2005]
- 49 Cao X B, Zhang J X, Chen X L, et al. Development status and tendency of the ultra-long wave radio astronomy observation in lunar orbit (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2017, 4: 158 [曹喜滨, 张锦绣, 陈学雷, 等. 月球轨道编队超长波天文观测微卫星任务. 深空探测学报, 2017, 4: 158]
- 50 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

Summary for “21 cm宇宙学的探索——天籁与鸿蒙实验”

Exploring the 21 cm cosmology: The Tianlai and Hongmeng experiments

Xuelei Chen^{1,2}¹ 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, ChinaE-mail: xuelei@cosmology.bao.ac.cn

Since the end of the Big Bang, neutral hydrogen has been widely distributed in the universe, providing an important probe for studying the history of the universe from the dark age of the universe to cosmic dawn and reionization epoch, and then down to the post-reionization universe, and for accurately measuring the distribution of matter. But so far, due to the limitation of sensitivity, the observation of neutral hydrogen is mainly limited to the neighboring galaxies. To perform higher redshift observations, it is necessary to extract the 21 cm signal from foregrounds which are several orders of magnitude stronger. This places extremely high requirements on the design of observing instrument and data processing and analysis methods. In recent years, many 21 cm experiments have been built or being planned around the world, and 21 cm cosmology is on the eve of a breakthrough. China has also carried out exploratory experiments on 21 cm cosmology. This article presents the basic design and research progress of two such experiments: The key technology experiment of dark energy radio detection (Tianlai Experimental Array), and the Discovering Sky at the Longest wavelength (DSL) experiment, a lunar orbit radio astronomical observation array. The Tianlai Experimental Array is located at the Hongliuxia Observatory in Balikun County, Xinjiang, and it was completed in 2016. It includes a cylindrical antenna array and a dish antenna array for mid-redshift 21 cm intensity mapping of large-scale structures. At present, we have conducted a preliminary analysis of the observation data and verified the calibration method and the system performance. In technology development, we are currently conducting research on the calibration of antennas with UAV; and on the science side, we will continue to improve the data processing methods, focusing on surveys of the north celestial pole region, and plan to conduct Fast Radio Burst (FRB) searches. The DSL experiment intends to launch a linear formation of satellites to fly around the moon as an array, to conduct global spectrum measurement and interferometry imaging observations. This will open up a new observation window in the electromagnetic spectrum, that is, the frequency band below 30MHz, which is difficult to observe from the ground due to the Earth ionosphere absorption, refraction and radio frequency interferences (RFI), with great potential for new discoveries of the unknown. It will also accurately measure the global spectrum under more ideal conditions, exploring the dark ages and cosmic dawn.

neutral hydrogen, 21 cm radiation, cosmology, radio astronomy, cosmic dawn, lunar orbitdoi: [10.1360/TB-2020-1349](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1349)