

# 宇宙黎明和再电离时期低频全天总功率探测实验现状\*

张雪莹<sup>1†</sup> 郭铨<sup>1,2‡</sup> 郑倩<sup>1,2</sup> 陕欢源<sup>1,2</sup> 黄滢<sup>3</sup> 顾俊骅<sup>3</sup>

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)

(3 中国科学院国家天文台 北京 100101)

**摘要** 宇宙黎明和再电离时期探测是目前宇宙学最前沿科学研究方向之一. 对这一时期的直接探测只能依赖于观测来自这一时期红移后的中性氢21 cm信号, 其3种主要探测方式之一是21 cm信号全天总功率测量. 在此回顾已有和正在计划中的探测宇宙黎明和再电离时期的低频全天总功率测量实验及其进展, 包括地面射电望远镜如BIGHORNS<sup>1</sup>、EDGES<sup>2</sup>、LACE<sup>3</sup>、LEDA<sup>4</sup>、MIST<sup>5</sup>、REACH<sup>6</sup>、SARAS<sup>7</sup> 3、SCI-HI<sup>8</sup>、PRI<sup>Z</sup>M<sup>9</sup>以及空间低频总功率相关实验如DARE<sup>10</sup>、DAPPER<sup>11</sup>、FAR SIDE<sup>12</sup>、鸿蒙计划. 其中, EDGES实验是目前唯一声称观测到疑似宇宙黎明信号的实验, 然而其实验结果与标准宇宙学模型( $\Lambda$  Cold Dark Matter,  $\Lambda$ CDM)有不符之处. 如果该探测结果被证实, 那么这将是人类第1次探测到宇宙黎明和再电离信号, 从而填补宇宙演化历史的空白.

2022-02-24收到原稿, 2022-05-14收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(10973069、10973070), 国家重点研发计划(2018YFA0404601), SKA专项(2020SKA0110200), 中科院基础前沿科学研究计划从0到1原始创新项目(ZDBS-LY-7013), 上海市国际大科学工程“SKA区域中心前期建设”国际合作伙伴项目(19590780200)资助

<sup>†</sup>zhangxueying@shao.ac.cn

<sup>‡</sup>guoquan@shao.ac.cn

<sup>1</sup>Broadband Instrument for Global Hydrogen Reionisation Signal

<sup>2</sup>Experiment to Detect the Global EoR Signature

<sup>3</sup>Low-frequency Anechoic Chamber Experiment

<sup>4</sup>Large-aperture Experiment to Detect the Dark Ages

<sup>5</sup>Mapper of the IGM Spin Temperature

<sup>6</sup>Radio Experiment for the Analysis of Cosmic Hydrogen

<sup>7</sup>Shaped Antenna measurement of the background Radio Spectrum

<sup>8</sup>Sonda Cosmológica de las Islas para la Detección de Hidrógeno Neutro

<sup>9</sup>Probing Radio Intensity at high- $Z$  from Marion

<sup>10</sup>Dark Ages Radio Explorer

<sup>11</sup>Dark Ages Polarimetry Pathfinder

<sup>12</sup>Farside Array for Radio Science Investigations of the Dark ages and Exoplanets

关键词 宇宙学: 观测, 射电连续谱, 宇宙黎明和再电离时期探测, 总功率测量

中图分类号: P161; 文献标识码: A

## 1 引言

随着宇宙的膨胀, 宇宙从原初高温高密的等离子体状态进入到一个漫长的“黑暗时期”(Dark Ages, 红移 $z$ 约为30–200), 这时宇宙中没有发光的天体而只有充斥宇宙的中性气体. 较高密度区域逐渐聚集更多的暗物质而形成暗晕, 暗晕吸引并聚集气体, 最终孕育了第1代恒星和类星体, 它们被统称为“第一代发光天体”, 而它们形成的这个时期被称为“宇宙黎明”(Cosmic Dawn, CD,  $z$ 约为15–30)<sup>[1–2]</sup>.

第1代发光天体发出的紫外光子和X射线光子大多被星系内部的星际介质吸收, 但仍会有部分光子逃逸出来, 进入星系际介质(InterGalactic Medium, IGM). 这些光子能量高于氢原子基态电离能13.6 eV, 它们逐渐将星系之间的中性氢气体电离, 在红移 $z = 6$ 左右, 星系际气体基本都被高度电离. 这个过程被称为“宇宙再电离”(Epoch of Reionization, EoR,  $z$ 约为6–15)<sup>[3]</sup>. Robertson等<sup>[3]</sup>通过普朗克和哈勃太空望远镜的联合分析, 对宇宙再电离和早期恒星形成星系模型给出了进一步限制, 检验了大多数电离光子来自高红移恒星形成星系的假设, 强化了恒星形成星系主导再电离过程的结论. 宇宙黎明标志了第1代发光天体形成的时期, 而宇宙再电离则标志了宇宙结构形成过程中最后一个主要的物质形态转变过程.

探索宇宙黎明和再电离时期的重要手段之一, 是观测来自早期宇宙氢原子红移后的21 cm谱线. 中性氢21 cm谱线是由氢原子基态两个超精细结构子能级间的跃迁产生的, 辐射波长为21 cm. 随着宇宙膨胀, 来自宇宙黎明和再电离时期的21 cm辐射在现如今接收时的波长在1.4–6.5 m范围(对应频率范围约50–200 MHz). 这个时期的中性氢弥散在IGM中, 所以通过对这个波段红移后的21 cm辐射进行巡天观测, 可以直接获取宇宙早期中性氢的分

布, 从而揭示宇宙早期复杂结构形成的物理过程和机制(从早期宇宙处于等离子体态, 充斥着光子、重子, 到之后的恒星、星系形成).

这一时期正是宇宙从高度均匀各向同性发展为具有丰富团结构的重要时期, 对研究恒星形成历史, 宇宙介质的热演化以及大尺度结构形成都具有极其重要的意义. 对这一时期的研究有助于验证现有物理定律, 测得的中性氢频谱将会重新定义标准宇宙学模型并有望揭示新的物理规律, 从根本上理解宇宙是如何运作的.

利用中性氢21 cm谱线直接探测宇宙黎明和再电离时期的方法主要有3种: (1) 21 cm信号全天总功率测量, 例如地面射电望远镜实验BIGHORNS、EDGES、LACE、LEDA、MIST、REACH、SARAS 3、SCI-HI、PRI<sup>2</sup>M以及空间低频总功率相关实验如DARE、DAPPER、FARSIDE、鸿蒙计划; (2) 21 cm信号的功率谱统计测量, 例如LOFAR (Low Frequency Array)<sup>[4]</sup>, MWA (Murchison Widefield Array)<sup>[5]</sup>, LWA (Long Wavelength Array)<sup>[6]</sup>, PAPER (Precision Array for Probing the Epoch of Reionization)<sup>[7]</sup>, HERA (Hydrogen Epoch of Reionization Array)<sup>[8]</sup>; (3) 对再电离时期大尺度电离氢区直接成像观测, 平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)<sup>[9]</sup>不但具有对宇宙黎明和再电离信号进行统计测量的能力, 同时其高分辨率和高灵敏度也使其具备了对宇宙再电离结构进行直接成像观测的能力. 3种研究方法在观测方式及后续的数据处理和分析上不尽相同. 对于未来SKA而言, 统计测量将基于未来SKA的巡天观测模式, 而成像观测将基于定点观测模式, 这两种测量方法是基于射电干涉阵实现的. 而全天总功率测量则主要由单天线实现.

赵碧轩等<sup>[10]</sup>论述了目前上述3种探测方法相关实验的进展, 而本文着重评述第1种方法—低频全天总功率测量方面目前的实验及进展. 第2节对低

频全天总功率探测的理论基础进行概述; 第3节对现有的地面射电望远镜以及空间低频总功率相关实验进行了介绍; 第4节为总结与展望.

## 2 总功率探测理论基础

### 2.1 中性氢21 cm信号

随着宇宙膨胀, 宇宙黎明( $z$ 约为15–30)和再电离( $z$ 约为6–15)时期的中性氢21 cm信号, 传播至今其波长被拉伸到米波波带, 对应的频率落在50–200 MHz范围内, 属于低频射电频段. 早期宇宙的中性氢21 cm信号主要源自于IGM中, 具有各向同性的特点, 因此可以通过对天空进行全天测量的方式捕捉信号.

黑暗时期较高密度区域在引力的作用下, 物质聚集成团孕育了第1代恒星和类星体. 这些恒星或类星体在黑暗之中划出第1缕曙光, 它们被统称为“第1代发光天体”, 这段时期称为宇宙黎明. 此时, 宇宙处于完全中性的状态, 质子和电子复合形成了中性氢原子. 随着宇宙中的第1代发光天体<sup>[11]</sup>产生的高能光子开始电离其周围气体, 大量中性氢开始被电离, 宇宙进入了再电离时期. 电离区域随着第1代发光天体的形成和增大而逐渐扩大. 这些不断扩大的电离区域渐渐地相互连接起来, 直至弥漫于整个IGM时, 宇宙再电离时期结束. 整个宇宙经历了从中性到电离的过程, 也完成了从黑暗到光亮的演化历程. 宇宙黎明和再电离过程, 是宇宙演化历史中的关键时期, 更是一段充满了未知的时期.

处于基态的中性氢原子, 其电子自旋所产生的磁矩相对氢核(质子)自旋所产生的核磁矩有两种可能的取向: 平行或反平行. 前者的能量高于后者, 当处于上能级(两个磁矩平行)的中性氢原子跃迁到下能级(两个磁矩反平行)时, 发出一个频率为1420.406 MHz的光子, 这就是氢21 cm谱线辐射. 且21 cm谱线一旦发出, 就不易被前景星系或者星际物质再次散射, 所以氢21 cm谱线成为了探测不同时期宇宙的有力工具.

第1代发光天体的形成使周围的中性氢原子发生电离, 电离区的结构使得21 cm辐射与宇

宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)脱耦, 因此21 cm辐射信号相对于宇宙微波背景的起伏是进行宇宙黎明和再电离时期探测的最直接而有效的工具<sup>[12]</sup>. 它的温度涨落直接取决于发光天体的分布和性质以及宇宙介质的热历史. 根据哈勃定律, 氢21 cm谱线的频率随红移会发生变化 $\nu = 1420.406/(1+z)$  MHz, 其中红移代表了宇宙的年龄信息. 通过不同红移时期中性氢21 cm谱线的观测, 可以揭示宇宙不同时期(例如宇宙黎明和再电离时期)的中性氢分布, 从而描绘出第1代恒星和星系的形成及气体再电离的复杂过程, 精确测量宇宙大尺度结构的初期演化.

文献[13–17]详细描述了21 cm谱线的物理原理和对全天信号的预期. 全天信号的主要预期特征是除去宇宙微波背景辐射信号后, 在70 MHz左右处深度约100 mK的吸收谷以及在100 MHz左右处高度约30 mK的发射峰.

$z$ 处的中性氢发射线被观测到的波长是 $21(1+z)$  cm, 则中性氢区域的光深为

$$\tau = \frac{3c^3 h_p A_{10} n_{\text{HI}}}{32\pi k_B \nu_0^2 T_S H(z)}, \quad (1)$$

$$\approx 8.598 \times 10^{-3} (1 + \delta)$$

$$x_{\text{HI}} \frac{T_{\text{CMB}}(z) \Omega_b h^2}{T_S} \frac{0.15}{0.02} \left( \frac{0.15}{\Omega_M h^2} \frac{1+z}{10} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

其中,  $c$ 为光速,  $h_p$ 为普朗克常数,  $h$ 为无量纲的哈勃常数,  $k_B$ 为玻尔兹曼常数,  $\nu_0 = 1420.406$  MHz为静止参考系下中性氢超精细跃迁频率,  $A_{10} = 2.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ 为跃迁的自发衰变率,  $T_S$ 为IGM的自旋温度,  $T_{\text{CMB}}(z) = 2.73(1+z)$  K为红移 $z$ 时的CMB温度,  $n_{\text{HI}}$ 为局部中性氢密度,  $H(z)$ 为红移 $z$ 时的哈勃常数,  $\delta$ 为重子超密度比例,  $x_{\text{HI}}$ 为中性氢的电离度,  $\Omega_b$ 为重子密度,  $\Omega_M$ 为物质密度.

根据Rayleigh-Jeans极限中的辐射转移方程, 考虑静止参考系下天空在特定频率下的强度 $I_\nu$ 和表面亮度 $T_\nu$ , 结合光深 $\tau$ 公式(2)式, 则21 cm亮度可以具体展开为(单位mK):

$$T_{21} = 23.47(1 + \delta)x_{\text{HI}} \left( \frac{T_S - T_{\text{CMB}}}{T_S} \right) \left( \frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right)$$

$$\left( \frac{0.15}{\Omega_M h^2} \frac{1+z}{10} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

由上式可得出,  $T_{21}$  为正值还是负值, 取决于  $(T_S - T_{\text{CMB}})$  的符号. 当  $T_S$  高于  $T_{\text{CMB}}$  时,  $T_{21}$  为正值, 产生 21 cm 发射信号; 当  $T_S$  低于  $T_{\text{CMB}}$  时,  $T_{21}$  为负值, 产生 21 cm 吸收信号. 因此, 相对于 CMB, 通过探测亮温度上的起伏可以检测中性氢的发射和吸收信号. 同时, 由于吸收信号幅值 ( $T_S < T_{\text{CMB}}$ ) 大于发射信号, 相对而言更容易探测到中性氢 21 cm 的吸收信号.

在(3)式中, 自旋温度  $T_S$  控制着相对于 CMB 中性氢信号吸收或发射大小, 这是由周围的 Ly $\alpha$  或 CMB 光子之间的粒子碰撞决定的, 可通过玻尔兹曼方程定义自旋温度  $T_S$ :

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{-\frac{T_*}{T_S}}, \quad (4)$$

其中,  $n_1$  和  $n_0$  分别为氢原子处于激发态和基态的粒子数密度, 因此氢原子总密度  $n_{\text{H}} = (n_0 + n_1)$ ,  $g_1/g_0 = 3$  为自旋简并因子的比值,  $T_* = h\nu/k_B = 0.068 \text{ K}$  为超精细能级之间能量差所相对应的温度,  $\nu$  此时的取值为 21 cm 信号跃迁的频率. 在仅有 CMB 辐射的情况下, 自旋态经过几十万年的时间即可与 CMB 达到热平衡. 此时, 中性氢既不会产生吸收信号, 也不会产生发射信号.

然而, 宇宙气体和 CMB 光子气体遵循不同的热演化历史, 即

$$T_{\text{CMB}}(z) = T_{\text{CMB}}(0)(1+z), \quad (5)$$

$$T_{\text{gas}}(z) = T_{\text{gas}}(0)(1+z)^2. \quad (6)$$

其中,  $T_{\text{CMB}}(0)$  和  $T_{\text{gas}}(0)$  分别为  $z = 0$  处的宇宙微波背景辐射和宇宙气体的亮温度,  $T_{\text{gas}}(z)$  为红移  $z$  处的宇宙气体亮温度. 由于宇宙气体和 CMB 光子的不同冷却历史, 仍然有可能在结构形成纪元之前检测到 CMB 的共振 21 cm 吸收信号<sup>[18]</sup>.

在存在 Ly $\alpha$  光子的情况下,  $T_S$  和气体的动力学温度  $T_K$  之间的强耦合是由 Ly $\alpha$  光子的共振散射引入的, 称为 Wouthuysen-Field 效应, 即

$$T_S^{-1} = \frac{T_{\text{CMB}}^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_c T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_c}, \quad (7)$$

其中,  $T_\alpha$  为 Ly $\alpha$  光子的碰撞温度,  $x_\alpha$  和  $x_c$  分别为 Ly $\alpha$  光子散射和粒子碰撞的耦合系数. 当  $x_{\text{tot}} \equiv x_\alpha + x_c \gtrsim 1$  时, 自旋温度与气体温度产生强耦合, 当  $x_{\text{tot}} \ll 1$  时,  $T_S$  接近  $T_{\text{CMB}}$ .

图1描述了全天平均 21 cm 信号在相关宇宙时间、频率、红移范围内的主要特征, 从红移 200 左右的“黑暗时期”到红移 6 之前的某个时间再电离结束, 其中红实线为 21 cm FAST 数据, 蓝实线为 EDGES 观测结果的拟合数据, 虚线表示亮温度  $T_{21} = 0$ . 该红移范围内的频率结构是由几个物理过程驱动的, 包括第 1 代星系的形成和中性氢的加热和电离. 由于尚不明确第 1 代星系的性质, 中性氢 21 cm 信号的确切形式存在相当大的不确定性.

随着宇宙的演化, 起初 ( $200 < z < 1100$ ) 气体与 CMB 光子耦合,  $T_K = T_{\text{CMB}}$ , 又由于气体密度高, 使  $x_c \gg 1$ ,  $T_S = T_K$ , 则  $T_S = T_{\text{CMB}}$ , 不产生 21 cm 信号  $T_{21}$ . 之后随着宇宙膨胀, 气体绝热冷却,  $T_K < T_{\text{CMB}}$ , 气体密度高  $x_c \gg 1$ ,  $T_S = T_K$ ,  $T_K$  正比于  $(1+z)^2$ , 此时  $T_S < T_{\text{CMB}}$ , 产生吸收信号. 之后随着气体密度降低, 碰撞耦合减弱,  $T_K < T_S < T_{\text{CMB}}$ , 吸收信号减弱. 随着第 1 代恒星形成, 辐射 Ly $\alpha$  光子,  $x_\alpha \gg 1$ ,  $T_S$  接近更冷的  $T_K$ ,  $T_S < T_{\text{CMB}}$ , 产生更强的吸收信号. 随着早期星系的形成, 气体被由第 1 代发光天体发出的紫外和 X 射线光子加热,  $T_K$  升高, 辐射 Ly $\alpha$  光子,  $x_\alpha \gg 1$ ,  $T_S$  接近变热的  $T_K$ ,  $T_S < T_{\text{CMB}}$ , 产生减弱的吸收信号. 随着气体不断被加热,  $T_K > T_{\text{CMB}}$ , 由于  $x_\alpha \gg 1$ ,  $T_S$  接近  $T_K$ ,  $T_S > T_{\text{CMB}}$ , 产生发射信号, 宇宙再电离时期开始. 随着氢的再电离, 21 cm 信号减弱直至消失.

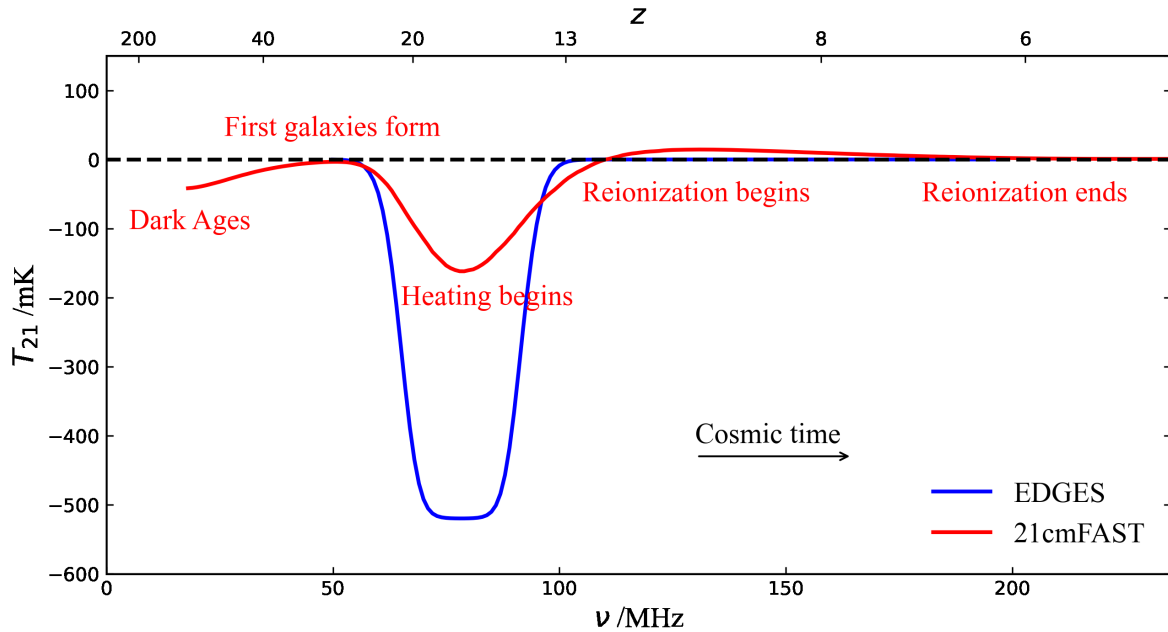


图 1 图中红线为通过复合期间的非均匀性及再电离过程中恒星形成的校准光加热反馈模型<sup>[19]</sup>21cmFAST程序预测的全天平均21 cm亮温度演化, 其中宇宙学参数取自Planck 2016年数据<sup>[20]</sup>; 蓝色为基于EDGES观测结果<sup>[21]</sup>的拟合数据(Flatten Gaussian).

Fig. 1 The red line in the figure shows the global averaged 21 cm bright temperature evolution, 21cmFAST, predicted by the calibrated light heating feedback model<sup>[19]</sup> of nonlinearization of recombination and star formation during reionization. The cosmological parameters are taken from Planck 2016 data<sup>[20]</sup>. Blue line is the fitting data (Flatten Gaussian) based on the observations of EDGES<sup>[21]</sup>.

## 2.2 全天总功率实验的挑战

产生自宇宙黎明和再电离时期的中性氢21 cm信号, 由于早期宇宙中性氢分布较广, 具有全天性, 这有利于信号观测. 但是信号经过红移落入低频波段, 相对于明亮的星际低频辐射前景, 早期宇宙21 cm信号非常微弱. 要获得如此微弱的中性氢信号, 对目前的射电观测而言是一个巨大的挑战!

中性氢21 cm信号, 在到达天线之前, 会先淹没在比其高出约5个数量级的强大前景中, 包括银河系同步辐射(synchrotron emission)和自由-自由辐射(free-free emission), 其次是宇宙射电源(包括射电星系、活动星系核、星系团等)的贡献. 虽然这些前景远大于21 cm信号, 但它们为连续谱辐射, 在谱空间缓慢变化, 而来自宇宙再电离区域的中性氢辐射是一条明显的发射线或吸收线, 在谱空间中变化快. 因此, 在谱空间移去一个光滑的幂律成分, 基本可以消除前景对探测信号的影响. 即便如此, 我

们依然面临大动态范围的挑战, 即把去除前景后的残差抑制到宇宙黎明和再电离信号的量级以下是极其困难的. 经过前景之后, 信号会穿过地球大气层. 地球大气层内的电离层是随时间变化的, 电离层对信号的吸收和折射会显著地影响来自早期宇宙信号的频率结构<sup>[22]</sup>. 即使是在“安静”的夜间, 电离层中电子含量的变化也可能会妨碍从地面探测全天EoR频谱特征<sup>[23]</sup>. 经过地球大气层后, 信号还会被处于低频射电波段的射频干扰(Radio-Frequency Interference, RFI)影响, RFI很难与中性氢信号区分. 通常, 在时间频率和极化上, RFI都具有复杂的结构, 并且在幅度上具有很大的动态范围. 普遍的射频干扰源有: 调频(Frequency Modulation, FM)广播发出的频率范围为88–108 MHz的信号, 影响范围可长达数百公里; 广播电视发出的, 干扰频段为165–223 MHz的信号. 此外, 高功率射频干扰源还包括卫星信号例如约137.5 MHz的

低轨道移动卫星数据通讯系统以及源于航空通讯的117–136 MHz频段的干扰。这些RFI会对来自宇宙黎明和再电离时期50–200 MHz的21 cm信号观测产生干扰。由于地面上的射电宁静区域越来越少,给测量带来了一定的困难,因此有建议到更少受到地球射电干扰的月球背面进行探测。此外,要精确测量幅度为100 mK左右的再电离信号,要求我们完美理解测量系统,精确地校准整个系统到mK量级,才能观测到较为可信的目标信号。

### 3 低频全天总功率实验现状

宇宙黎明和再电离时期的中性氢21 cm信号极其微弱,据预测其亮温度幅值约为100 mK。在其对应的观测频段内,还存在射电干扰信号以及银河系和河外星系前景信号,其中银河系前景亮温度普遍位于 $10^2 \sim 10^3$  K量级。因此,不论从硬件采集,还是通过后续数据处理,获取这一时期的中性氢21 cm信号都是极为困难的。然而,中性氢是宇宙中最普遍的重子物质,来自宇宙黎明和再电离时期的氢21 cm信号普遍存在于星际介质中。即使氢21 cm信号是由微弱的超精细跃迁产生,其普遍性意味着它可以通过全天空平均总功率实验被探测到。

#### 3.1 地面射电望远镜

目前,美国、印度等国家的多个团队正在开展低频全天总功率测量实验。

BIGHORNS实验<sup>[24]</sup>基于辐射计系统的便携性和可移动性,即便处于偏远地区也能运作,具有低功耗、信号路径简单化等优势,由Sokolowski等<sup>[24]</sup>设计。2012年开始运行时,采用的是面向东西方向的宽带双锥形天线,2014年改用团队自行设计的圆锥形对数螺旋天线,频率范围为40–300 MHz,感兴趣的最高频率为250 MHz。BIGHORNS坐落于西澳大利亚州的偏远地区,并选择其中的3处射电宁静区(Muresk、Eyre Bird天文台、Wondinong观测站)分别采集数据<sup>[24]</sup>。然而,即使处于偏远地区,晚上采集到的数据质量也还是会被来自遥远海岸线附近发射基站的长距离射电干扰源影响。因此即使仅在其中1处采集到的数据量是足够

的,BIGHORNS团队仍选择3处地点分别采集数据,尽量减少射电干扰的影响,提高数据质量。利用BIGHORNS系统测得的数据,Sokolowski等<sup>[24]</sup>对大气波导产生的FM广播的长距离射电干扰对Murchison Radio-astronomy Observatory (MRO)站址的影响进行了统计研究<sup>[25]</sup>。在长达500多天的监测数据中,发现其中约有100 d时间里,MRO的站址受到了长距离FM射电干扰的影响,其中干扰强度较高( $> 10$  dB)的天数为19 d。另外Sokolowski等<sup>[24]</sup>还利用BIGHORNS的观测数据研究了电离层对地面全天总功率实验的影响。他们发现在地面全天总功率的实验中,虽然电离层在80 MHz上可以引入1–100 K额外干扰,但是经过长时间的积分,这样的干扰平均效果趋近于零,因此不致于完全阻碍地面实验对来自地球外的全天总功率的测量。这与之之前Datta等人的研究<sup>[26]</sup>结论相反。后者认为由于电离层导致的闪烁噪音(Flicker Noise)使得最后实验测得的信号灵敏度很难达到检测宇宙再电离信号所要求的 $\sim$  mK量级。

EDGES实验坐落于西澳大利亚州的MRO站点,与澳大利亚SKA先导设备MWA处于同一射电宁静区内。EDGES使用两种不同波段的低频天线:工作在50–100 MHz的低频段天线和工作在100–200 MHz的高频段天线。2008年,Bowman等<sup>[27]</sup>发表了100–200 MHz天线的观测结果。8 h高质量观测数据显示100–200 MHz频率范围内的宇宙再电离全天总功率信号 $T_{21}$ 不高于450 mK。2010年Bowman等<sup>[28]</sup>利用3个月的观测数据,在95%的置信区间上,排除了红移6到13之间再电离持续时间( $\Delta z$ )短于0.6的可能性。2018年,Bowman等<sup>[21]</sup>报告了在全天总功率平均谱上观测到了一个中心在78 MHz,宽度为19 MHz,幅度约为500 mK的吸收谱特征,有可能是早期恒星的形成历史在21 cm全天空平均谱上产生的特征结构,如图1中蓝线。但这个吸收结构的幅度500 mK比标准宇宙学模型的预言要高很多<sup>[21]</sup>。如果该实验结果被证实,那么它将是人类第1次发现的宇宙黎明信号,具有划时代意义。利用EDGES的观测结果,Monsalve等人对宇宙再电离的模式<sup>[29]</sup>、宇宙早期星系<sup>[30]</sup>和早期宇宙<sup>[31]</sup>中与再

电离过程相关的参数作出了限制. 除了对宇宙再电离的研究, Rogers等<sup>[32]</sup>和Monsalve等<sup>[29, 31]</sup>还利用EDGES设备研究了低频弥散背景(50–200 MHz范围)谱指数随时间的变化.

LACE实验提出了一项使用外部校准器的全新概念设计研究<sup>[33]</sup>. 在该设计中, 天线将被放置在地下暗室中, 整个暗室的内壁、底部和穹顶都铺设吸波材料, 且可操控穹顶进行移动开合以最大限度地减少环境影响如RFI和地面辐射/反射. 如果在短时间内测量, 使用外部校准器替代当前EoR实验中常用的内部校准器, 可以消除仪器效应如波束效应、接收机增益和系统不稳定性. 而银河系漫辐射的周日运动或将成为外部校准器的最可能来源, Huang等<sup>[33]</sup>讨论了观测策略、提取EoR信号的算法及科学预测.

LEDA实验<sup>[34]</sup>最先在LWA1的设备基础上开展验证<sup>13</sup>, 后来又在美国加州欧文斯谷射电天文台(Owens Valley Radio Observatory, OVRA)开展进一步的实验. 验证基于LWA1的核心天线阵(共64个偶极天线), 而Schinzel等在LWA1核心天线的外围另外安装了5个额外的天线, 并且对天线信号的链路、后端数字相关机以及功率的测量和校准系统上做了相应的改进. 在欧文斯谷射电天文台开展的实验OVRO-LWA, 同样使用64个天线的核心阵加上5个外围天线. 两组天线工作的频率范围为40–85 MHz. LEDA的特点在于天线的设计由密集的干涉阵列加上数个外围天线组成. 增加外围天线能减少耦合效应对增益高阶项的影响, 可以提供长基线以更好地解析来自银河系的弥散辐射, 增加点源观测的灵敏度. LEDA实验在两个站点都完成了观测测试, OVRO-LWA站点的实验还测量了银河系40–80 MHz弥散辐射的谱指数, 并提出了一些对未来实验改进的建议. 使用LEDA观测到的19 min数据, 通过构建宇宙黎明时期21 cm信号的高斯模型, Bernardi等<sup>[35]</sup>基于贝叶斯分析对数据进行7阶多项式拟合, 以从更明亮的前景辐射中提取微弱的

全天21 cm信号. 结果显示, 21 cm信号幅值限制在–890–0 mK之间, 宽度大于6.5 MHz, 在50–100 MHz频段内能达到95%的置信区间.

MIST实验是由Bustos等<sup>14</sup>开展的精确探测高红移中性氢的实验. 实验使用偶极刀片式天线, 工作频率50–120 MHz<sup>[36]</sup>, 将在McGill极地研究站和阿塔卡马沙漠展开观测.

REACH实验<sup>15</sup>是由英国剑桥大学REACH实验小组最新提出的全天平均21 cm总功率测量实验, 相较于其他总功率实验, REACH实验在以下几个方面做出了改进<sup>[37]</sup>: (1)使用了一个响应较为平滑的宽带低频(50–200 MHz)背腔(cavity-backed)天线; (2)实验将针对21 cm信号、前景和仪器效应分别建立物理模型, 用于后续数据处理; (3)实验将使用贝叶斯分析的方法来提取信号; (4)实验一开始使用单个宽带天线开展实验, 后续将使用多个天线进行更多实验和验证. REACH实验站址选在了南非的Karoo射电保护区, 与HERA实验站址相同, 将来也可以与HERA天线协同观测. 模拟结果显示, 使用贝叶斯分析校准测量系统的REACH实验, 其测量结果有望取得较高的精度<sup>[38]</sup>. 另外Cumner等<sup>[39]</sup>对REACH实验所用天线的设计理念做了详细的说明, 描述了天线设计如何在光滑的频率响应和较低阻抗匹配之间取得平衡. Cumner等<sup>[39]</sup>已经制作完成一个2.5:1的天线原型, 模拟测量显示天线可以探测中心频率80–130 MHz之间幅度为155 mK的信号, 实际天线预计将部署到REACH实验站址并投入观测.

SARAS实验由Patra等<sup>[40]</sup>于2013年提出. 实验坐落于印度班加罗尔以北80 km处的Gauribidanur天文台, 使用改进后的胖偶极子天线<sup>[41]</sup>工作频率范围87.5–175 MHz. SARAS实验的特点在于它利用相关频率仪(correlation spectrometer)加上功率分配器和交叉开关(Cross-over switch)组成测量差分辐射计(radiometer)用以测量天线接收温度和内部参考源的噪声温度之差. 通过交叉开关的选择得

<sup>13</sup> memo: A Prototype Lower-VHF Radiometry System at the Long Wavelength Array

<sup>14</sup> <http://www.physics.mcgill.ca/mist/>

<sup>15</sup> <https://www.astro.phy.cam.ac.uk/research/research-projects/reach>

到不同状态系统的观测. 比较系统在不同状态的观测, 可以抵消大部分来自信号链路和数字接收机产生的额外噪音. Patra等<sup>[42]</sup>在2015年发布了24 h实际观测数据的分析结果, 由于FM广播的干扰, 只有在110–170 MHz范围内的数据被用于实际分析. Patra等<sup>[42]</sup>将SARAS实验在150 MHz观测到的全天温度与Landecker和Wielebinkski<sup>[43]</sup>于1970年的观测结果做了比较, 发现两者结果大约相差8 K ( $\sim 0.8\%$ ). 第2代实验SARAS 2改变了天线的设计, 使用球形单极子天线, 工作频率扩展到40–200 MHz<sup>[44–45]</sup>, 但由于其球形天线总效率在低频段相对较差以及FM广播的干扰, Singh和其同事<sup>[44–45]</sup>多年来关注工作频率中略高频段(110–200 MHz), 并在该频段内进行数据处理和系统性能测试. 经过模拟和现场测试, 球形天线具有与频率无关的波束以及频谱平滑的反射和辐射效率. 使用GMOSS模型<sup>[46]</sup>和SARAS 2接收机, 获取球形天线的总效率. 相比于第1代实验SARAS, 第2代实验SARAS 2优化了对Landecker和Wielebinkski<sup>[43]</sup> 150 MHz全天天图的校准. 2018年, Singh等人发布了63 h实验观测数据的分析结果: 平均每晚上SARAS 2大约能观测5 h, 扣除前景后信号的残差大约是33 mK, 通过这些数据可以排除掉264个再电离模型中的20个, 其中15个模型可以在 $5\sigma$ 的置信水平上被排除<sup>[47]</sup>. 2021年, Nambissan等<sup>[48]</sup>提出了第3代SARAS实验的设计方案. 新的方案进行了包括引入了dicke切换开关在内的一系列改进, 工作频率范围也增大到40–230 MHz, 最终21 cm信号探测的精度有可能达到1 mK.

SCI-HI<sup>[49]</sup>是一个旨在测量21 cm再电离信号的全天平均亮温度的单天线实验, 实验使用HIBiscus天线<sup>[50]</sup>, 频率范围40–130 MHz. 整个实验设备能直接使用电池驱动, 具有非常好的可移动性. 2013年6月, SCI-HI实验在墨西哥的偏僻小岛Isla Guadalupe上开展为期两周的观测, 除了5个较强

的广播信号外, 其他的干扰(0.1 dB)只略强于银河系前景, 实验数据经过处理后的残差仍高出21 cm信号1–2个数量级.

PRI<sup>2</sup>M实验<sup>[51]</sup>于2017年4月最先在Marion岛屿上进行. 该岛位于南非和南极洲中间的亚南极地区, 距离最近的永久居民区2000 km, 是地球上最偏远的射电宁静区之一. PRI<sup>2</sup>M实验采用的是之前为SCI-HI实验设计的HIBiscus四方形天线设计方案. 两个双极化天线中心频率分别为70 MHz和100 MHz, 两个辐射计的组合频率范围为30–200 MHz. 70 MHz、100 MHz天线组件边长分别为3 m、2 m, 这是为了使70 MHz天线在频率50–90 MHz范围以及100 MHz天线在频率70–130 MHz范围内能有最优的天线波束图. 初步实验结果显示, Marion岛是一个低频射电环境非常安静, 有助于开展低频射电实验的极佳场所. 表1为地面射电望远镜各实验参数对比.

在使用单天线进行全天总功率信号的测量中, 仪器的校准和系统的影响都是实验中的巨大挑战, 并且要测量到微弱的信号, 接收系统噪声要达到mK的精度. 相对于单天线而言, 阵列可以解决接收系统的噪声问题. Singh等人在2015年的文章<sup>[52]</sup>中就提出了使用干涉阵列进行全天总功率信号测量的方法. 其工作指出, 使用干涉阵列进行全天总功率信号测量是可行的, 并且建议使用全向天线作为干涉阵列的接收单元, 在基线长度为几个波长时能捕获高达20% 的全天信号. 由直径为 $6\text{--}12\lambda$ 的小孔径天线制成的干涉仪, 其对孔径场的感应中具有均匀的加权, 响应比全天EoR信号小3个数量级. 如果孔径天线在其孔径感应中具有真实的高斯变化, 则该响应甚至下降到 $10^{-7}$ 以下. 此外, 干涉单元间分束器的使用也有利于信号的测量. 图2为平行分布(1维天线垂直于基线向量)阵列对不同基线长度的响应, 在该图中还显示了对各向同性天线的响应以供参考.



表 1 地面射电望远镜各实验参数对比  
**Table 1 Comparison of experimental parameters of ground radio telescope**

Experiment	Frequency Range	$z$	Antenna	Root Mean Square
BIGHORNS	40–300 MHz	4–34	Conical log-spiral antenna	$\sim 10$ mK can be achieved in less than two nights in the best parts of the year
EDGES	100–200 MHz (High-band) 50–100 MHz (Low-band)	6–27	Blade dipole antenna	100 hours are required to integrate down to $\sim 10$ mK
LACE	50–200 MHz	6–27	Linear-polarized dipole antenna	–
LEDA	40–85 MHz	16–34	Dual-polarized dipole antenna	Antenna 252A performs best (between $-5$ to $5$ K)
MIST	50–120 MHz	11–27	Blade dipole antenna	Desirably, 2.78 hours are required to integrate down to $\sim 10$ mK
REACH	50–200 MHz	6–27	Cavity-backed antenna	8 mK
SARAS 3	40–230 MHz	5–34	Monopole Cone-disk antenna	1 mK
SCI-HI	40–130 MHz	10–34	HIBiscus antenna	1 K
PRI <sup>Z</sup> M	30–200 MHz	6–46	HIBiscus antenna	–

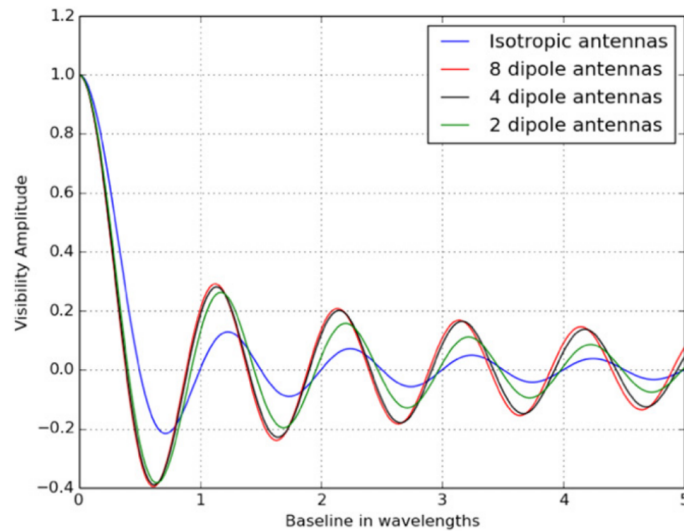


图 2 平行分布的 1 维天线干涉阵对不同数量偶极子天线的响应<sup>[52]</sup>

Fig. 2 Response of one-dimensional antenna interference array with parallel distribution to different number of dipole antennas<sup>[52]</sup>

ASSASSIN (The All-Sky Signal Short-Spacing Interferometer) 是 McKinley 等<sup>[53]</sup> 基于 Singh 等人的工作<sup>[47]</sup> 开展的基于工程开发阵列-2 (Engineering Development Array-2, EDA-2, 为类 SKA 原型阵) 实测数据的全天总功率信号测量的研究. McKinley 等人在文献<sup>[53]</sup> 中阐述了使用近距离偶极子天线组成的阵列进行 21 cm 全天总功率信号测量和提取的方法. 通过绘制可见度函数的振幅与预期全天响应的对比图, 并使用最小二乘法 (ordinary least squares, OLS) 拟合, 获取全天信号亮温度. 为了评估全天红移后的 21 cm 信号在仿真和真实数据中的可检测性, 使用两种方式之一评估拟合后的 RMS (Root Mean Square) 残差: (1) 在对数空间对数据进行多项式拟合和扣除; (2) 对数据联合拟合全天 21 cm 模型和对数多项式前景模型. 仿真结果表明, 基于理想仪器设计的阵列测量红移后的 21 cm 信号在理论上是可行的. 同时, 基于 EDA-2 的实测数据也验证了其信号提取方式在提取全天银河系前景信号的可行性.

以上是针对各地面全天总功率实验的介绍, 现小结如下:

由于中性氢气体的绝热冷却速度比宇宙微波背景辐射快, 这将导致在中性氢 21 cm 谱线中出现宽吸收线特征, 称为“宇宙黎明吸收谷”, 预测该结构的中心位于 70 MHz 左右处, 深度约 100 mK. 这个结构是整个全天总功率谱上最明显的结构, 但是在这个频率范围内, FM 广播是一个重要干扰源, 这使得 SARAS 实验不得不舍弃 110 MHz 以下的实验数据. 尽管低频全天总功率测量实验通常会选在远离射频干扰源的射电宁静区内进行, 但还是不可避免地在实验过程中采集到干扰信号. BIGHORNS 实验发现由于大气波导的效应, 实验站址会接到遥远城市发出的 FM 广播和数字电视信号, 因此远离人类居住区的实验站址仍然需要考虑暂现的 FM 广播产生的射频干扰. PRIM 的站址选在位于南非与南极洲之间的 Marion 岛上, 实验结果显示 Marion 岛的低频射电环境非常宁静, 冬季夜晚电离层较为平静, 如果不考虑交通的便利性, 它将是一个理想的低频实验的站址.

虽然银河系的辐射比宇宙黎明和再电离时期

的 21 cm 信号要高出 4-5 个量级, 但银河系辐射在频谱上是平滑的, 即在射电频段内表现为幂律谱. Pritchard 等人于 2010 年<sup>[16]</sup> 提出了去除前景的基本理念, 将全天模型<sup>[54]</sup> 与简单偶极子天线的解析模型进行卷积以形成模拟测量值. 该方法随后被多个探测宇宙黎明的实验<sup>[21, 44, 49]</sup> 使用, 包括 EDGES、LEDA、SCI-HI、SARAS 2 等. 从各实验结果来看, 移除前景后实验测得信号的残差大约在几十到几百 mK 之间, 离精确限制再电离模型所要求的 mK 量级的精度还有一定距离.

BIGHORNS 实验表明, 若是在最佳条件下 (银河系中心高度  $\leq -20^\circ$ , 且不考虑由于 RFI 或其他因素进行的切除) 采集数据, 在不到两个晚上的时间内就可以达到约 10 mK 的精度. 而在一年中观测条件最差的时候, 则至少需要 6 个晚上才能使积分降到约 10 mK 的量级<sup>[24]</sup>. 积分时间越短越好, 因为在连续两晚的时间段能获取更相似的环境条件 (如天气、电离层等). EDGES 实验表明, 同时拟合前景和 21 cm 信号模型会使残差随积分时间  $t$  的增加而下降 (具有接近  $1/\sqrt{t}$  的趋势) 至约 10 mK 量级<sup>[21]</sup>, 然而仅拟合前景模型产生的残差相比于同时拟合两个模型下降得稍缓. LEDA 实验展示了在现场测试中校准数据扣除 1、3、5 和 7 阶多项式拟合后的残差. 鉴于周围地形和竣工时天线几何形状的差异, LEDA 团队将天线响应之间的差异主要归因于天线的响应随频率有变化. 天线 252A 的性能最好 (扣除 7 阶多项式后残差介于 -5 至 5 K 之间)<sup>[34]</sup>, 而其他天线的残差则明显较高. MIST 实验假设  $T_{\text{sys}}$  系统噪声主要由银河系主导, 并在其感兴趣的频率范围内约为 1000 K. 若采用带宽  $\Delta\nu = 1$  MHz, 信噪比  $\text{SNR} = 10$ , 积分时间  $t = 2.78$  h, MIST 期望能达到方差  $\sigma = 10$  mK 以探测宇宙黎明谷. REACH 实验表明, 基于更新过的 DSDS Haslam 天空模型<sup>[55]</sup>, 进行 6 阶多项式拟合后的平均天空亮温度残差降到 8 mK<sup>[39]</sup>, 这是 REACH 研究中所有实际评估天线模型的最低值. SARAS 3 实验表明, 在更新天线后系统已经没有超过 1 mK 的剩余额外系统误差<sup>[48]</sup>. 因此, 由 SARAS 3 天线接收并由接收机处理的宇宙信号将出现在测量数据中, 并且在 1 mK 以上不会出现信号的混淆. SCI-HI 实验表明, 实验数据经

过处理后的残差仍高出21 cm信号1–2个数量级, 通过在对数空间进行2阶多项式扣除前景后给出了1 K残差均方根的限值<sup>[49]</sup>. 只有将残差降至21 cm信号以下, 做到精准测量, 才有望探测到宇宙黎明和再电离时期信号, 见表1的均方根列, 可衡量各实验的稳定性.

目前诸多实验中, EDGES是唯一声称观测到宇宙黎明信号结构的实验. 通过使用相对简单但经过精密校准的偶极子天线和辐射计系统<sup>[56–57]</sup>, EDGES实验<sup>[21]</sup>探测到中心频率位于78.1 MHz (红移 $z \approx 17$ , 对应宇宙黎明时期内), 宽约18.7 MHz, 深度约530 mK的宇宙黎明吸收谷. 其红移与早期宇宙恒星发出的21 cm信号预测基本一致.

然而, 这一吸收特征的幅值明显比最乐观模型的预期值<sup>[14, 16, 58]</sup>还要高2–3倍. 此外, 与现有模型不同的是, 该EDGES结果特征是平底的, 而不是类似高斯形的. 对于这一幅值差异结果一种解释是, 宇宙黎明时期的气体温度远低于此前的预测, 并且在现有的宇宙学和粒子物理学标准模型的扩展中, 考虑暗物质和重子相互作用导致的气体冷却可以解释观测到的幅值<sup>[59]</sup>, 还有另一种解释是存在比预期更多的辐射, 例如宇宙黎明时期可能存在额外的宇宙射电背景, 其来源不太可能是普通的恒星形成星系<sup>[60–61]</sup>. 如果EDGES实验的结果被证实, 这种强吸收可能需要远超先前模型的新物理机制.

此外, SRARS 3团队分析其2020年1月至3月获取的55–85 MHz天图数据<sup>[62]</sup>, 若每次只考虑一种由天线总效率、水的热辐射、接收机噪声引起的系统误差, 则经过6阶多项式拟合后的残差RMS均低于1 mK. 与2018年EDGES发表的数据<sup>[21]</sup>对比显示, SARAS 3未能发现如EDGES探测到的宇宙黎明吸收信号, 并认为EDGES结果还不能作为需要引入新天体物理机制或非标准宇宙学模型的充分证据.

### 3.2 空间低频总功率相关实验

EDGES实验探测到了疑似宇宙黎明信号, 但该实验结果与标准宇宙学模型预言有不符之处. 因此, 其他地面射电望远镜如BIGHORNS、SARAS, 在探测宇宙黎明和再电离信号的同时, 也在尝试验证EDGES实验的结果. 然而受限于观测频段范围

(50–200 MHz)内的射频干扰以及地球大气层内电离层的吸收等因素的影响, 地面上实际的观测结果不尽如人意, 很难探测到更高红移特别是来自黑暗时期的中性氢21 cm信号.

因此, 为了探索大爆炸和宇宙演化的历程, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)早前就提出在远离地球的月球背面建设射电天文望远镜的想法, 以减少来自地球射频干扰源的污染. 另一方面, 美国、欧洲空间局之前已经成功发射了太空望远镜如普朗克(Planck)卫星、威尔金森微波各向异性探测器(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, WMAP)、宇宙背景探测者(Cosmic Background Explorer, COBE), 用以探测早期宇宙的微波背景辐射, 并实现了CMB的绘制. 因此只要能解决诸多硬件、软件的技术挑战以及高昂的经费支持, 月球背面将是一个探测宇宙早期中性氢21 cm信号的理想场所.

地球空气和土壤中湿度的变化(改变介电常数)、植被的季节性变化以及温度的变化(天线的伸缩)等都会影响射电天线的波束图, 从而使得提取21 cm信号变得更加复杂. 与位于地球表面或近地轨道的射电望远镜相比, 在月球背面建设超长波长的射电望远镜有巨大的优势. 月球作为天然的物理屏障层, 可以隔离从地球来的射频干扰、地球轨道卫星及月夜期间太阳发出的无线电干扰等影响. 相对于地面射电望远镜, 月球上的射电望远镜预计能获得高两个数量级、灵敏度更高的频谱. 另外, 受限于天空噪声, 月球是内太阳系内唯一可以在低于MHz频率下进行观测的位置. 月球具有天然的地形优势, 月球干燥不变的地形以及月球坑有利于建设类抛物面的射电望远镜. 当然, 即使在月球背面采集数据, 也会不可避免地受到少许由地球产生的射频干扰的影响.

目前, 已有多个实验计划在月球背面建设射电望远镜.

DARE<sup>[63–64]</sup>是由美国NASA提出的探测宇宙黑暗时期的空间望远镜计划, 通过测量全天平均21 cm信号频谱, 以揭示第1代恒星、黑洞和星系形成的过程, 约束宇宙再电离时期模型. 该计划将探

测器发射至月球低空轨道(轨道高度约125 km), 利用月球阻挡来自地球和太阳的电磁干扰, 拥有绝佳的电磁环境, 使得探测灵敏度达到约1 mK, 频率范围40–120 MHz, 频率分辨率10 kHz. DARE实验将搭载两个双锥天线和两个数字接收机, 以便测量全天平均21 cm信号的极化分量. DARE实验的校准和前景去除的方法继承自EDGES实验, 数据分析与信号拟合部分将使用马尔可夫链蒙特卡洛(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)最大似然估计方法, 类似于CMB卫星实验的数据分析方法. DARE探测器预计将具有良好的频谱响应以及稳定可控的系统校准. DARE实验将21 cm信号、不同观测区域的银河系前景太阳低频辐射的干扰和仪器影响等不同的因素用总共73个参数来表征, 最后将使用MCMC方法对这73个参数进行拟合, 最终获得全天平均21 cm中性氢信号. 按计划DARE将于2023年左右发射升空.

DAPPER实验卫星<sup>16</sup>, 计划工作频率范围约为10–110 MHz, 只在射电宁静的月球背面上方采集数据<sup>[65]</sup>. 相对于氢21 cm信号, DAPPER基于前景的3个明显特点进行前景去除, 包括: (1) 21 cm信号变化较快, 而前景主要由同步辐射产生, 其功率谱是缓慢变化的低阶幂律多项式; (2) 银河系前景在天空中具有显著的空间结构, 而宇宙黎明21 cm信号在大尺度( $> 10^\circ$ )上是各向同性的; (3) 除了固有的天空极化外, 前景的空间结构在偶极子天线中引起极化响应, 而均匀的、未极化的21 cm信号仅在斯托克斯 $I$ 参量中产生响应, 4个斯托克斯参数的测量使得21 cm信号与前景清晰分离, 类似CMB分离前景的方法. DAPPER实验卫星设计搭载两种天线, 其中低频天线(约10–45 MHz)为4条可以伸缩的鞭状天线, 最终伸展长度为5–7 m. 高频天线(40–110 MHz)使用一对片状的矩形天线, 模拟结果显示片状天线在40–110 MHz之间的响应随频率的变化较为光滑. DAPPER实验数据分析的一个重要特点是将利用极化信息来分离前景和21 cm中性氢信号, 它同样会使用MCMC方法来拟合观测数据得到21 cm中性氢信号.

FARSIDE<sup>[66]</sup>是同样由NASA资助, 计划在月

球背面开展的实验, 由128对偶极子天线组成, 覆盖月球表面10 km  $\times$  10 km的区域, 计划频率范围为0.1–40 MHz, 频谱分辨率约为28.5 kHz. 计划天线节点与基站或着陆器相连, 基站用于中央数据处理、供电和向中继卫星传输数据. FARSIDE将采用两种方式观测黑暗时期红移后的中性氢21 cm信号: (1) 通过连接到单独偶极子天线的分光仪观测全天总功率信号, 这与通过COBE望远镜精确测量CMB黑体辐射谱的方法类似; (2) 观测21 cm中性氢信号的功率谱, 类似于普朗克卫星和其他观测CMB功率谱的方式. DARE、DAPPER、FARSIDE实验将为建设月球背面的下一代大型射电望远镜铺路.

除了上述提到的空间卫星实验计划, 中国也有自己的空间全天平均总功率实验的设想, 陈学雷等在2005年提出绕月轨道卫星干涉阵的观测计划<sup>[67]</sup>, 后续基于Boonstra等<sup>[68]</sup>于2016年提出DSL (Discovering Sky at Longest wavelength)项目概念, 将观测计划发展为鸿蒙计划<sup>[69]</sup>, 实验计划采用一颗母星和若干子星沿同一绕月轨道排成阵列开展观测. 实验将对30 MHz以下超长波天空进行高分辨率成像, 对30–120 MHz范围进行高精度的全天谱测量.

## 4 总结与展望

宇宙黑暗时期、宇宙黎明和再电离时期标志了宇宙复杂结构的诞生. 然而, 它们目前仍然是一个未被观测到的时期. 黑暗时期没有恒星形成和天体物理机制, 没有高度非线性重子效应的复杂性. 因此, 通过探索宇宙黑暗时期和宇宙黎明时期, 可以用来研究高能粒子产生机制, 探索潜在的新物理理论(例如暗物质衰变、早期暗能量、暗物质重子非引力相互作用等), 对第1代发光天体在早期宇宙中形成的模型参数进行限制, 是对标准宇宙学模型强有力的测试. 它将能够精确测量基础物理学和宇宙学, 包括宇宙的时空曲率以及中微子质量. 探测早期宇宙的黑暗时期、宇宙黎明和再电离时期, 能为宇宙学目前存在的诸多科学问题如“测得的中性氢光谱是否会重新定义标准宇宙学模型并揭示新

<sup>16</sup><https://www.colorado.edu/project/dark-ages-polarimeter-pathfinder/>

的物理学”、“从根本上宇宙是如何运作的”等答疑解惑, 开辟人类认识宇宙的新纪元。

本文主要介绍了目前已有或正在计划中的探测宇宙黎明和再电离时期的低频全天总功率测量实验, 地面射电望远镜如BIGHORNS、EDGES、LACE、LEDA、MIST、REACH、SARAS 3、SCI-HI、PRI<sup>2</sup>M以及空间低频总功率相关实验如DARE、DAPPER、FAR SIDE、鸿蒙计划。

EDGES实验是目前唯一观测到疑似宇宙黎明信号的实验, 但由于其实验结果与标准宇宙学模型有不符之处, 其结果有待证实。另一方面, 来自宇宙黎明和再电离时期( $z$ 约为6–30)的中性氢21 cm信号, 红移后的频率落在50–200 MHz范围内。在这一低频射电波段内, 源于地球的射频干扰源如调频广播、航空通讯、低轨道移动卫星数据通讯系统等产生的信号, 很难与氢21 cm信号区分。鉴于地球上的射电宁静区域越来越少, EDGES等实验指出对21 cm信号的最佳测量可能最终在太空中进行, 例如月球背面或近月轨道上。这样可以利用月球作为屏蔽层来阻挡调频射电信号和其他地面射频干扰源。此外, 还可以避免地球大气层和电离层对氢21 cm信号传播的影响。SKA作为目前最大的综合孔径射电望远镜阵列, 宇宙黎明和再电离时期探测被SKA1列为首要科学目标之一<sup>[70]</sup>。SKA大视场、高分辨率、高灵敏度的优势, 将有望获得宇宙黎明和再电离时期中性氢功率谱并对再电离区域直接成像, 揭示宇宙从黑暗走向光明的奥秘。全天总功率实验的观测结果一方面可以与测量功率谱和直接成像的再电离时期观测实验的结果进行互相验证, 另一方面全天总功率实验对银河系前景的详细观测将有助于后者更好地扣除银河系前景的影响。期望未来在50–200 MHz波段的观测实验中, 能尽早获得宇宙黎明和再电离时期中性氢信号, 揭示宇宙从黑暗走向光明的奥秘。

### 参考文献

- [1] Bromm V, Yoshida N. *ARA&A*, 2011, 49: 373
- [2] Greif T H. *ComAC*, 2015, 2: 3
- [3] Robertson B E, Ellis R S, Furlanetto S R, et al. *ApJ*, 2015, 802: L19
- [4] Patil A H, Yatawatta S, Koopmans L V E, et al. *ApJ*, 2017, 838: 65
- [5] Tingay S J, Goetze R, Bowman J D, et al. *PASA*, 2013, 30: e007
- [6] Taylor G B, Ellingson S W, Kassim N E, et al. *JAI*, 2012, 1: 1250004
- [7] Parsons A R, Backer D C, Foster G S, et al. *AJ*, 2010, 139: 1468
- [8] DeBoer D R, Parsons A R, Aguirre J E, et al. *PASP*, 2017, 129: 045001
- [9] Mellema G, Koopmans L V E, Abdalla F A, et al. *ExA*, 2013, 36: 235
- [10] 赵碧轩, 郑倩, 张泽康, 等. *天文学进展*, 2021, 39: 455
- [11] Barkana R. *PhR*, 2016, 645: 1
- [12] Furlanetto S R, Oh S P, Briggs F H. *PhR*, 2006, 433: 181
- [13] Shaver P A, Windhorst R A, Madau P, et al. *A&A*, 1999, 345: 380
- [14] Cohen A, Fialkov A, Barkana R, et al. *MNRAS*, 2017, 472: 1915
- [15] Morales M F, Wyithe J S B. *ARA&A*, 2010, 48: 127
- [16] Pritchard J R, Loeb A. *PhRvD*, 2010, 82: 023006
- [17] Pritchard J R, Loeb A. *RPPH*, 2012, 75: 086901
- [18] Loeb A, Zaldarriaga M. *PhRvL*, 2004, 92: 211301
- [19] Sobacchi E, Mesinger A. *MNRAS*, 2014, 440: 1662
- [20] Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N, et al. *A&A*, 2016, 594: A13
- [21] Bowman J D, Rogers A E E, Monsalve R A, et al. *Nature*, 2018, 555: 67
- [22] Vedantham H K, Koopmans L V E, de Bruyn A G, et al. *MNRAS*, 2014, 437: 1056
- [23] Datta A, Bradley R, Nhan B D, et al. *Proceedings of 2014 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting*. Boulder: IEEE, 2014: 1
- [24] Sokolowski M, Tremblay S E, Wayth R B, et al. *PASA*, 2015, 32: e004
- [25] Sokolowski M, Wayth R B, Ellement T. *Proceedings of 2016 Radio Frequency Interference*. Socorro: IEEE, 2016: 105
- [26] Datta A, Bradley R, Burns J O, et al. *ApJ*, 2016, 831: 6
- [27] Bowman J D, Rogers A E E, Hewitt J N. *ApJ*, 2008, 676: 1
- [28] Bowman J D, Rogers A E E. *Nature*, 2010, 468: 796
- [29] Monsalve R A, Rogers A E E, Bowman J D, et al. *ApJ*, 2017, 847: 64
- [30] Monsalve R A, Greig B, Bowman J D, et al. *ApJ*, 2018, 863: 11
- [31] Monsalve R A, Fialkov A, Bowman J D, et al. *ApJ*, 2019, 875: 67
- [32] Rogers A E E, Bowman J D. *AJ*, 2008, 136: 641
- [33] Huang Y, Wu X P, Guo Q, et al. *RAA*, 2021, 21: 17

- [34] Price D C, Greenhill L J, Fialkov A, et al. MNRAS, 2018, 478: 4193
- [35] Bernardi G, Zwart J T L, Price D, et al. MNRAS, 2016, 461: 2847
- [36] Restrepo O A, Lucero F I, Molina R, et al. BAAA, 2020, 61C: 65
- [37] de Lera Acedo E. ICEAA, 2019, 0626
- [38] Razavi-Ghods N, Roque I, Handley W. Proceedings of 2021 XXXIVth General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Rome: IEEE, 2021: 1
- [39] Cumner J, De Lera Acedo E, de Villiers D I L, et al. arXiv:2109.10098
- [40] Patra N, Subrahmanyan R, Raghunathan A, et al. ExA, 2013, 36: 319
- [41] Raghunathan A, Shankar N U, Subrahmanyan R. ITAP, 2013, 61: 3411
- [42] Patra N, Subrahmanyan R, Sethi S, et al. ApJ, 2015, 801: 138
- [43] Landecker T L, Wielebinski R. AuJPA, 1970, 16: 1
- [44] Singh S, Subrahmanyan R, Shankar N U, et al. ExA, 2018, 45: 269
- [45] Singh S, Subrahmanyan R, Shankar N U, et al. ApJ, 2017, 845: L12
- [46] Rao M S, Subrahmanyan R, Shankar N U, et al. AJ, 2017, 153: 26
- [47] Singh S, Subrahmanyan R, Shankar N U, et al. ApJ, 2018, 858: 54
- [48] Nambissan T J, Subrahmanyan R, Somashekar R, et al. ExA, 2021, 51: 193
- [49] Voytek T C, Natarajan A, García J M J, et al. ApJ, 2014, 782: L9
- [50] Jáuregui-García J M, Peterson J B, Castillo-Domínguez E, et al. Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNCURSI National Radio Science Meeting. San Diego: IEEE, 2017: 697
- [51] Philip L, Abdurashidova Z, Chiang H C, et al. JAI, 2019, 8: 1950004
- [52] Singh S, Subrahmanyan R, Shankar N U, et al. ApJ, 2015, 815: 88
- [53] McKinley B, Trott C M, Sokolowski M, et al. MNRAS, 2020, 499: 52
- [54] De Oliveira-Costa A, Tegmark M, Gaensler B M, et al. MNRAS, 2008, 388: 247
- [55] Remazeilles M, Dickinson C, Banday A J, et al. MNRAS, 2015, 451: 4311
- [56] Rogers A E E, Bowman J D. RaSc, 2012, 47: RS0K06
- [57] Monsalve R A, Rogers A E E, Bowman J D, et al. ApJ, 2017, 835: 49
- [58] Fialkov A, Barkana R, Visbal E. Nature, 2014, 506: 197
- [59] Barkana R. Nature, 2018, 555: 71
- [60] Pospelov M, Pradler J, Ruderman J T, et al. PhRvL, 2018, 121: 031103
- [61] Dowell J, Taylor G B. ApJ, 2018, 858: L9
- [62] Singh S, Nambissan T, Subrahmanyan R, et al. NatAs, 2022, 6: 607
- [63] Burns J O, Lazio J, Bale S, et al. AdSpR, 2012, 49: 433
- [64] Burns J O, Bradley R, Tauscher K, et al. ApJ, 2017, 844: 33
- [65] Burns J, Bale S, Bradley R, et al. arXiv:2103.05085
- [66] Burns J, Hallinan G, Chang T C, et al. arXiv:2103.08623
- [67] 陈学雷. 关于发展我国空间低频射电天文学的一些设想. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第2届学术年会, 北京, 11月19-20日, 2005
- [68] Boonstra A J, Garrett M, Kruithof G, et al. Proceedings of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2016: 1
- [69] 陈学雷. 科学通报, 2021, 66: 1385
- [70] Koopmans L V E, Pritchard J, Mellema G, et al. arXiv:1505.07568

# Recent Progresses of Low-frequency Experiments to Detect the Global Spectrum of the Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization

ZHANG Xue-ying<sup>1</sup> GUO Quan<sup>1,2</sup> ZHENG Qian<sup>1,2</sup> SHAN Huan-yuan<sup>1,2</sup> HUANG Yan<sup>3</sup>  
GU Jun-hua<sup>3</sup>

(1 *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030*)

(2 *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023*)

(3 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

**ABSTRACT** The detection of Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization is one of the most exciting fields in cosmology. The direct detection of these periods can only rely on the observation of red-shifted 21 cm emission neutral hydrogen signal. One of the three main methods of detection is measuring the global spectrum of 21 cm emission from Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization. Here we review recent progress of existing and planned experiments aiming such detection including ground-based radio experiments such as BIGHORNS, EDGES, LACE, LEDA, MIST, REACH, SARAS 3, SCI-HI, PRI<sup>2</sup>M, and space low-frequency global spectrum experiments such as DARE, DAPPER, FAR SIDE, Hongmeng. Among them, EDGES is the only experiment that claims to have observed a suspected Cosmic Dawn signal. However, the result is inconsistent with the standard cosmological model ( $\Lambda$  Cold Dark Matter,  $\Lambda$ CDM). If the detection is confirmed, it will be the first signal that mankind has detected from Cosmic Dawn, so as to fill the gap in the observation of cosmic evolution.

**Key words** cosmology: observations, radio continuum, detection of Cosmic Dawn and the Epoch of Reionization, global spectrum