中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 10 期: 109502
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica physcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
评 述 环月低频射电天文台(鸿蒙计划)专题

鸿蒙任务基于21 cm全天频谱对宇宙黑暗时代和黎明的探测

徐怡冬[1], 徐成亮[1,2], 温玥炜[1], 夏俊卿[3], 闫业鹏[4], 王国建[5], 邓辅仁[1,2], 张皓然[1,2], 岳斌[1], 吴锋泉[1,2], 陈学雷[1,2*]

1. 射电天文与技术全国重点实验室, 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
3. 北京师范大学, 物理与天文学院, 北京 100875
4. 中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理中心, 北京 100049
5. Department of Physics, Stellenbosch University, Matieland 7602, South Africa
*联系人, E-mail: xuelei@bao.ac.cn

收稿日期: 2026-01-21; 接受日期: 2026-03-11; 网络出版日期: 2026-09-14
太空探源专项(编号: GJ11010405, GJ11010401, GJ11010201)、国家重点研发计划(编号: 2022YFF0504300)、国家自然科学基金(编号: 12361141814, 12273070, 12421003, 12473004)和射电天文与技术全国重点实验室专项基金资助

摘要 探索宇宙黑暗时代和黎明是鸿蒙项目的重要科学目标, 这主要是通过对宇宙黑暗时代和黎明时代中性氢产生的21 cm全天平均频谱(又称21 cm整体谱)进行探测. 利用月球轨道的优越条件, 鸿蒙计划的低频子星和高频子星将分别对0.1–30, 30–120 MHz频段的全天平均谱进行测量, 从而避免电离层、电磁干扰、地面反射等地面实验的常见系统误差. 本文介绍了标准宇宙学模型中宇宙黑暗时代和黎明时代各种物理过程对21 cm全天平均频谱形状的影响, 指出可以根据测得的21 cm全天平均频谱获得关于宇宙演化的重要信息. 同时, 也指出由于不同宇宙模型参数以及前景辐射参数的简并性, 单从21 cm全天平均谱观测数据对宇宙学模型的辨别能力还是有限的, 需综合多种观测手段, 才能获得对宇宙早期演化历史的准确认识.

关键词 21 cm全天平均谱, 宇宙黑暗时代, 宇宙黎明, 鸿蒙计划

PACS: 98.70.Vc, 98.80.-k, 98.80.Es, 07.87.+v, 95.55.Jz

1 研究背景

宇宙的黑暗时代是指宇宙大爆炸后等离子体复合直至第一代发光天体开始形成的时期, 这一时期因缺乏可观测的天体而被称为黑暗时代; 从第一代天体形成并辐射出光子起, 直到它们把宇宙中的星系际介质完全电离的时期, 也即宇宙黎明与再电离时期. 在黑暗时代, 宇宙中的密度扰动是如何增长的? 当时的宇宙演化是否受到暗物质湮灭与衰变或者原初黑洞的影响? 第一代发光天体究竟是哪类天体、何时形成? 它

引用格式: 徐怡冬, 徐成亮, 温玥炜, 等. 鸿蒙任务基于21 cm全天频谱对宇宙黑暗时代和黎明的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 109502
Xu Y, Xu C, Wen Y, et al. Probing the dark ages and cosmic dawn with 21 cm global spectrum in the DSL mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 109502, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0044

© 2026《中国科学》杂志社

们的质量、数目、光度, 以及光谱能量分布是怎样的? 早期星系与今天的星系有什么不同? 星系际介质从什么时候开始被加热? 宇宙的热演化历史是怎样的? 这些问题都有待解答. 在对2020年代天文学的发展评估中, 美国科学院把对黑暗时代的研究列为当前的六大发现领域之一[1].

目前, 已知的对这两个时期最直接而有效的观测手段就是中性氢的21 cm谱线. 21 cm线是氢原子基态的超精细结构能级跃迁产生的谱线, 频率约为1420 MHz, 波长约21.1 cm, 它直接与宇宙中的中性氢分布相联系. 在不同的射电波段观测到的21 cm谱线对应的是来自不同红移处的信号. 由于宇宙中充斥着微波背景辐射光子, 因此取决于该红移处中性氢在两个超精细结构分裂能级上的分布状态, 人们可能观测到超精细结构跃迁产生的发射信号或吸收信号, 其辐射亮温度为[2]

$$T_{21}(z) \approx 0.023\ \mathrm{K} \times x_{HI}(z), \left[\left(\frac{0.15}{\Omega_m}\right)\left(\frac{1+z}{10}\right)\right]^{1/2}\left(\frac{\Omega_b h}{0.02}\right)\left(1-\frac{T_R(z)}{T_S(z)}\right). \quad (1)$$

这里$x_{HI}(z)$为红移z处的中性氢比例, Ω_m为非相对论物质相对密度, Ω_b为重子相对密度, h为约化哈勃常数, T_R为微波背景辐射温度, T_S为中性氢自旋温度. 通过这种观测可以得到星系际介质温度、电离度以及自旋状态, 进而获取宇宙黑暗时代和黎明的演化历史信息, 推断其演化过程, 如图1所示.

由于宇宙的黑暗时代与黎明时代是物质密度扰动从线性演化进入非线性演化的阶段, 是结构形成的起始阶段, 其过程中的诸多特征携带了大量宇宙学信息, 并对后续的结构形成与演化起着关键的作用, 因此需要对黑暗时代及宇宙黎明的观测和探索, 对获取宇宙演化的完整图景、验证宇宙学基本理论、理解宇宙基本物理与结构起源非常重要. 而且, 黑暗时代的宇宙也蕴藏着极其丰富的信息, 该时期的物质分布还基本处于线性演化阶段, 能准确地反映宇宙的原始状态[3], 且具有巨大的共动体积(图2). 根据可观测宇宙的独立模式数目,黑暗时代原则上可提供10^6倍于宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)所能提供的信息量[4]. 通过黑暗时代的成像观测, 可以探索小尺度的原初扰动[5].

根据现有模型, 宇宙黑暗时代和黎明时产生的21 cm谱线, 到今天已经红移到米波甚至百米波波段, 这在地面上难以观测. 地球电离层对低频电波强烈的吸收、反射、折射等效应, 以及地面上大量的地球电磁干扰, 导致在地面对十米波和百米波极为困难, 这一频段迄今都几乎是观测的空白, 因此这种观测还需要在空间进行, 月球背面提供了极为理想的观测条件[6].

不过, 21 cm信号非常微弱, 探测宇宙黑暗时代的21 cm涨落信号需要极高的灵敏度. 考虑到低频的银河系同步辐射等前景辐射强度和所导致的系统温度后, 需要1–100平方千米的接收面积, 才能获得足够的信噪比[7]. 但是, 当前要在月球上建立如此大规模的射电望远镜天线阵列, 其技术和工程难度还是极为巨大的. 因此, 可能仍要相当长的时间, 才能实现宇宙黑暗时代21 cm涨落信号的探测.

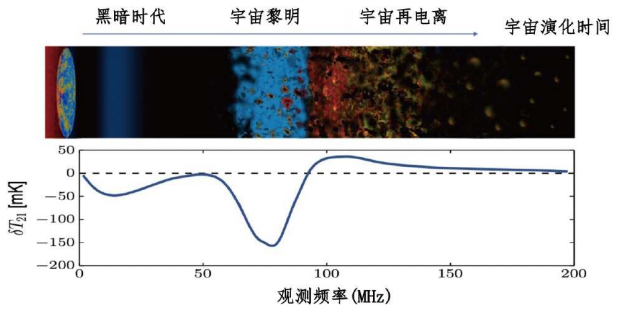


图 1　宇宙黑暗时代和宇宙黎明与再电离时代的演化示意图(上)与对应的21 cm全天平均频谱(下)

Figure 1　The cosmic dark ages and cosmic dawn and epoch of reionization illustration (top) and the corresponding 21 cm spectrum (bottom).

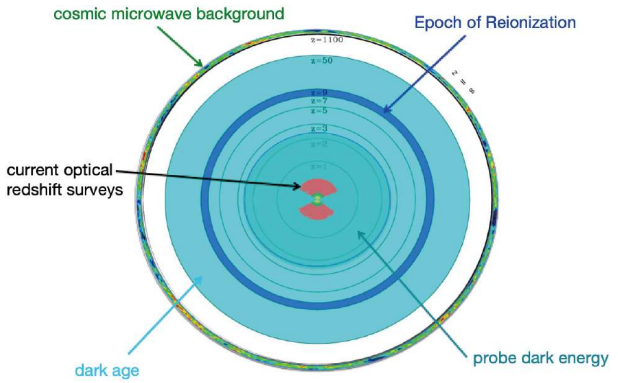


图 2　可观测宇宙共动体积示意图, 其中蓝绿色为可用红移21 cm观测的区域

Figure 2　The comoving volume of the observable Universe. The cyan colored region can be probed by the redshifted 21 cm line.

在目前阶段, 对宇宙黑暗时代和黎明时代的21 cm信号探测比较容易实现的是对全天平均频谱的探测. 所谓全天平均谱, 也叫整体谱(global spectrum), 指的是对全天各个方向辐射的平均频谱. 由于可观测宇宙基本上是均匀各向同性的, 因此每一频率对应一个特定红移, 该频率上对全天各个方向21 cm信号温度的平均, 就给出了这一红移时的平均21 cm辐射温度. 例如, 一个普通的短偶极子天线, 其方向图覆盖了全天的大部分方向, 只在沿天线本身的方向上有零点. 这样天线测得的信号就是以天线方向图为权重的全天平均. 这一测量只用一个宽波束的单天线即可实现, 因此非常适合作为探测宇宙黑暗时代和黎明21 cm信号的第一步[8].

21 cm信号测量的一个巨大困难是, 在这一频段还有许多其他天体也会产生射电辐射, 称为前景辐射, 例如, 银河系中宇宙线电子的同步辐射、星际介质的自由-自由辐射, 河外星系和类星体的辐射等, 尤其是银河系宇宙线电子同步辐射, 其辐射亮温度大致由下式给出,

$$T(\nu) \approx 1440\left(\frac{\nu}{80\ \mathrm{MHz}}\right)^{-2.53}\ \mathrm{K}, \tag{2}$$

这比21 cm信号约高4–5个量级. 所有这些已知的前景信号在频谱上都是光滑的, 相比之下21 cm信号变化更快, 可以根据这一特性将二者区分开来, 如图3所示.

宇宙黑暗时代到黎明的21 cm全天平均频谱取决于原初扰动的强弱、结构形成的快慢、恒星形成的过程、第一代发光天体的特性、各种复杂的反馈机制、气体加热与再电离、辐射转移机制等多种因素的影响, 其频谱有极多的可能性. 因此, 这一21 cm全天平均频谱的形式存在很多可能性, 将其与前景分离并非一件易事. 而另一方面, 从21 cm全天平均频谱中, 人们也有可能提取到许多重要的信息, 为研究宇宙从黑暗时代到黎明及再电离的演化提供了独特的探测手段.

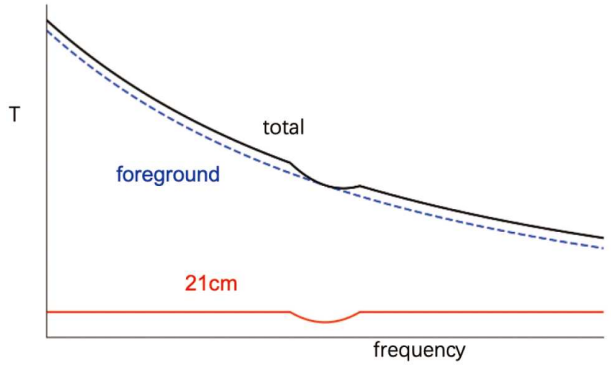


图 3　21 cm信号和前景示意图(未按比例)
Figure 3　An illustration of the foreground and 21 cm signal (not to scale).

除了频率最低的部分, 21 cm全天平均频谱原则上也可以在地面进行测量, 也确实有很多实验开展了这种测量, 如EDGES[9], SARAS[10], SCI-HI[11], MIST[12], BIG-Horn[13], REACH[14]等实验. 其中, EDGES实验组曾声称在80 MHz(对应红移~17)附近探测到了强烈的吸收谱信号[9]. 但是, 这一结果未能得到其他实验的证实, SARAS实验声称他们的实验结果排除了存在这一信号的可能性[10]. 产生这种矛盾的原因可能是系统误差. 几个重要的来自环境的系统误差有可能影响全天平均频谱的测量. 例如, 电离层对不同波长的电磁波折射率不同, 而天空各处的前景亮度不同, 这样其接收到的不同的波长对应的天空也不一样, 导致天空各向异性被调制到频谱上, 形成非光滑频谱[15–17]. 又如, 实验装置下方的土地可能分层, 不同层的介电常数和电导率不一样, 且地下水对地层电导率有巨大影响, 因此这些分层可能产生反射波. 这些反射波与实验装置之间形成的驻波将在接收的总频谱上产生调制. 这些都有可能被误认为是21 cm信号. 因此EDGES测量的结果来自系统误差的可能性是存在的[18]. 此外, 还有各种电磁干扰等. 这些系统误差因素在地面实验中很难完全消除. 因此, 在空间特别是月球背面开展21 cm全天频谱测量具有重要的科学意义.

2　宇宙黑暗时代和黎明的演化历史

中性氢气体吸收或发射21 cm光子的多少, 与其状态分布有关, 这一分布由自旋温度决定, 而自旋温度则又取决于其与宇宙微波背景辐射、气体平动自由度、莱曼光子背景之间的热交换

$$T_S^{-1} = \frac{T_\gamma^{-1} + x_c T_K^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1}}{1 + x_c + x_\alpha}. \tag{3}$$

上式中x_c为碰撞耦合系数, x_α是莱曼α耦合系数, T_γ=2.726(1+z) K是红移z处的CMB温度, T_K是气体的运动学温度, T_α是背景莱曼α光子的色温度, 莱曼α光子在中性氢气体中反复散射, 导致其色温度近似等于气体的运动学温度, T_α=T_K. 因此, 自旋温度就是CMB温度

和气体运动学温度的平均值.

根据标准宇宙学模型理论, 在宇宙黑暗时代, 宇宙黑暗时代开始于复合时期(红移~1100), 但最初气体与背景光子之间仍存在较强的热交换, 中性氢的温度与CMB温度几乎相同, 因此21 cm信号不显著. 此后, 随着宇宙的膨胀, 气体与辐射的热交换不断减弱. 在红移200以下, 重子气体通过绝热冷却, 温度降到宇宙背景辐射的温度以下, 而这时气体密度较高, 碰撞频繁, 在碰撞中气体的自旋与平动自由度可以交换能量, 因此自旋温度接近运动学温度, 也低于CMB温度, 从而对CMB中21 cm波长的光子产生吸收, 产生红移21 cm吸收信号, 在约7–45 MHz频率之间形成了一个随红移(观测频率)变化的吸收谷. 到红移~40时, 随着宇宙密度的降低, 碰撞频次减少, 自旋自由度与平动自由度退耦, 氢原子自旋温度逐渐趋近背景辐射温度, 该吸收信号逐渐减弱. 但当宇宙开始形成第一代恒星和星系、进入黎明时期时(红移~30), 它们产生的Lyα光子背景通过Wouthuysan-Field机制使氢原子自旋温度再次下降, 导致了中心频率约70 MHz附近更强的21 cm吸收信号[19,20]. 此后, 随着气体被恒星、黑洞等辐射的X射线加热, 吸收信号逐渐减弱, 过渡为发射信号. 最后, 紫外光子开始大范围电离星系周围的气体, 最终除星系和高密度气体团块以外的所有氢原子被电离, 再电离过程结束, 21 cm全天平均频谱消失. 可见, 在这一模型中, 21 cm全天平均频谱在对应宇宙黑暗时代的15–20 MHz之间, 以及对应宇宙黎明的70 MHz左右有可能产生吸收谷.

但是, 这些结果取决于很多因素. 例如, 在某些模型中, 黑洞吸积在很早时就产生大量X-射线, 将气体加热到CMB温度以上, 此时只能产生最大约23 mK的发射峰, 而未产生吸收谷. 或者, 虽然产生吸收谷, 但其峰值位置、强度等也可能与上面描述的演化图景不同[21].

如果人们能够探测到上述21 cm全天平均频谱, 就可以据此推断宇宙黎明时代气体的状态是如何演化的, 进而推断第一代发光天体, 如恒星、黑洞等的性质和形成数量[22].

3　鸿蒙任务中的全天平均频谱测量

环月低频射电天文台(鸿蒙任务)拟通过一次火箭发射, 在高度300 km、倾角30°的绕月圆轨道上部署一个由1颗主星、8颗低频干涉成像子星、1颗高频成谱子星组成的微卫星线性编队, 利用月球遮挡实现宁静电磁环境下的高分辨率超长波巡天观测和精密的超长波频谱测量[23–25]. 在该编队中, 8颗子星配备低频干涉成像谱仪, 用于对全天空进行低频段(0.1–30 MHz)干涉成像观测和全天频谱测量; 1颗子星配备高频频谱仪, 用于进行高频段(30–120 MHz)的精密全天频谱测量. 各子星均配备星间通信测距同步系统、星间测角系统, 利用星间数据传输链路实现主星与子星的相对位置测量和时间同步. 主星携带携带定标系统实现对子星的系统标定; 携带相关处理器完成星上数据处理, 并承担与地面站之间的通信和数据传输. 表1列出了低频频谱仪和高频频谱仪的频谱测量参数.

低频子星为四方平板式构形, 表面贴有太阳能电池, 而天线为一对配置在卫星平板两侧的三正交单极子天线, 合在一起构成近似三正交偶极子天线, 如图4所示. 该天线发射时压缩收拢, 进入月球轨道后一次性释放展开. 其中, 每侧单极天线长度2.5 m, 每对天线整体上的性能类似赫兹偶极子. 低频子星天线接收的信

表 1　鸿蒙全天平均谱测量参数

Table 1　Parameters of the DSL global spectrum measurement

参数	低频频谱仪	高频频谱仪
频率范围 (MHz)	0.1–30	30–120
采样率 (Msps)	80	250
傅里叶变换长度	8192	4096
频率分辨率 (kHz)	9.8	61

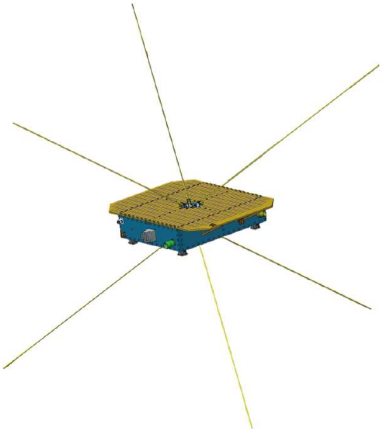


图 4　低频子星, 两侧的三正交单极子天线已展开

Figure 4　Low-frequency daughter satellite, with the pair of tri-pole antennas expanded on the two sides.

号经放大、滤波后转换为数字信号，通过数字快速傅里叶变换和积分得到自相关频谱数据；同时，用数字有限冲击响应滤波器(Finite Impulse Response, FIR)形成多个窄带的电平数据，这些数据由星间通信测距同步系统传输到主星上. 主星对不同子星的窄带电平数据进行互相关和积分，得到干涉可见度数据. 这些干涉可见度数据与各子星的频谱数据均保存在主星上，择机传回地球.

高频子星所观测的30–120 MHz频段，对于宇宙黎明与再电离研究非常重要，在大部分模型中宇宙黎明发生在这一频段所对应的红移范围内. 考虑到这一频段地面已有许多观测设备，此处主要追求极高的频谱测量精度，而不进行干涉成像观测. 天线响应对频率的依赖性(方向图响应色差)会导致高亮度前景的各向异性被调制到频谱上，极易造成虚假21 cm信号，高频子星采用卫星-天线一体化设计，追求极低的天线方向图响应色差，其形状经过多次修改完善，目前采用的设计为圆台上的球锥结构，略似水滴，如图5所示，将其称之为水滴形天线. 其底面贴有太阳能电池，内部则配有极为精密的多种校准源，以实现高精度的频谱测量.

在宇宙黑暗时代、宇宙黎明和宇宙再电离时，都可能产生理论上可测量的21 cm信号. 但是，频率越低，银河系前景辐射越强，要将相同幅度的21 cm信号提取出来也就越困难. 同时，气体被加热后产生的21 cm发射信号容易饱和，可能不如宇宙黎明时期的吸收谱信号强，因此宇宙黎明时期的吸收谱信号或许是最容易被探测到的. 出于这一考虑，鸿蒙高频频谱仪以宇宙黎明时期的21 cm吸收谱为探测目标，同时对宇宙再电离时期也有一定的探测功能，特别是如果系统的观测频段可以进一步向高频拓展就更是如此. 系统的热噪声为

$$T_n = \frac{T_{\rm sys}}{\sqrt{\Delta\nu\ \Delta t}}. \tag{4}$$

这里$\Delta\nu$为观测的频道宽度，Δt为观测时间，$T_{\rm sys}$为系统温度.

$$T_{\rm sys} = T_{\rm sky} + \frac{T_{\rm rx}}{1-|\Gamma|^2}. \tag{5}$$

这里$T_{\rm sky}$是天空温度，而$T_{\rm rx}$是接收机的噪声温度，分母上的$1-|\Gamma|^2$来自天线与接收机间的阻抗失配[26]，Γ为反射系数. 在匹配较好的情况下，系统温度就等于天空温度. 据此，在80 MHz处，对于1 MHz带宽，在10 min的积分时间下热噪声就可以降到0.06 K. 假定每一轨上有30%的时间为月球的遮蔽时间，且其中一半的时间用于观测天空(另一半时间用于校准)，则在一个月的时间里，热噪声即可被压缩到约0.002 K. 因此，对高频频谱仪来说，主要的误差将来自系统误差. 如果能将这一误差尽量缩小，则有较大的可能足以探测到宇宙黎明时期的信号.

相比之下，宇宙黑暗时代的信号探测难度较大. 例如，根据式(2)，在20 MHz处，其天空平均温度是80 MHz处的33.3倍，为了达到相同的噪声温度，所需的观测时间约为80 MHz处的1113倍. 即使考虑到低频有8颗子星，每颗子星有3个天线极化方向(X, Y, Z)，这些都作为独立测量，要达到相同的噪声水平，所需的观测时间仍为80 MHz处的227倍. 因此，低频段的21 cm频谱测量难度很大，在3年观测时间里，其热噪声能被压缩到与信号水平相当的程度.

因此，鸿蒙将主要聚焦探测宇宙黎明与再电离时代的21 cm全天平均频谱[26]，在高频子星内，配置了多种精密的校准机制，以尽可能压低系统误差，确保实现21 cm信号的探测. 而对于宇宙黑暗时代的信号，则主要进行探索性的测量，获取较之前更准确的前景信号频谱. 因此，低频子星在设计上，也尽可能保证有良好



图 5　高频子星
Figure 5　High frequency daughter satellite.

的稳定性, 并选用了方向图色差较小的短偶极子天线, 配置了一些校准机制, 但不过分追求其精度.

高频子星的系统框图如图6所示, 其核心为一个微波开关矩阵. 由卫星外壳整体构成的天线接收的信号, 通过微波开关矩阵传递给模拟接收单元. 这一单元配有三套不同的接收通道(匹配接收通道、高阻接收通道、差分接收通道)进行放大, 微波矩阵可以在三者间进行切换. 经过放大的信号传递给数字采集处理单元, 转换成数字信号并测量其频谱. 这三套不同的接收通道中, 匹配接收通道在中心频率与天线阻抗匹配, 具有较高的灵敏度; 差分接收通道同时测量天线和校准源的差分信号, 实现更大频段范围的精密测量; 高阻接收通道则具有更平滑的响应, 可以精准测量更大频率范围的信号. 这三个通道也可以互为验证和备份. 系统配置有矢量网络与测温单元, 可以测量天线和接收单元在不同频率的反射系数, 从而修正系统内的驻波影响, 同时监测系统内关键点的环境温度, 用于研究其对仪器响应的影响. 系统内还配有校准单元, 内置多种校准源, 如低温和高温负载、开路、短路、长电缆线、主动发射噪声源等, 微波开关矩阵可以切换天线以及这些不同的校准源作为输入, 结合矢量网络单元测量的反射系数, 解算出系统的响应函数和噪声[27]. 通过这些精密的校准机制, 将系统在70–90 MHz内的21 cm频谱测量误差限制在0.1 K以下, 并在更宽的频段范围内也获得较好的21 cm频谱测量灵敏度.

4　简并性和21 cm全天平均谱观测的局限性

尽管21 cm全天平均频谱包含了来自宇宙黑暗时代和宇宙黎明的信息, 但要将这些信息完全提取出来也不是一件容易的事. 通常人们选取一系列参数化的理论模型, 预测其21 cm全天平均频谱, 并与观测数据进行比对, 从而将其参数限制在一定范围之内. 但是, 人们选取的系列模型是否能全面、准确地描述早期宇宙的演化过程还是个问题. 但即便我们的系列模型可以全面准确地反映宇宙早期演化, 在这种分析中, 一些简并性也可能使人们很难完全准确地还原其参数. 模型的简并性部分来自模型中的不同宇宙参数, 例如暗物质和普通物质的密度、原初扰动的幅度、恒星形成的效率、恒星的初始质量函数、恒星电离光子的逃逸率等都会影响最终电离光子的产额. 更严重的是, 还有一些简并性来自前景辐射.

如前所述, 实际测量的全天平均频谱来自21 cm信

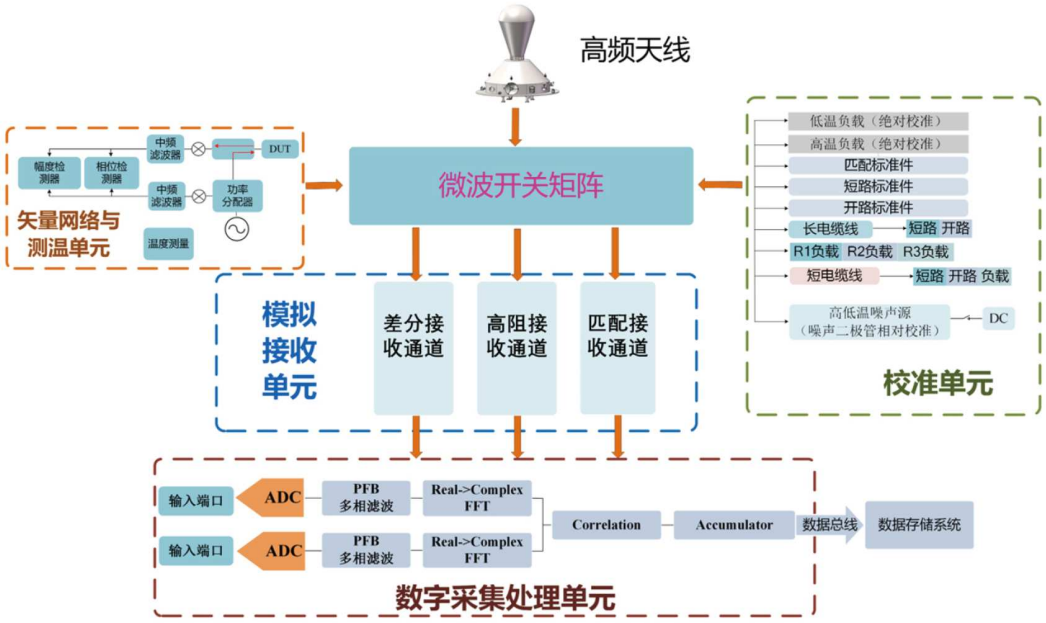


图 6　高频子星的系统框图, 包括其校准机制

Figure 6　The block diagram of the high frequency daughter satellite, including its internal calibration mechanisms.

号和前景的叠加, 而前景的强度远高于21 cm信号. 根据前景的光滑性将其与21 cm信号分离, 这在全天平均频谱探测和三维的21 cm涨落信号探测中都是如此. 但在三维21 cm涨落信号探测中, 沿着一条视线方向, 21 cm信号在较小的频率变化尺度上就有较明显的涨落起伏, 因而更容易被提取出来. 而在全天频谱测量中, 21 cm信号的频谱本身也是渐变的, 虽然不同于前景辐射频谱, 但可利用的特征并不多.

实际上, 前景辐射的频谱也是未知的: 银河系同步辐射前景的频谱物理上取决于宇宙线电子的能谱分布, 此外还有河外射电源、银河系星际介质的自由-自由发射等其他辐射机制, 虽弱于银河系同步辐射前景, 但在考虑微弱的21 cm信号时, 它们对频谱的影响也是很大的[28]. 此外, 星际介质对低频辐射的吸收也会影响频谱的形状[29]. 所有这些微小但不可忽略的影响, 都使人们难以用其他方法完全准确地确定前景辐射频谱. 因此, 只能根据所假定的前景辐射与21 cm信号的不同数学性质, 从观测数据中分离21 cm和前景. 这种分离的结果不唯一, 而是取决于所假定的性质和模型以及分离算法. 在实践中, 一般假定某种参数化的前景模型, 而所得的结果, 也在一定程度上依赖这些模型的参数化形式和参数的先验条件.

以下我们考虑测量实例. 本课题组[29]采用ULSA (Ultra-Long Wavelength Sky Model with Absorption)天空背景模型, 考虑了星际介质自由-自由吸收对低频前景辐射频谱的影响. 采用频率对数多项式(LogPoly)对前景进行拟合与扣除,

$$\log T_F(\nu) = \sum_{n=0}^{n} a_n \left(\log\frac{\nu}{\nu_c}\right)^n, \tag{6}$$

其中, 多项式的阶数n=7, 中心频率ν_c取80 MHz.

本课题组使用半数值模拟产生21 cm信号. 结合本工作的观测频段与信噪特性, 选取以下五个天体物理参数作为主要待约束量:

$\log_{10} f_{*,10}$: 恒星形成效率归一化参数的对数, 定义为在高红移时质量为$10^{10}\ M_\odot$的暗物质晕中气体转化为恒星的比例, 是早期宇宙中刻画恒星形成历史的重要标度因子. 本文在生成模拟的21 cm全天平均频谱时采用的基准值为$f_{*,10}=0.05$, 并允许其在$\log_{10} f_{*,10}\in[-3,0]$范围内变化

α*: 恒星形成效率f_*与暗物质晕质量之间的幂律标度指数, 刻画了不同质量暗晕在恒星形成效率上的系统性差异. 本文采用的基准值为$\alpha_*=0.5$, 并允许其在$\alpha_*\in[-0.5,1]$内变化.

$\log_{10} M_{\rm turn}$, 最小成星晕的质量阈值对数, 用于刻画宇宙中暗晕的特征质量. 低于该质量时, 形成星系的丰度以$\exp(-M_{\rm turn}/M_h)$形式下降. 它反映了暗晕质量对恒星形成活动的抑制效应. 本文采用的基准值为$M_{\rm turn}=5\times10^8 M_\odot$, 并允许$\log_{10}(M_{\rm turn})\in[8,10]$内变化.

t_*: 反映了恒星形成过程的快慢, 即在给定红移下气体被消耗形成恒星的效率, 以哈勃时间$H^{-1}(z)$为度量单位. 本文在生成模拟的21 cm全天平均频谱时采用的基准值为$t_*=0.1$, 并允许其在$t_*\in(0,1]$内变化

$\log_{10} L_{X<2\,\rm keV}/\,\rm SFR$: 每单位恒星形成率产生的软X射线(<2 keV)光度的对数, 影响气体的加热率. 本文假设标准值为$L_{X<2\,\rm keV}/\,\rm SFR=10^{40.5}\,erg\,s^{-1}\,M_\odot^{-1}\,yr$, 并在MCMC分析中允许其在$\log_{10} L_{X<2\,\rm keV}/\,\rm SFR\in[38,42]$的范围内变化.

目前最常用的半数值模拟是21 cm FAST[30,31], 但为了更便于快速估算大量模型, 本课题组使用了基于Planck 2020数据的ΛCDM宇宙学模型训练的仿真器(emulator) 21 cm EMU[32]. 在贝叶斯框架下对时间平均的21 cm全天平均频谱进行参数反演, 同时限制前景多项式的7个参数和中性氢的全天频谱信号. 基于所得的参数后验分布, 进一步推导出前景信号的拟合范围, 以及预期可恢复的全天频谱信号区间.

图7显示了部分拟合结果, 包括输入前景(上图)和残差(下图). 在该图中也加入了改变多项式前景模型最低阶系数±0.05%后的结果. 从图中可见, 尽管整体拟合良好, 但由于前景和21 cm信号幅度上的巨大差异, 只要前景拟合参数稍有变化, 残差谱的形态与幅度即会发生显著变化, 从而导致恢复的21 cm全天平均频谱出现系统性差异.

图8展示了不同观测时间下预期可恢复的全天频谱. 结果表明, 在1000轨道的有效积分时间下, 在上述最大吸收谷频率处可实现1σ精度约5 mK的参数约束. 但是可以看到, 尽管对于1000轨的测量精度, 还原信号输入的频谱位于最佳拟合处, 但如果误差更大, 例如对于100轨或10轨的情况, 则拟合很可能偏离真

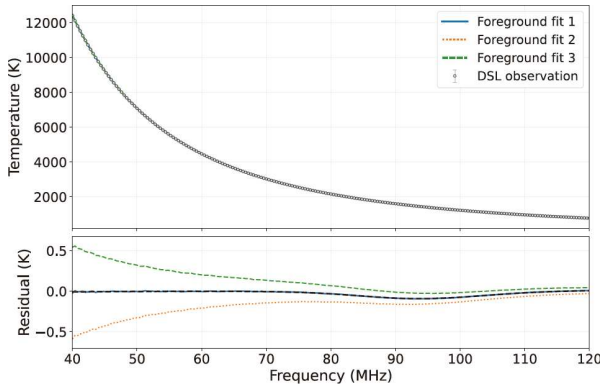


图 7　上图为模拟的全天平均频谱及其七阶对数多项式(Log-Poly 7)拟合曲线; 下图为对应残差谱, 虚线为基准模型. 这里的曲线显示了最佳拟合, 以及前景参数发生微小偏差时的情况

Figure 7　Top panel: simulated global spectrum and its Log-Poly 7 fitting curve. Bottom: residues, dashed curve shows the input model, and the other curves show the result of slight deviation in the foreground model.

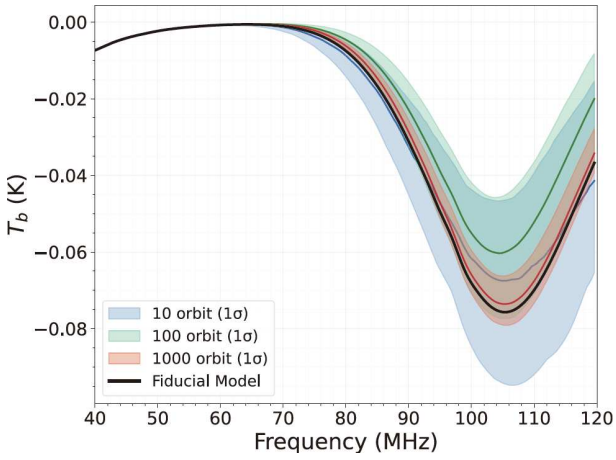


图 8　模型中的21 cm全天平均频谱(黑线), 及在10/100/1000轨后还原信号的范围和拟合值(相应颜色线)(徐成亮等人, 准备中)

Figure 8　The model 21 cm line (black curve) and the reconstructed signal range after 10/100/1000 orbits (Chengliang Xu et al., in preparation).

实值.

图9给出了对相应的、影响21 cm信号演化的上述5个天体物理参数的限制. 在仅考虑21 cm全天平均频谱(DSL, 1000轨)的情况下, 对某些参数的限制是比较好的, 但对于另一些参数则不太好. 另一方面, 可以看到单纯的21 cm的3D功率谱, 例如HERA的结果, 对这些参数的限制往往也不太好, 而21 cm全天平均频谱与之相结合, 可以给出更好的限制.

这些模拟结果表明, 即便测量本身无偏, 由于前景模型参数与21 cm信号参数之间, 以及21 cm信号内部各物理参数之间均存在显著简并性, 因此在存在观测误差的情况下, 恢复的频谱存在一定误差. 当然, 如果观测误差很小, 那么利用频谱的精细结构, 可以打破这种简并, 获得较为精准的参数估计. 但是, 实际上观测引起的误差多少总是存在的. 在本文中, 作为例子, 考虑了10, 100和1000轨下的热噪声, 这种噪声随着积分时间的增长被逐渐压低. 但另一方面, 本工作仍仅考虑了较理想的系统响应, 在实际观测中, 还可能有其他系统误差, 例如天线与接收机的校准误差[33], 从而导致更大的恢复误差.

简并性主要来源于信号和前景中非正交的部分. 例如, 若两个不同的21 cm信号中与前景平行的分量恰好是一致的, 那么基于最大似然函数的模型重建方法便都无法有效地对二者进行区分, 导致重建信号及推断的前景参数结果中均存在显著不确定性. 文献中规避此类简并性的思路之一是只考虑信号中与前景正交的部分, 比如正交高斯过程的方法[34], 仅重建21 cm信号中与前景正交的分量. 尽管无法恢复完整信号, 但被有效约束的正交分量仍可用于检验模型, 不过, 不同建模会给信号的重建带来一些偏差[35].

若需重建完整的21 cm全天平均频谱, 则需在数个与数据拟合良好的模型中甄别出更可能的一个. 对模型的判断基于一个基本原则: 越复杂、参数越多的21 cm全天平均频谱模型越有可能过拟合, 而越简单的模型则更可能是准确的, 这一原则可以通过贝叶斯证据来进行量化. 此破除简并性的方法要求21 cm全天平均频谱参数化具备充分的灵活性, 而非局限于预设函数形式. 代表性的方法如FlexKnot采用分段插值的方式来为信号建模, 通过可变数目的节点(knot)划分频谱区间, 并在相邻节点间利用多项式插值. 此类方法的优势在于虽然是参数化的, 但并不依赖于某个具体的理论模型或信号形状[34]. 因此, 通过改进拟合方法可以尽量减少简并性的影响.

5　深度学习方法的应用

近年来, 深度学习技术取得了突破性进展. 通过构建深层非线性网络, 深度学习能够高效表征输入数据

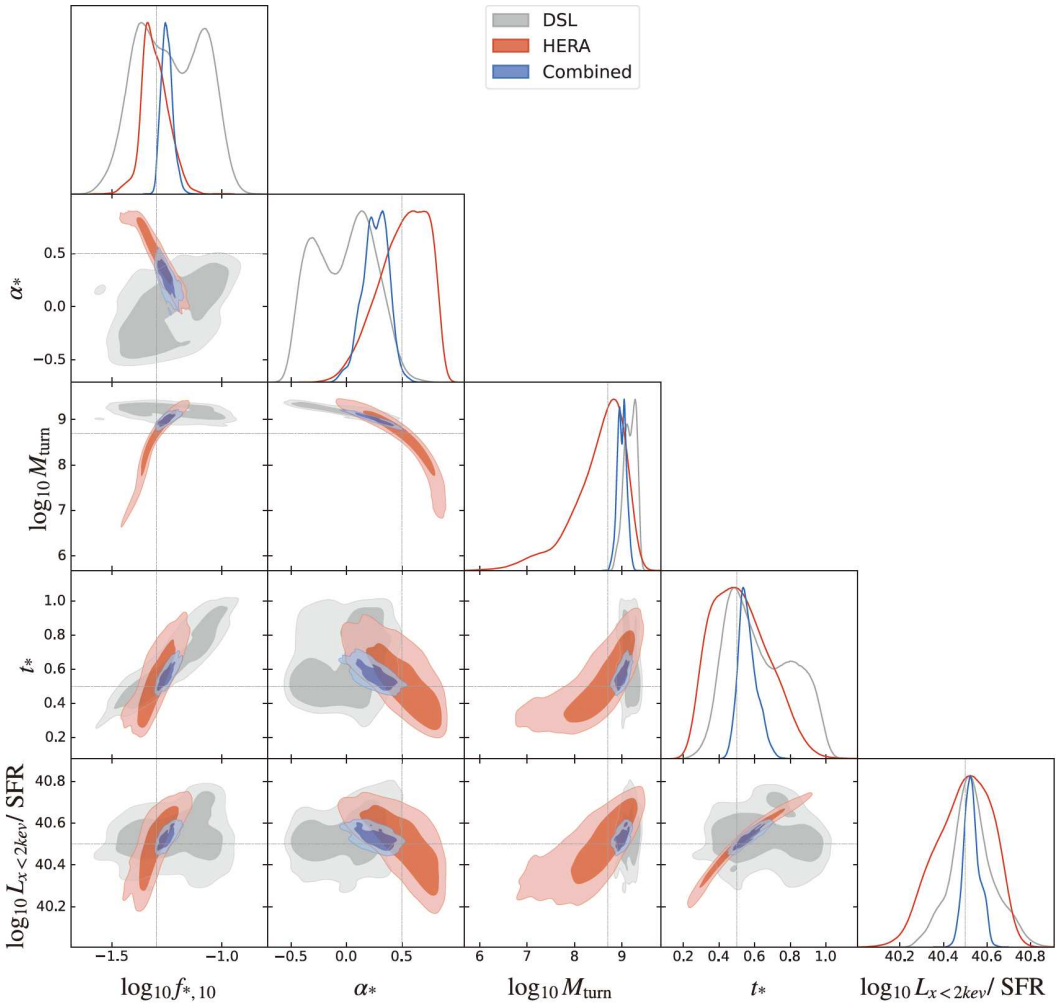


图 9　基于后验分布对物理模型五个参数的约束结果(徐成亮等人, 准备中)
Figure 9　Posterior Distribution for the five parameters in the physical model (Chengliang Xu et al., in preparation).

的复杂结构, 实现高维函数的精确逼近, 并具备从原始观测数据中提取关键物理特征的能力. 在21 cm全天平均频谱的研究中, 人工神经网络(Artificial Neural Networks, ANNs)已被证明是一种高效的参数估计方法[36–39]. ANNs通过建立输入(观测数据)与输出(天体物理参数)之间的非线性映射关系, 能够从数据中提取关键特征, 无需依赖人工设计的特征提取方法.

与贝叶斯推断方法不同, ANNs无需显式定义参数的先验分布, 也不需要计算似然函数. 通过数据驱动的训练, ANNs直接学习观测数据与模型参数之间的映射关系. 从计算效率的角度来看, ANNs避免了传统方法中频繁计算似然函数所带来的高昂计算成本. 特别是在高维参数空间的优化问题中, ANNs展现出良好的计算性能, 这一优势使得ANNs特别适用于现代宇宙学中涉及复杂参数空间的信号建模问题[40–42].

在本研究中, 本课题组使用21 cm EMU生成21 cm全天平均谱. 前景成分的模拟则采用频率对数多项式模型(如式(6)所示). 热噪声水平根据式(4)计算, 考虑观测时间为500 h. 在此基础上, 本研究使用了基于神经密度估计器的无似然推理框架CoLFI[43]进行参数估计, 采用了一个包含三个隐层的全连接网络对参数进行估计, 其输入为21 cm全天平均频谱, 输出为待估计的天体物理参数及前景模型参数. 模型采用Softplus激活函数以实现非线性变换. CoLFI采用迭代式“训练-估计”流程, 不断优化网络模型参数, 直至收敛于参数真实的约束结果. 图10展示了基于该网络模型的参数估

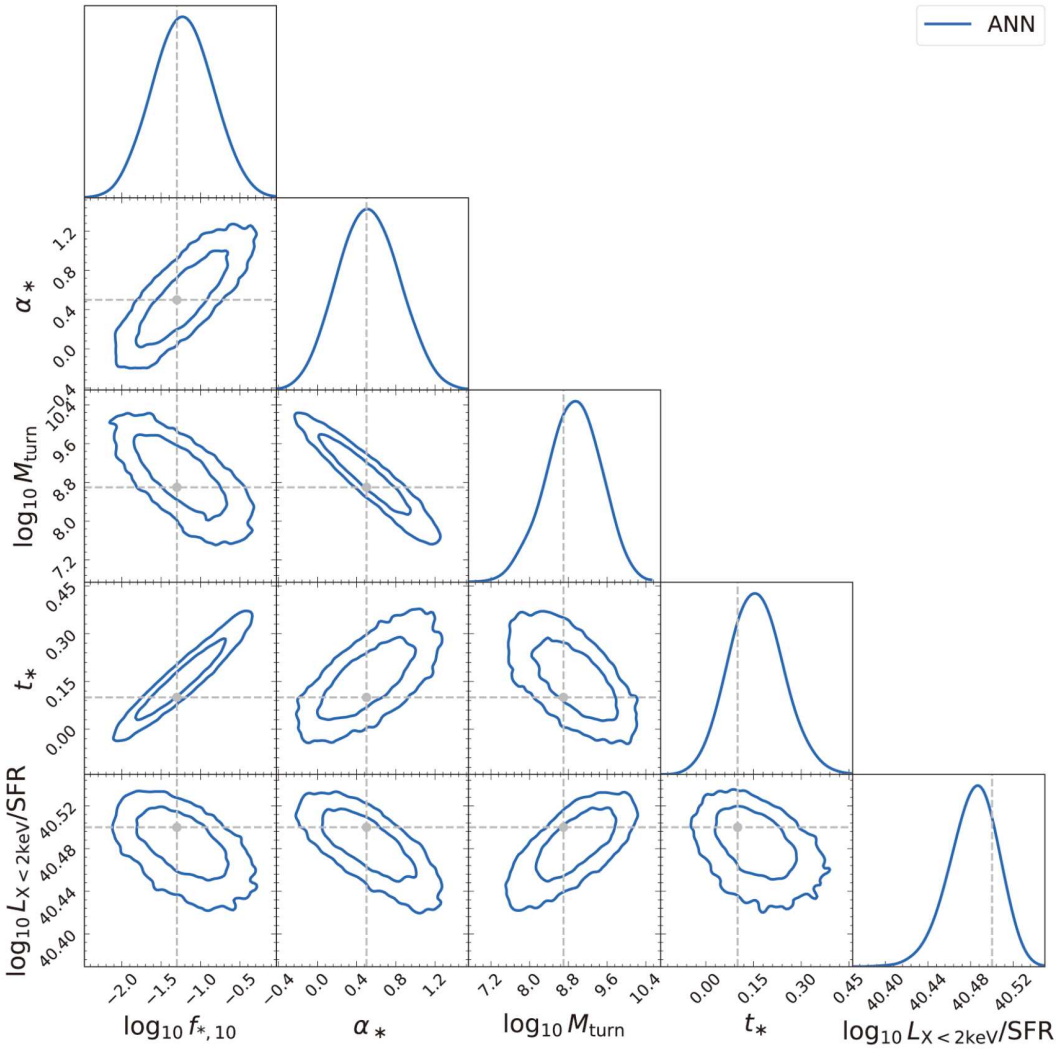


图 10　基于ANNs方法对五个天体物理模型参数的约束结果, 其中分别以1σ (68.3%置信水平)和2σ (95.4%置信水平)的等高线标注

Figure 10　Constraints on five astrophysical model parameters derived using the ANNs. The contours denote the 1σ (68.3% confidence level) and 2σ (95.4% confidence level) regions.

计结果, 包括参数的一维边缘分布和二维联合置信区间的形式. 从统计结果来看, 模型对天体物理参数的估计表现出良好的无偏性, 其均值与真实参数值一致. 表明了ANNs方法能够有效地约束这些天体物理参数. 然而, 值得注意的是, 这里只考虑了热噪声, 模拟数据相对简单, 如果要用于真实的观测数据, 需要考虑的因素会很多, 这需要在后续研究中进一步分析和改进.

ANNs方法的优势在于能够直接从观测数据中提取21 cm全天平均频谱并拟合天体物理学模型参数, 而无需依赖传统的前景扣除步骤. 图10中的结果表明, ANN方法能够有效地提取21 cm全天平均谱信号. 值得注意的是, 深度学习方法本质上依赖于训练数据所基于的物理模型. 若训练数据仅由单一前景模型生成, 则网络的泛化能力可能受到限制. 为了缓解这一模型依赖性, 一种有效的策略是在训练数据中引入多样化的前景模型, 以提高网络对不同物理场景的适应能力. 未来研究可进一步探索混合物理模型训练、数据增强以及迁移学习等方法, 以增强深度学习模型在21 cm信号分析中的鲁棒性.

6　讨论和结论

如前所述，鸿蒙任务将在月球轨道上开展全天频谱测量，不受电离层吸收和折射的影响. 月球可以遮挡来自地球的干扰，因此在月球背面开展的观测也可以在很大程度上避开各种电磁干扰. 同时，由于月球轨道有一定高度，受月面反射的影响也比较小. 因此，这一测量可以摆脱很多地面实验中容易引起系统误差的因素，从而实现更高的测量精度. 实际上，利用月球背面或月球轨道开展这一研究所具有的优势十分明显，因此国际上也已出现了很多月球背面和月球轨道的实验设想.

在表2中，列出了一些相关的全天谱测量实验设想，以及其所覆盖的频段. 这些全天谱实验所覆盖的频率范围各有不同，但与鸿蒙实验大致相当. 不过，这些实验除LUSEE-night外，绝大部分还处在概念研究阶段，并未完全定型，有些还只是一些初步的设想.

鸿蒙实验在宇宙黎明对应的观测频段，经过较短时间的积分后，热噪声引起的误差就降到可以忽略不计的程度. 如果系统的设计可以克服其他误差，例如天线色差引起的误差，并能够准确减除前景辐射的影响，那么该实验就可以比较精确地给出宇宙黎明与再电离时期的21 cm全天平均频谱[51]. 对于频率更低的宇宙黑暗时代，由于前景辐射引起更大的噪声，其精确测量将具有更大的挑战性，但鸿蒙任务也将显著提升对这一频段全天频谱的测量精度[52].

表 2　一些国外空间全天谱测量实验设想

Table 2　Some space-borne global spectrum experiment ideas

实验名称/国家	部署方式/文献	全天平均谱实验频率范围 (MHz)
DARE(美国)	月球轨道[44]	40–120
DAPPER(美国)	月球轨道[45]	17–38
LUSEE-night(美国)	月球背面[46]	0.5–50
FARSIDE(美国)	月球背面[45]	0.1–40
ALO(欧洲)	月球背面[47]	18–80
CosmoCube(英国)	月球轨道[48]	10–100
月读Tsukuyomi(日本)	月球表面[49]	1–50
PRATUSH(印度)	月球轨道[50]	40–200

精确测量的21 cm全天平均频谱将给人们研究宇宙从黑暗时代到黎明和再电离的演化提供极为宝贵的信息. 但是，许多不同的宇宙学参数都会影响21 cm全天平均频谱的形状，而且21 cm信号与前景信号之间还存在一定的简并性，因此仅从21 cm全天平均频谱推测宇宙的演化历史，其不确定性还是比较大的. 因此，应该结合其他观测，如21 cm三维功率谱以及光学/红外观测、宇宙微波背景辐射、极贫金属恒星等间接观测，探索宇宙早期演化过程.

参考文献

1　National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. Washington DC: The National Academies Press, 2021

2　Madau P, Meiksin A, Rees M J. 21 centimeter tomography of the intergalactic medium at high redshift. Astrophys J, 1997, 475: 429–444

3　Lewis A, Challinor A. 21 cm angular-power spectrum from the dark ages. Phys Rev D, 2007, 76: 083005

4　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

5　Morabito L K, Silk J. Reaching small scales with low-frequency imaging: Applications to the dark ages. Phil Trans R Soc A, 2021, 379: 20190571

6　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

7　Koopmans L V E, Barkana R, Bentum M, et al. Peering into the dark (ages) with low-frequency space interferometers. Exp Astron, 2021, 51: 1641–1676

8　Shaver P A, Windhorst R A, Madau P, et al. Can the reionization epoch be detected as a global signature in the cosmic background? Astron Astrophys, 1999, 345: 380

9　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

10 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

11 Voytek T C, Natarajan A, Jáuregui García J M, et al. Probing the dark ages at z~20: The SCI-HI 21 cm all-sky spectrum experiment. Astrophys J, 2014, 782: L9

12 Monsalve R A, Altamirano C, Bidula V, et al. Mapper of the IGM spin temperature: Instrument overview. Mon Not R Astron Soc, 2024, 530: 4125–4147

13 Sokolowski M, Tremblay S E, Wayth R B, et al. BIGHORNS-Broadband instrument for global HydrOgen ReioNisation signal. Publ Astron Soc Aust, 2015, 32: e004

14 de Lera Acedo E, de Villiers D I L, Razavi-Ghods N, et al. The REACH radiometer for detecting the 21-cm hydrogen signal from redshift $z \approx$ 7.5–28. Nat Astron, 2022, 6: 984–998

15 Vedantham H K, Koopmans L V E. Scintillation noise power spectrum and its impact on high-redshift 21-cm observations. Mon Not R Astron Soc, 2016, 458: 3099–3117

16 Shen E, Anstey D, de Lera Acedo E, et al. Quantifying ionospheric effects on global 21-cm observations. Mon Not R Astron Soc, 2021, 503: 344–353

17 Wang Y, Wang X, Sun S, et al. Tackling the challenges in the 21 cm global spectrum experiment: The impact of ionosphere and beam distortion. Astrophys J, 2024, 967: 87

18 Bradley R F, Tauscher K, Rapetti D, et al. A ground plane artifact that induces an absorption profile in averaged spectra from global 21 cm measurements, with possible application to EDGES. Astrophys J, 2019, 874: 153

19 Chen X, Miralda-Escude J. The spin-kinetic temperature coupling and the heating rate due to Lyα scattering before reionization: Predictions for 21 centimeter emission and absorption. Astrophys J, 2004, 602: 1–11

20 Chen X, Miralda-Escudé J. The 21 cm signature of the first stars. Astrophys J, 2008, 684: 18–33

21 Cohen A, Fialkov A, Barkana R, et al. Charting the parameter space of the global 21-cm signal. Mon Not R Astron Soc, 2017, 472: 1915–1931

22 Gessey-Jones T, Sartorio N S, Bevins H T J, et al. Determination of the mass distribution of the first stars from the 21-cm signal. Nat Astron, 2025, 9: 1268–1279

23 Chen X L, Burns J, Koopmans L, et al., Discovering the sky at the longest wavelengths with small satellite constellations. arXiv: 2019, 1907.10853

24 Chen X L, Yan J Y, Deng L, et al. Discovering the sky at the longest wavelengths with a lunar orbit array. Phil Trans R Soc A, 2021, 379: 20190566

25 Chen X L, Yan J Y, Xu Y D, et al. Discovering the sky at the longest wavelength mission—a pathfinder for exploring the cosmic dark ages (in Chinese). Chin J Space Sci, 2023, 43: 43 [陈学雷, 阎敬业, 徐怡冬, 等. 宇宙黑暗时代探路者——鸿蒙计划. 空间科学学报, 2023, 43: 43]

26 Shi Y, Deng F, Xu Y, et al. Lunar orbit measurement of the cosmic dawn's 21 cm global spectrum. Astrophys J, 2022, 929: 32

27 Wu F Q, Xu J Q, Zhu J C, et al. Progress of cosmic dawn global spectrum experiments (in Chinese). Chin J Radio Sci, 2024, 39: 589–594 [吴锋泉, 许嘉钦, 朱嘉聪, 等. 宇宙黎明全天频谱实验研究进展. 电波科学学报, 2024, 39: 589–594]

28 Mittal S, Kulkarni G, Anstey D, et al. Impact of extragalactic point sources on the low-frequency sky spectrum and cosmic dawn global 21-cm measurements. Mon Not R Astron Soc, 2024, 534: 1317–1328

29 Cong Y, Yue B, Xu Y, et al. An ultralong-wavelength sky model with absorption effect. Astrophys J, 2021, 914: 128

30 Mesinger A, Furlanetto S, Cen R. 21 cmfast: A fast, seminumerical simulation of the high-redshift 21-cm signal. Mon Not R Astron Soc, 2011, 411: 955–972

31 Murray S, Greig B, Mesinger A, et al. 21cmFAST v3: A Python-integrated C code for generating 3D realizations of the cosmic 21cm signal. J Open Source Softw, 2020, 5: 2582

32 Breitman D, Mesinger A, Murray S G, et al. 21 cm EMU: An emulator of 21 cm fast summary observables. Mon Not R Astron Soc, 2023, 527: 9833–9852

33 Sun S, de Lera Acedo E, Wu F, et al. Calibration error in 21-centimeter global spectrum experiment. Universe, 2024, 10: 236

34 Heimersheim S, Rønneberg L, Linton H, et al. FlexKnot and Gaussian Process for 21 cm global signal analysis and foreground separation. Mon Not R Astron Soc, 2023, 527: 11404–11421

35 Hibbard J J, Rapetti D, Burns J O, et al. Fitting and comparing galactic foreground models for unbiased 21 cm cosmology. Astrophys J, 2023, 959: 103

36 Choudhury M, Datta A, Chakraborty A. Extracting the 21 cm global signal using artificial neural networks. Mon Not R Astron Soc, 2019, 491: 4031–4044

37 Choudhury M, Chatterjee A, Datta A, et al. Using artificial neural networks to extract the 21-cm global signal from the EDGES data. Mon Not R Astron Soc, 2021, 502: 2815–2825

38 Tripathi A, Datta A, Choudhury M, et al. Extracting the global 21-cm signal from cosmic dawn and epoch of reionization in the presence of foreground and ionosphere. Mon Not R Astron Soc, 2024, 528: 1945–1964

39 Mohapatra V, Johnny J, Natwariya P K, et al. In search of global 21-cm signal using artificial neural network in light of ARCADE 2. Eur Phys J C, 2025, 85: 533

40 Shimabukuro H, Semelin B. Analysing the 21 cm signal from the epoch of reionization with artificial neural networks. Mon Not R Astron Soc, 2017, 468: 3869–3877

41 Jennings W D, Watkinson C A, Abdalla F B, et al. Evaluating machine learning techniques for predicting power spectra from reionization simulations. Mon Not R Astron Soc, 2019, 483: 2907–2922

42 Zhao X, Mao Y, Wandelt B D. Implicit likelihood inference of reionization parameters from the 21 cm power spectrum. Astrophys J, 2022, 933: 236

43 Wang G J, Cheng C, Ma Y Z, et al. CoLFI: Cosmological likelihood-free inference with neural density estimators. Astrophys J Suppl Ser, 2023, 268: 7

44 Burns J O, Lazio J, Bale S, et al. Probing the first stars and black holes in the early Universe with the dark ages radio explorer (DARE). Adv Space Res, 2012, 49: 433–450

45 Burns J O. Transformative science from the lunar farside: Observations of the dark ages and exoplanetary systems at low radio frequencies. Phil Trans R Soc A, 2021, 379: 20190564

46 Bale S D, Bassett N, Burns J O, et al. LuSEE 'Night': The lunar surface electromagnetics experiment. arXiv, 2023, 2301.10345

47 ESA CDF Study Team. Astrophysical lunar observatory. ESA CDF Study Report, 2021, CDF-219(A)

48 Artuc K, de Lera Acedo E. The spectrometer development of CosmoCube, lunar orbiting satellite to detect 21-cm hydrogen signal from cosmic dark ages. RAS Tech Instrum, 2025, 4: rzae061

49 Iguchi S, Yamada T, Yamasaki Y, et al., Lunar meter-wave telescope (TSUKUYOMI) as one of Japanese lunar plans. Proc SPIE, 2024, 13092: 130922M

50 Sathyanarayana Rao M, Singh S, Srivani K S, et al. PRATUSH experiment concept and design overview. Exp Astron, 2023, 56: 741–778

51 Li H, Deng F, Zhou M, et al. Robust extraction of global 21 cm spectrum from experiments with a chromatic beam based on physics-motivated error modeling. Astrophys J, 2026, 997: 4

52 Ao Q, Deng F, Xu Y, et al. Reconstructing the anisotropic ultralong wavelength spectra using a single antenna on lunar orbit. Astrophys J, 2025, 994: 226

Probing the dark ages and cosmic dawn with 21 cm global spectrum in the DSL mission

XU Yidong[1], XU Chengliang[1,2], WEN Yuewei[1], XIA Junqing[3], YAN Yepeng[4], WANG Guojian[5], DENG Furen[1,2], ZHANG Haoran[1,2], YUE Bin[1], WU Fengquan[1,2] & CHEN Xuelei[1,2*]

[1] *State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology, 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, China*
[3] *School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*
[4] *Center of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*
[5] *Department of Physics, Stellenbosch University, Matieland 7602, South Africa*
**Corresponding author (email: xuelei@bao.ac.cn)*

Exploring the cosmic dark ages and cosmic dawn is a key scientific objective of the Hongmeng (DSL) Project. This will be achieved primarily through the detection of the all-sky averaged spectrum (also known as the global 21 cm spectrum) generated by neutral hydrogen during these cosmic epochs. Leveraging the advantageous conditions of lunar orbit, the low-frequency and high-frequency satellites of the Hongmeng mission will measure the all-sky averaged spectrum in the 0.1–30 and 30–120 MHz bands, respectively. This approach avoids common systematic errors inherent in ground-based experiments, such as ionospheric interference, radio frequency interference (RFI), and ground reflections. This paper describes the influence of various physical processes during the cosmic dark ages and cosmic dawn within the standard cosmological model on the shape of the 21 cm spectrum. It points out that important information about cosmic evolution can be derived from the measured global 21 cm spectrum. Simultaneously, it also highlights that due to the degeneracy among different cosmological model parameters and foreground radiation parameters, the ability to distinguish between cosmological models based *solely* on global 21 cm spectrum observation data remains limited. An integrated approach combining multiple observational methods is necessary to gain an accurate understanding of the early evolutionary history of the Universe.

21 cm global spectrum, cosmic dark ages, cosmic dawn, Hongmeng mission (DSL mission)

PACS: 98.70.Vc, 98.80.-k, 98.80.Es, 07.87.+v, 95.55.Jz

doi: 10.1360/SSPMA-2026-0044