中国科学: 物理学 力学 天文学 2026 年 第 56 卷 第 10 期: 109513
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

超长波太阳射电III型暴研究

谭宝林[1,2*], 黄静[1,2], 陈星瑶[3], 陈玲[4], 孔祥良[5], 张印[1], 谭程明[3]

1. 中国科学院国家天文台太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100101
2. 中国科学院大学天文学与空间科学学院, 北京 100086
3. 中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室, 北京 100190
4. 中国科学院紫金山天文台行星科学重点实验室, 南京 210023
5. 山东大学(威海)空间科学研究所空间科学与物理学院, 威海 264209
*联系人, E-mail: bltan@nao.cas.cn

收稿日期: 2026-01-09; 接受日期: 2026-02-14; 网络出版日期: 2026-08-11
国家重点基础研究发展计划(编号: 2021YFA1600503, 2022YFF0503001, 2022YFF0503800)、国家自然科学基金(编号: 12173050)、中国科学院先导B资助项目(编号: XDB0560000)、国际子午圈合作项目(编号: 183311KYSB20200003)、中国子午圈计划和太空探源专项(编号: GJ11010405)资助

摘要 太阳射电III型暴是非热高能粒子沿从日冕到行星际空间传播时与局地等离子体作用产生的相干辐射, 它是太阳非热高能粒子流的直接响应, 也是行星际和近地空间环境扰动的重要探针. 太阳射电III型暴的频率范围非常宽, 从10 GHz以上的厘米波段一直延伸到100 kHz以下的千米波段. 现有观测尚存局限, 空间观测一直在19 MHz以下, 时间和频率分辨率有限. 尽管地面观测可以从10 MHz往上直到超过10 GHz, 但是由于存在来自地球大气中诸如闪电等信号和各种人工信号的干扰, 很难获得干净完整的动态频谱. 鸿蒙计划将在0.1–30 MHz频段利用月轨超长波干涉阵列获得动态频谱和准成像观测, 并在30–120 MHz频段活动宽带动态频谱. 该系列观测覆盖了从低日冕到行星际空间和近地空间的广大空间范围, 并且设置了在月球背面观测, 极大地降低了来自地球方向各种天然和人工信号的干扰, 有望获得干净的宽带动态射电频谱. 本文首先讨论了太阳射电III型暴最近的研究动态和存在的问题, 然后讨论了鸿蒙计划基于月基超长波段干涉阵列的动态频谱和准成像观测将在太阳射电III型暴的一系列重要问题的研究中取得新的进展, 包括内在精细结构、起始频率、准周期性、无耀斑III型暴的起源、非热高能粒子束流的传播以及它们对近地空间环境的作用和影响. 这些结果不仅能帮助我们更好地理解太阳活动机理, 同时也能为空间物理和灾害性空间天气预报提供重要的观测证据.

关键词 太阳活动, 高能粒子, 空间天气, 太阳III型射电暴, 超长波射电辐射

PACS: 96.60.Q-, 96.50.Vg, 94.05.sd

1 引言

研究表明, 太阳几乎是所有主序星中最不活跃的一个, 即使是等级最高的X级耀斑爆发, 所释放的能量也不足宁静太阳辐射功率的千分之一[1,2]. 在前望远镜时代, 千百年来人类都没有察觉到这些爆发现象的存

引用格式: 谭宝林, 黄静, 陈星瑶, 等. 超长波太阳射电III型暴研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026, 56: 109513
Tan B L, Huang J, Chen X Y, et al. Study on ultra-long wavelength solar radio type-III bursts (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026, 56: 109513, doi: 10.1360/SSPMA-2026-0012

© 2026《中国科学》杂志社

在. 然而, 随着人类科技进步、探测手段和技术的不断更新迭代, 我们发现, 那些曾经毫不起眼的太阳活动, 正越来越多地影响着我们的世界.

太阳活动纷繁复杂, 其起源、爆发机理、发生规律至今仍是太阳物理, 乃至天体物理中的重要课题.

各类太阳活动对太阳大气、行星际空间和近地环境的相互作用和扰动机理, 是当今高科技社会高度关注的重大问题[2–4]. 各种高技术系统的稳定运行, 包括卫星定位与导航、交通和通讯、大电网和输油管网的安全运行、互联网及物流网、航空航天、深空探测等, 给我们的生活带来质的飞跃的同时, 在太阳活动的冲击面前却变得极其脆弱. 例如, 一次典型的X级太阳耀斑爆发, 在大约10 min时间内释放的能量达10^{25} J. 这些能量主要通过增强的电磁波辐射、非热高能粒子流发射和抛射磁化等离子体团三种形式搅动行星际空间和近地环境, 并对上述高技术系统产生冲击[5–7].

研究表明, 各种太阳爆发活动首先发生在太阳低层大气中(色球、过渡区、低日冕), 其影响范围却覆盖了从太阳表面到近地空间等广阔区域, 涉及众多物理过程, 包括:

(1) 太阳风的初发及其加速;

(2) 太阳高能粒子的产生和传播;

(3) 高速抛射的磁化等离子体团;

(4) 行星际激波的形成和演化.

上述四个过程构成了行星际和近地空间的主要扰动源, 它们的射电响应信号主要发生在米波及更长波段. 然而, 由于地球电离层的反射、折射和吸收效应, 以及来自地面附近和地球大气中的各种人工和自然信号也主要发生在这个频段, 尤其是在频率低于30 MHz的超长波段, 我们在地基探测系统中几乎无法有效接收来自太阳和行星际空间的辐射信号.

我国主导实施的鸿蒙计划, 将发射1颗主星和9颗子星组成空间分布式干涉阵列, 沿高度为300 km、倾角为30°的圆轨道组成线型编队, 在月球背面以接近全天视场的巡天观测模式进行观测, 在月球正面下传观测数据. 该阵列由一个低频干涉成像谱仪(0.1–30 MHz)和一个高频频谱仪(30–120 MHz)组成, 可以在月球背面获得0.1–120 MHz频段干净的射电动态频谱和0.1–30 MHz频段辐射源的一维空间图像[8]. 由于月球没有电离层影响, 在月球背面还可以有效屏蔽来自地球方向各种人工和自然信号的干扰, 其电磁环境大大优于地基、近地轨道和月球正面的直接观测. 我国嫦娥4号任务的龙江2号探测结果验证了月球背面对来自地球方向各种电磁干扰信号的良好遮挡效果[9,10].

基于鸿蒙计划的观测, 我们可以揭示和阐明太阳活动有关的各种物理过程, 它们包括太阳风的加速源区和加速过程产生的频谱精细结构; 太阳高能粒子流的产生和在高日冕及行星际空间的传播所产生的具有快速频漂的射电III型暴[11,12]; 抛射的磁化等离子体团激发具有缓慢频漂的射电II型暴[12–15]; 超长波段的成像观测和频谱特征还能为行星际激波的形成和演变提供重要的证据[14].

本文主要讨论利用鸿蒙计划绕月射电探测阵列在超长波段的频谱观测和干涉成像观测对射电III型暴的研究, 阐述在哪些问题上有可能取得重要研究结果, 从而推动太阳物理和空间天气学的发展.

2　射电III型暴的形成机制

太阳活动产生的非热高能粒子流, 其能量主要介于20 keV到GeV量级之间[16], 属于中等相对论性的(Mildly Relativistic), 当它们在日冕和行星际空间高速飞行时, 其运动速度为5万千米/秒以上, 这一速度远高于局地等离子体中的任一种特征速度(如阿尔芬波速, 在太阳低层大气中大约为几十到200 km/s之间, 在高日冕到行星际空间, 一般都在2000 km/s以内). 它们将在背景等离子体中激发Langmuir波, 该Langmuir波与等离子体中的其他波模耦合产生相干等离子体辐射. 当Langmuir波与其他低频波模(如磁声波、哨声波、弱磁场条件下的电子回旋波等)耦合时, 辐射频率在一倍等离子体频率附近, 称为基频等离子体辐射; 当Langmuir波与散射Langmuir波耦合时, 辐射频率在2倍等离子体频率附近, 称为二次谐频等离子体辐射[17,18]. 归纳起来, 辐射频率可由下式表示:

$$f \approx s f_{pe}, \tag{1}$$

f_{pe}为电子等离子体频率, s为谐波数, 当$s = 1$时为基频等离子体发射(F), $s = 2$时为二次谐频发射(H). 近年来也有研究表明, $s > 2$的高次谐频发射也可能存在, 但是辐射强度要比F和H发射低得多. 因此, 观测中一般都只能观测到F和H两种辐射模式, 它们常成对出现, 称之为谐波结构[19]. 这是许多太阳射电爆发事件中常见

的现象, 如III型暴、II型暴、尖峰暴群等. 不过, 最近有模拟研究表明, 3次谐频或4次谐频的等离子体发射在一定条件下也能产生很强的发射强度, 并可以被观测到[20].

等离子体辐射频率是辐射源区局地等离子体密度n_e的一个标识$f_{pe}\approx 9.0\sqrt{n_e}$. 一般来说, 从太阳表面到行星际空间, 随着距离增加, 等离子体密度n_e是逐渐降低的. 随着太阳射电III型暴激发源——高能粒子束从太阳低层大气向行星际空间高速飞行, 所产生的射电辐射的频率也必然是从高频向低频快速漂移, 频漂率为负值:

$$\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t}=\frac{9s\mathrm{d}n_e}{2\sqrt{n_e}\mathrm{d}t}=-\frac{f}{2H}v_e, \tag{2}$$

这里$H=|n_e\mathrm{d}h/\mathrm{d}n_e|$为密度的特征高度, 与密度梯度成反比. 一般情况下, 在低日冕区, H值大约在2万到5万千米, 随着高度增加, 密度梯度降低, H值也逐步增大, 在太阳表面以上一倍太阳半径附近, H值超过30万千米, $v_e=\mathrm{d}f/f\mathrm{d}t$为辐射源的运动速度, 对于射电III型暴, v_e就是非热电子束的飞行速度; 对于射电II型暴, v_e则为抛射等离子体团的运动速度. 远离太阳表面飞行时v_e取正值, 朝向太阳表面飞行时v_e取负值. 由于非热电子的速度通常都在5万千米/秒以上, 远高于一般抛射等离子体团的飞行速度, 因此, 射电III型暴的一个显著特征便是频漂率非常高, 而射电II型暴的频漂率则非常缓慢.

观测表明, 不同频段观测的射电III型暴频漂率的绝对数值差别很大, 常用相对频漂率($D=\mathrm{d}f/f\mathrm{d}t$, 即单位时间内相对于中心频率的变化率)来指示爆发的动力学行为. D值的大小同样依赖于辐射频率f, 统计研究发现在550 MHz–74 kHz频段, 射电III型暴的D与f之间近似满足下列拟合关系[21,22]:

$$D\approx -0.01f^{0.85}, \tag{3}$$

其中, D的单位为s^{-1}, 频率f的单位为MHz. 例如, 在1 GHz频段附近, 若$D\sim 3.5\ \mathrm{s}^{-1}$, 则其绝对频漂率为3.5 GHz s^{-1}; 在100 MHz频段附近, $D\sim 0.5\ \mathrm{s}^{-1}$, 绝对频漂率约为50 MHz s^{-1}(也正因为如此, 过去许多人直接将$D>0.2\ \mathrm{s}^{-1}$的爆发简单地定义为射电III型暴, 这一定义比较粗略, 仅适用于频率>40 MHz的高频短波频段); 而在1 MHz频段附近, $D\sim 0.01\ \mathrm{s}^{-1}$, 其绝对频漂率仅为10 kHz s^{-1}左右. 当然, 实际的观测结果是在式(3)给出的结果附近有一个较宽的分布, 究其原因是D值的大小除了与频率f有关外, 还与局地密度梯度(由H决定)和高能粒子的速度(v_e)有关, 是多种因素决定D值的大小.

当H值已知时, 利用III型暴的频漂率即可推求非热粒子的运动速度, 从而得到非热粒子的能量. 与此类似, 当非热粒子的能量已知时, 则可以利用III型暴的频漂率来推断辐射源区的密度梯度.

根据式(2), 利用观测中所获得的频漂率的正负即可判断高能电子束的飞行方向. 我们知道, 太阳高能粒子最重要的加速机制便是与磁场重联密切相关的重联电场加速. 在这个加速过程中, 产生的高能粒子通常具有双向出流的特征, 绝大多数双向出流情形中一束高能粒子远离太阳表面沿开放磁场逃离而进入行星际空间, 另一束高能粒子则向下传播进入太阳低层大气. 上述物理图景在射电观测上就表现为在宽带动态频谱图上的反向III型暴对(Type III Pair): 射电爆发由两个分支构成, 其中一个分支向低频长波方向漂移, 频漂率为负, 通常称之为正常III型暴(Normal Type III Bursts); 另一个分支则向高频短波方向漂移, 频漂率为正, 通常称之为反向III型暴(Reverse-sloped Type III Bursts), 二者之间的反转频率(f_r)则对应于重联区, 也就是加速源区的等离子体频率和等离子体密度, 也间接指示了源区的相对空间高度(图1).

大量耀斑事件的统计表明, 在不同耀斑事件中f_r介于300 MHz–3.4 GHz之间[23–25]. f_r越低, 表明重联区位置越高, 可能对应于高层大气重联; 而f_r的值越高, 则表明重联区位置越低, 越靠近稠密等离子体的低层大气, 属于低层大气重联. 当然, 上述结论都是针对太阳耀斑

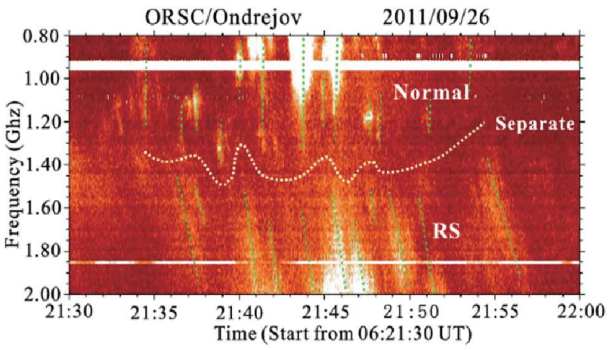


图 1　太阳射电III型暴对——磁场重联的重要标志[23]

Figure 1　Solar radio type III pair—the important indicator of magnetic reconnection [23].

这一类剧烈爆发事件而给出的. 我们知道, 在高日冕和更高的行星际空间的等离子体同样也是磁化等离子体, 在这里是否也存在磁场重联过程. 这个问题是与高速太阳风的二次加速问题紧密关联的, 这些远离太阳的磁场重联按理也应该会产生类似的射电III型暴对. 如果我们能在低频长波甚至超长波段找到III型暴对, 就可以确认行星际空间磁场重联的存在, 并回答高速太阳风的一些关键问题. 上述问题的回答需要我们通过频率更低的长波和超长波段的宽带动态频谱观测去验证.

另外, 从式(1)和(2)可以知道, 当等离子体的密度n_e在从低日冕到行星际空间均为连续变化的, 从而H值也将连续变化, 其结果就是所观测到的射电III型暴从高频短波到低频长波也将是连续的, 在宽带动态频谱观测图上就表现为一条连续的、光滑的亮带. 然而, 实际观测表明, 即使在低频长波段, 射电III型暴也通常并非连续的亮带, 其内部还存在着非常复杂的精细结构. 例如, 人们利用欧洲低频射电阵列LOFAR的高灵敏度观测发现, 在30–80 MHz之间的射电III型暴的宽带频谱中存在非常复杂的精细结构. 图2(a)展示了一组具有谐波结构和复杂频谱精细结构的III型暴频谱图. 其中图2(b)和(c)分别给出了该III型暴基频和二次谐频分支的精细结构. 从中可见, 无论是基频还是二次谐频分支, 它们都有条带状的内部精细结构.

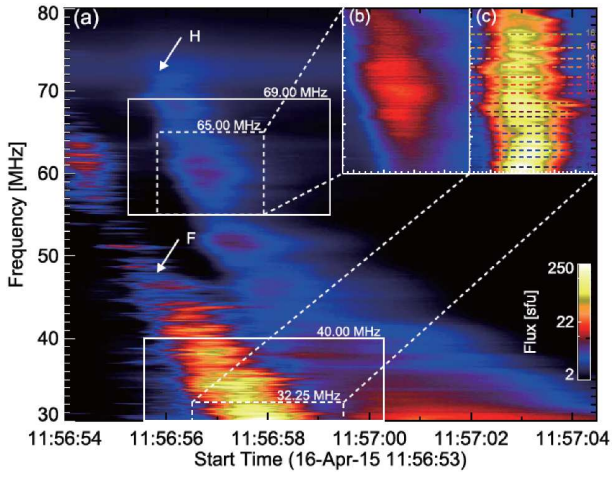


图 2　(a) LOFAR观测的低频太阳射电III型暴的精细结构, 显示被行星际空间湍流调制的特征. 其中亮度表示辐射流量强度, 单位为太阳辐射流量单位. (b), (c) 谐频分支和基频分支局部的放大图[26]

Figure 2　(a) The fine structures of low frequency type III radio burst observed by LOFAR, which shows the modulation by interplanetary turbulence. Here, the brightness indicates the emission intensity with unit of sfu. (b), (c) Enlarged partial views of the harmonic and fundamental branches [26].

如果我们把III型暴的这些精细的条带结构按照它们的频率带宽进行统计分析, 就发现无论是基频分支(图3(a))还是谐频分支(图3(b)), 它们的带宽分布都非常接近于一个Kolmogorov形式的湍流谱, 谱指数接近−5/3[26], 这表明, 在行星际空间存在湍流结构, 它们可能调制了射电III型暴的辐射过程.

除了行星际空间的湍流调制外, 是否还存在其他物理过程作用在太阳射电III型暴上. 尤其是对于行星际射电III型暴, 尽管大多数人都认为是等离子体辐射, 但电子速度分布特征、动理论过程、波-模激发机制、哨声波或离子声湍动的影响等. 这些问题的解决还需要有更高灵敏度、更高时间-频率分辨率、少干扰或无干扰、干净连续的宽带动态频谱观测, 同时, 最好还能有相应的成像观测给出辐射源区的位置、空间结构以及随时间的演化特征. 来自月球背面的宽带动态频谱观测显然是一个非常重要的实现方式.

3　超长波太阳射电III型暴研究的现状及面临的挑战

太阳非热高能粒子流在太阳爆发源区(在色球顶部到低日冕附近)产生的射电III型暴的频率通常在米波到分米波频段(大约为300 MHz–6 GHz); 当它们离开加速源区进入初始传播区域时(太阳表面以上0.2–5倍太阳半径), 其辐射频率一般在米波到十米波波段(30–300 MHz)[23–28]. 上述频段均位于地球大气窗口, 相应的射电III型暴可以近似畅通无阻地到达地面, 利用普通地面太阳射电望远镜可直接探测. 但是, 当非热高能粒子流飞离太阳表面以上大约5倍太阳半径以后进入到行星际空间, 辐射频率将低于30 MHz. 这时, 由于地球电离层等离子体的散射和吸收效应, 电磁波辐射几乎完全被屏蔽, 无法有效到达地面望远镜. 通常将频率低于30 MHz的射电波段称为空间甚低频(Space Very Low Frequency, SVLF)或超长波(Ultra-long Wave, ULW). 事实上, 在接近ULW频段附近, 比如30–100 MHz频段, 虽然来自于太阳及外太空其他天体源的电磁波信号能够穿透地球大气层到达地面望远镜, 但是由于地球大气雷电和各种人工信号也非常集中地出现在这个频段, 从而导致地面望远镜的探测越

来越难以将外太空天体的辐射信号同上述干扰信号区分开来，利用鸿蒙计划在月球背面的观测则有希望获得干净的观测结果.

探测实验表明，即使将射电探测器发射到距地面36000 km的地球同步轨道上，也能收到很强的来自地面人工信号和地球大气闪电信号的干扰. 人们曾经通过试验发现，在月球背面的探测所受到的干扰远小于在月球正面的探测. 月球背面可以最大幅度减少来自人工信号和地球大气雷电信号等的干扰[9,10].

国际上进行SVLF射电爆发的观测开始于20世纪70年代. 人们先后利用一系列空间探测器开展了太阳射电III型暴的观测实验，其中包括RAE[27]，IMP-6[28]，Mars-3[29]，Voyager，ISEE 3[30,31]，Ulysses[32]等. 目前国际上在轨运行的主要SVLF太阳射电频谱观测设备以及与鸿蒙计划的对比见表1.

图4给出了2025年5月6日，由WIND/WAVES，S/WAVES，Parker Solar Probe(PSP)/FIELDS和Solar Orbiter(SO)四个SVLF设备观测到的太阳射电III型暴的对比图，从中可见，近日轨道的SVLF探测器(PSP/FIELDS和SO)所获得的射电III型暴要比近地轨道探测器(WIND/WAVES和S/WAVES)多得多，相关细节也更丰富. 不过，迄今国际上所有SVLF太阳射电探测器基

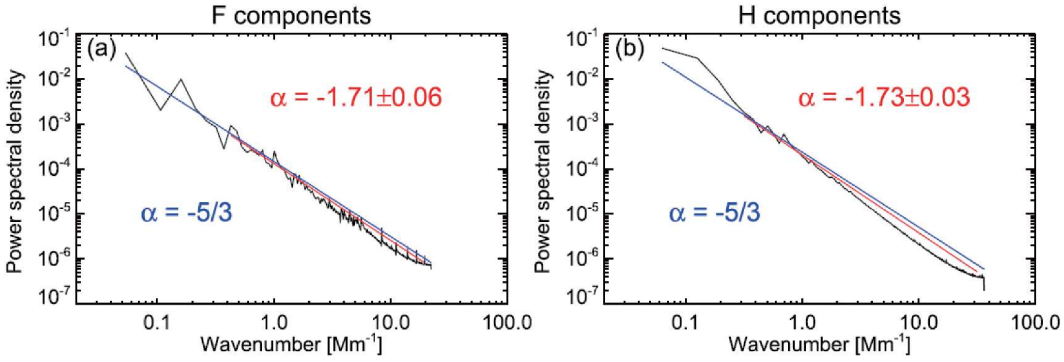


图 3　射电III型暴的基频(a)和谐频(b)分支的精细结构亮条带的频率带宽的幂律谱分布[26]

Figure 3　The power-law distribution of the frequency bandwidth of bright stripes in the fundamental (a) and second harmonic (b) branches, respectively [26].

表 1　当今世界在轨运行的主要低频太阳射电观测设备及与计划中的鸿蒙超长波射电探测阵列的对比

Table 1　Comparison between the main in-orbit low-frequency solar radio observatories in the world and the planned lunar ultra-long wave radio interferrometer array in the Hongmeng project

设备名称	探测器及观测频段	主要性能描述
WIND/WAVES (1994)	Low-FFT: 0.3–11 kHz TNR: 4–256 kHz RAD1: 20–1040 kHz RAD2: 1.075–13.825 MHz	1994年11月发射, 2004年5月定位于日地第一拉格朗日点(L1)附近, 工作至今. 根据所带燃料估计, 该卫星有可能工作到2070年左右
STEREO/WAVES (2006)	LFR L: 10–40 kHz LFR H: 40–160 kHz HFR: 0.125–16.075 MHz	由A, B两个探测器, 位于地球绕日轨道反向飞行. A星向地球前方飞行, 轨道周期为347天, 星-日-地夹角每年增加21.650°; B星向地球后方飞行, 轨道周期为387天, 星-日-地夹角每年退行21.999°. STEREO提供了从空间不同视角同时观测太阳的机会. HFR的频率分辨率为0.05 MHz
Parker Solar Probe/ FIELDS[33,38,39] (2018)	TNR: 10 kHz–1.7 MHz HFR: 1.3–19.2 MHz	沿一长椭圆轨道运动, 其近日点深入日冕中, 2021年4月, 首次越过阿尔文临界面, 进入太阳大气层. 2024年12月24日, 到达距离太阳表面约611万千米的最近距离
Solar Orbiter[40,41] (2020)	TNR: 4–1024 kHz HFR: 0.5–16 MHz	沿长椭圆轨道上飞行, 近日点距离太阳0.28 AU, 远日点为1 AU, 当前的轨道倾角可以达到17°, 最终将达到33°, 可对太阳极区进行观测
鸿蒙计划[8]	低频干涉成像谱仪: 0.1–30 MHz 高频频谱仪: 30–120 MHz	空间分布式干涉阵列, 由1颗主星和9颗子星沿高度为300 km、倾角为30°的圆轨道组成线型编队, 在月球背面进行观测, 在月球正面下传观测数据. 接近全天视场的巡天观测模式

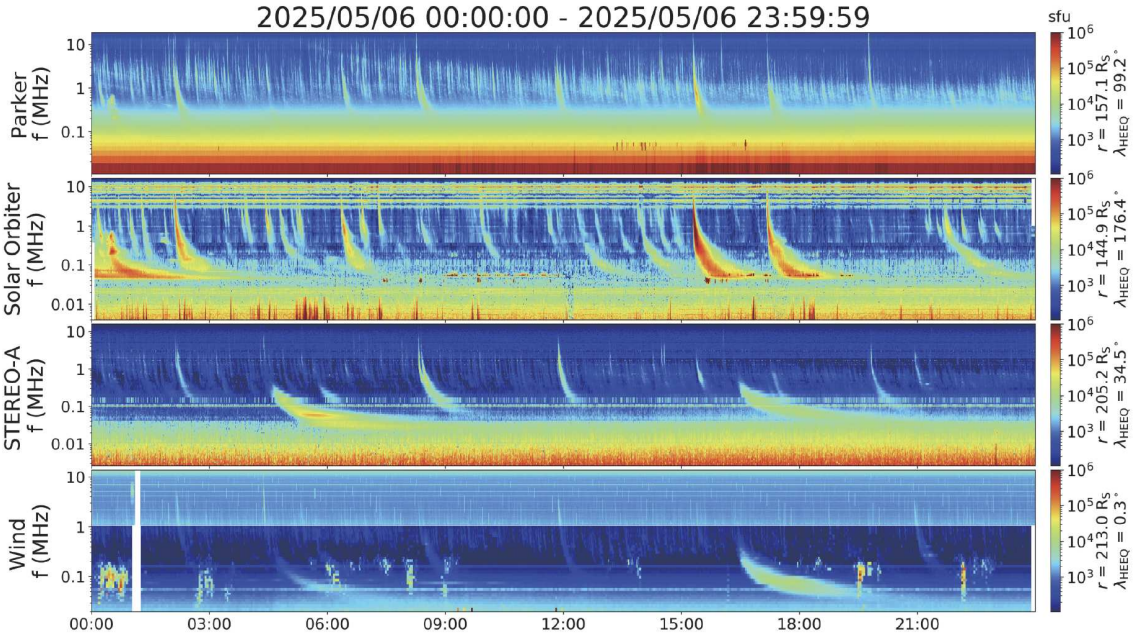


图 4　四个SVLF射电探测设备在2025年5月6日全天对太阳射电III型暴的观测结果
Figure 4　Spectrograph of solar type III bursts observed by PSP/FIELDS, SO, S/WAVES, and WIND/WAVES on 6 May 2025.

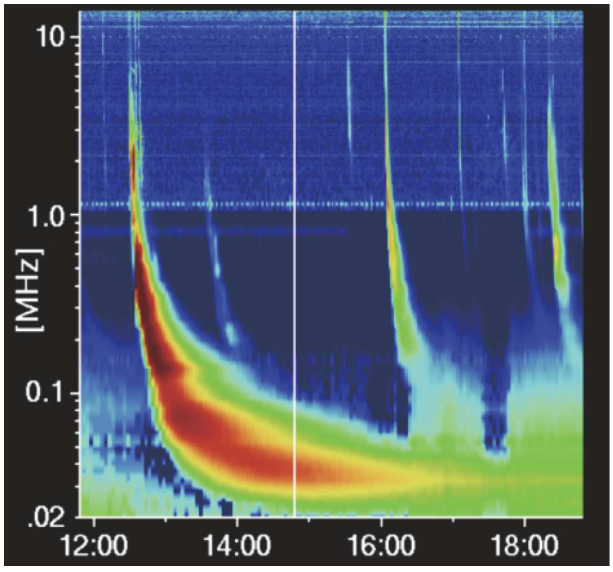


图 5　WIND/WAVES在2024年4月29日对太阳射电III型暴的观测结果及其“大扫把”形态
Figure 5　A spectrograph of solar type III bursts and its big broom pattern observed by WIND/WAVES on 29 April 2024.

本上都工作在19 MHz频率以下，在19–30 MHz频段还缺乏有效的探测手段；另外，现有探测设备在频谱分辨率、时间分辨率和灵敏度等方面尚不尽人意，尚待提高.

太阳射电III型暴常成群出现. 每一群都包含几个到几十个单个III型暴爆发，有时还会周期性地出现，呈准周期性脉动(Quasi-periodic Pulsation，QPP)特征，显示非热高能粒子的产生，或者粒子加速过程可能也具有准周期性发生的特点[22].

从图5可见，射电III型暴从10 MHz频率以上可以一直向低频段延续到25 kHz附近，总持续时间超过2 h. 在10 MHz附近，爆发的持续时间不足1 min，在1 MHz附近, 持续时间为2–3 min, 在100 kHz附近, 爆发的持续时间则超过半个小时. 与此相对比, 我们知道米波段的射电III型暴的持续时间通常只有几秒，而在厘米到分米波段的射电III型暴，有时其持续时间甚至不到100 ms[23]. 上述特征在动态频谱图上表现为一个“大扫把”的形态(见图4和5). 这一现象的产生固然与电磁波传播过程中的色散效应有关，还有一个非常重要的原因，就是高能电子束中电子能量的分布效应. 设离开加速源区的非热电子束流中的最高能量电子的飞行速度为v_1，最小能量电子的飞行速度为v_2，则当它们飞行一段距离L以后，飞行时间差为

$$\Delta t = \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_2} L \approx \frac{\Delta v}{v^2} L. \tag{4}$$

利用上式可以估算, 射电III型暴在1 GHz附近的Δt

约为1 s; 100 MHz附近约为10 s; 在1 MHz附近约2–3 min; 在100 kHz附近, Δt可达0.5–1 h. 这一估算结果与观测结果基本吻合, 可见这种速度弥散效应可能是产生“大扫把”形态(Big Broom Pattern)的主要因素. 反过来, 根据Δt随频率f的变化特征, 还可以追踪非热电子束流的能量分布、演化和在行星际空间的传播特征等. 对Δt的测量和研究, 可为灾害性空间天气事件的预报提供重要依据.

在频率分布方面, 最近有人通过统计研究发现, 在2 MHz附近是III型暴的最大响应频段, 对应的源区大约为日面以上4–10个太阳半径区间[33].

在太阳射电III型暴源区研究方面, 利用靠近SVLF附近频段的地面低频射电成像望远镜观测发现, 射电III型暴的源区高度及空间尺度均随频率降低而增加. 例如, 同一个III型暴从169 MHz频率延伸到43 MHz时, 其源径从5′左右逐渐增加到20′. 射电III型暴源区空间尺度随频率的这种变化的主要原因是射电波辐射受行星际空间介质(Interplanetary Medium, IPM)的散射效应, 对于一个遥远的点源发射的射电信号, 在经过IPM的散射后, 其角径(θ)将被扩大, 成为一个弥散面源, 面源的大小近似为

$$\theta \approx \frac{100'}{f^2\,\mathrm{MHz}}. \tag{5}$$

例如在频率为100 MHz时, 一个点源将被散射成一个角径大约为0.6″的面源; 而在30 MHz时, 该点源则变成一个7″的面源, 在1 MHz处则成了一个角径为100′(即1.6°)的弥散面源. 这对望远镜的空间分辨率提出了一个限制. 例如, 在频率为1 MHz处望远镜是无法区分小于1.6°细节的.

人们对太阳射电III型暴开展了大量的观测研究, 取得了许多非常重要的成果, 但是, 也还存在许多问题尚待解决, 归纳起来包括如下几个方面.

3.1　超长波射电III型暴的内部精细结构问题

前面我们已经提到, 在低频长波段的太阳射电III型暴的内部还存在一些可能是由行星际空间湍流调制而形成的精细结构[26,34]. 除此之外, 是否还存在更基本的精细结构. 当非热高能粒子束在高日冕和行星际空间传播过程中与沿途的磁化等离子体发生相互作用的过程时, 会受到沿途的磁场结构、等离子体的密度结构等因素的影响, 从而产生不同的精细结构特征, 对这些精细结构的观测和细致描述, 是我们解释行星际空间磁场和等离子体扰动的重要手段.

图6给出了两组与太阳耀斑有关的超长波射电III型暴的频谱观测结果, 其中12:17 UT开始出现的那一组III型暴直接发生在一个X9.0级强耀斑的峰值时刻, 结构相对简单光滑; 而开始于08:52 UT的这一组III型暴群发生在一个M1.5级中等耀斑的耀后相, 该群III型暴结构复杂, 存在非常丰富的内部精细结构. 此外, 在超长波段是否也存在III型暴对的问题, 这是判断在行星际空间是否存在能量释放过程和太阳风的二次加速过程的一个重要标志.

3.2　与耀斑无关的超长波射电III型暴的起源问题

观测表明, 许多太阳射电III型暴与太阳耀斑、CME、喷流等爆发活动密切相关, 与此同时, 人们发现还有许多超长波射电III型暴与太阳上的爆发活动几乎没有什么关联[35]. 图7给出了在第24和25太阳活动周之间的谷年期间由WIND/WAVES观测的超长波射电III型暴的频谱图和对应时段的GOES软X射线流量曲线的对比, 其中白色箭头所指的射电III型暴就没有相应的耀斑事件关联. 这些与耀斑事件无关的超长波射电III型暴的高能粒子从何而来.

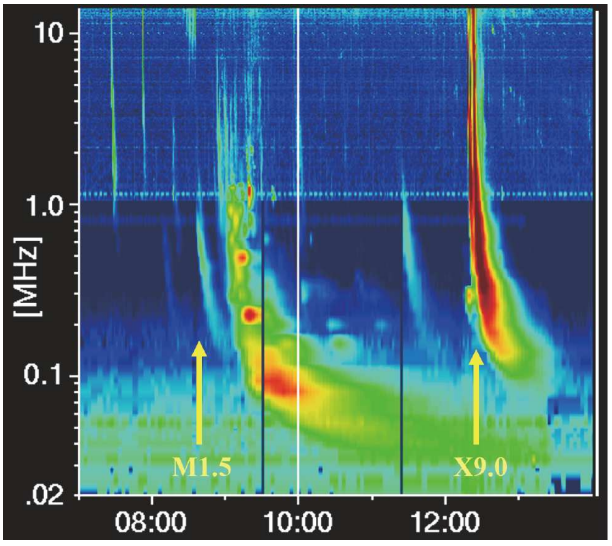


图 6　2024年10月3日由WIND/WAVES观测到的两个与耀斑有关的超长波射电III型暴

Figure 6　Two groups of ultra-long wave radio type III bursts associated with solar flares observed by WIND/WAVES on 3 October 2024.

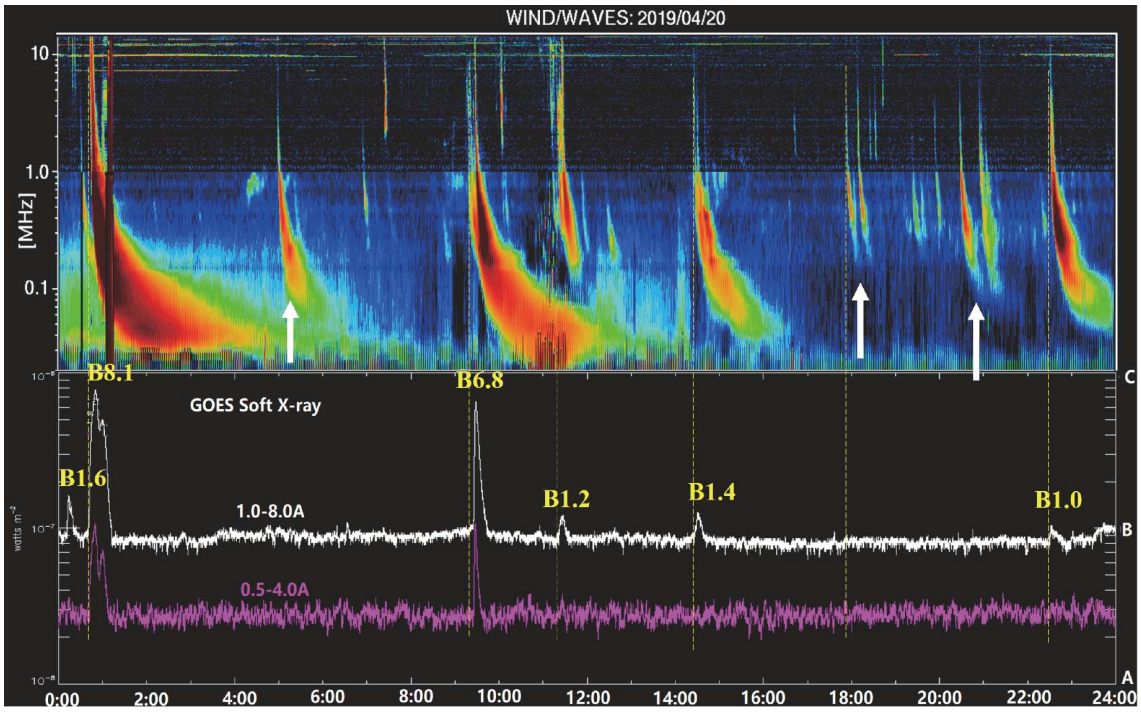


图 7　太阳活动谷年期间(2019年4月20日)射电III型暴的发生与太阳耀斑活动的对比. 上图为WIND/WAVES观测的超长波射电III型暴的频谱图, 下图为对应时间段的GOES软X射线流量曲线

Figure 7　The comparison between solar radio type III bursts and solar flare activities during solar minimum (20 April 2019). The upper panel is the spectrograph of ultra-long wave radio emission observed by WIND/WAVES, the lower panel is soft X-ray emission flux observed by GOES.

3.3　超长波射电III型暴向高频方向的延伸问题、起始频率和截止频率问题

观测表明, 许多与耀斑尤其是大耀斑事件相关的超长波射电III型暴实际上可以一直延伸到高频的米波、分米波甚至厘米波段, 这也表明对应的高能电子束是在耀斑过程中产生的, 并沿一定的开放磁场向行星际空间传播, 由此连续地激发射电辐射, 形成了超宽带的射电III型暴. 如图7中若干与B级小耀斑相关的III型暴实际上是一直向高频延伸的. 但是, 那些与耀斑无关联的III型暴似乎并没有向高频方向延伸, 它们的起始频率是多少. 该起始频率很可能直接对应着高能粒子的加速源区. 现有的几个空间SVLF探测器显然无法回答这个问题, 因为它们的观测频率几乎都限定在19 MHz以下. 在这方面, 鸿蒙计划中绕月超长波射电探测阵列的观测则有可能对这个问题给出新的回答, 其观测频率覆盖了从0.1到120 MHz的较宽频段.

另外, 超长波射电III型暴在低频端的截止频率也是一个重要问题, 它是非热高能粒子流所达空间位置的一个重要指标. 仍然以图6为例, 在这里有两组超长波射电III型暴, 其中第一组与一个M1.5级耀斑有关, 发生在该耀斑的后相, 除了具有复杂的内部精细结构外, 其在低频端的截止频率为40 kHz左右; 另一组III型暴则发生在一个X9.0级耀斑(这是迄今为止第25太阳活动周中最强的耀斑爆发事件)的峰值相附近, 内部结构相对简单平滑, 辐射强度较大, 但是其在低频端的截止频率更高, 达到90 kHz左右. 这似乎表明, 强耀斑期间产生的非热高能粒子反而没有较弱耀斑期间产生的高能粒子传播得更远. 不过, 与此相反的情形也时有发生, 比如2023年12月31日到2024年1月1日期间, 一个M1.0级耀斑对应的射电III型暴的低频截止频率为130 kHz, 而几个小时以后发生的X5.0级耀斑对应的射电III型暴的低频截止频率仅有40 kHz. 我们不得不问, 究竟是什么因素决定了非热高能离子体所能传播的距离. 要准确回答这个问题, 须在同一位置相同的环境条件下对太阳进行观测, 并对参数大样本进行统计分析, 而PSP/FIELDS和SO的轨道与太阳的距离变化太快, 在不同时间对太阳爆发信号的响应能力及背景等离子体环境是截然不同的[36,37]; WIND/WAVES位于L1点, 相对稳定, 比较适合对射电III型暴低频截止频率进行统计研究. 而鸿蒙计划绕月超长波射电相干阵列与太

阳的距离也相对稳定，且能在月背观测，干扰信号少，能获得干净的动态频谱，也适合对低频截止频率进行统计研究.

3.4　超长波射电III型暴的准周期性问题

周期性和准周期性现象往往表明，在复杂现象背后存在着某种基本物理规律，阐明这种规律能帮助我们直接揭示复杂现象背后的物理本质. 从图5和7中我们大致可发现，超长波射电III型暴的出现似乎存在某种时间尺度在几个小时量级的准周期性特征，这种准周期性过程对应的物理机制究竟是什么，是否还存在其他时间尺度的周期性现象，这些周期性或准周期现象究竟是与行星际空间的某些物理过程有关，还是直接与太阳活动的周期性调制有关. 对这些问题的回答有可能帮助我们找到新的太阳物理规律.

3.5　利用长波-超长波射电III型暴反演非热粒子的传播问题

我们多次提到，射电III型暴是太阳非热高能粒子束的示踪器，那么，利用对射电III型暴的观测和分析，理应能反演非热高能粒子的动力学特征，包括非热粒子的初发源区、能量、分布、传播路径及对近地空间的影响等. 基于式(2)，我们通过测量III型射电暴的频漂率df/dt可反演非热高能粒子的运动速度及能量；基于式(4)，则可以通过测量在任一频率处III型暴的持续时间Δt来反演非热高能粒子的速度分布. 在这里，Δt随频率f的变化曲线成为我们反演非热高能粒子的能量及其分布的一个重要指示器. 利用鸿蒙计划绕月超长波射电探测阵列的观测数据将这个变化曲线从低日冕附近的120 MHz一直延伸到近地空间附近的0.1 MHz. 从而为灾害性空间天气事件的预测和预报提供重要依据.

4　结论

太阳射电III型暴是来自于太阳低层大气中加速的非热高能粒子一直传播到行星际空间和近地空间与局地等离子体相互作用产生的相干等离子体发射，是太阳非热高能粒子流的直接响应信号，也是行星际空间和近地空间环境扰动的重要探针，对太阳物理和行星际空间物理的研究具有十分重要的意义. 太阳射电III型暴的频率跨越非常宽，可以从10 GHz以上的高频厘米波段一直延伸到100 kHz以下的千米波段. 然而，现有的观测却存在重大缺陷，其中空间探测设备的观测频段始终被限定在19 MHz以内，而且时间分辨率也非常有限；地面观测虽然覆盖了从10 MHz直至10 GHz以上，但是由于受地球大气雷电等干扰信号和来自地面各种高技术系统产生的人工信号的影响，我们很难从观测中获得一副完整、干净的宽带动态频谱，这直接限制了我们利用射电III型暴开展相关太阳物理和行星际空间物理的研究.

鸿蒙计划绕月超长波射电相干阵列的宽带动态频谱观测频段覆盖了从太阳表面以上大约1倍太阳半径高度的日冕区，跨越行星际空间，直到近地空间的广阔区域. 由于该观测系统被部署在远离地球的绕月轨道上运行，并能在月球背面开展对日观测，将最大限度地降低来自地球的各种自然和人工电磁信号的干扰，有望获得非常干净的宽带射电动态频谱. 利用这一超宽带的低频长波射电动态频谱观测数据，有望在超长波射电III型暴的内部精细结构、无耀斑的超长波射电III型暴的起源、长波-超长波射电III型暴的起始频率、超长波射电III型暴的准周期性、太阳非热粒子的传播问题及对近地空间环境的影响等一系列重要课题的研究中取得新的进展. 上述研究结果不但能帮助我们更好地理解太阳爆发活动的机理，而且可以为行星际空间物理研究和开展灾害性空间天气事件的预报提供重要的观测证据.

此外我们也注意到，由于技术原因，鸿蒙计划的观测频率是从100 kHz开始的，与国际上其他卫星相比，在4–100 kHz频段存在一个空白. 因此，将来鸿蒙的观测有必要同国际上其他在轨探测卫星互相配合，从而完整揭示包括射电III型暴在内的与太阳活动有关的各种爆发活动和空间天气的规律.

参考文献

1　Reinhold T, Shapiro A I, Solanki S K, et al. The Sun is less active than other solar-like stars. Science, 2020, 368: 518–521

2　Hudson H S. Global properties of solar flares. Space Sci Rev, 2011, 158: 5–41

3 Fletcher L, Dennis B R, Hudson H S, et al. An observational overview of solar flares. Space Sci Rev, 2011, 159: 19–106
4 Aulanier G, Démoulin P, Schrijver C J, et al. The standard flare model in three dimensions. Astron Astrophys, 2013, 549: A66
5 Schwenn R. Space weather: The solar perspective. Living Rev Sol Phys, 2006, 3: 2
6 Pulkkinen T. Space weather: Terrestrial perspective. Living Rev Sol Phys, 2007, 4: 1
7 Wang J X, Ji H S. Recent advances in solar storm studies in China (in Chinese). Sci China Earth Sci, 2013, 43: 883–911 [汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源——太阳风暴研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 883–911]
8 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: 43–59 [陈学雷, 阎敬业, 徐怡东, 等. 宇宙黑暗时代探路者——鸿蒙计划. 空间科学学报, 2023, 43: 43–59]
9 Wei M C, Hu C R, Yan J Y, et al. Longjiang-2: The first independent Earth-Moon transfer microsatellite (in Chinese). J Astronaut, 2020, 41: 790–799 [韦明川, 胡超然, 阎敬业, 等. 首颗自主地月转移微卫星“龙江二号”. 宇航学报, 2020, 41: 790–799]
10 Wei M, Hu C, Estévez D, et al. Design and flight results of the VHF/UHF communication system of Longjiang lunar microsatellites. Nat Commun, 2020, 11: 3425
11 Gopalswamy N, Mäkelä P. Long-duration low-frequency type III bursts and solar energetic particle events. Astrophys J, 2010, 721: L62–L66
12 Winter L M, Ledbetter K. Type II and type III radio bursts and their correlation with solar energetic proton events. Astrophys J, 2015, 809: 105
13 Cane H V, Stone R G. Type II solar radio bursts, interplanetary shocks, and energetic particle events. Astrophys J, 1984, 282: 339
14 Mann G, Classen T, Aurass H. Characteristics of coronal shock waves and solar type II radio bursts. Astron Astrophys, 1995, 295: 775
15 Cane H V, Erickson W C. Solar type II radio bursts and IP type II events. Astrophys J, 2005, 623: 1180–1194
16 Lin R P, Potter D W, Gurnett D A, et al. Energetic electrons and plasma waves associated with a solar type III radio burst. Astrophys J, 1981, 251: 364
17 Dulk G A. Radio emission from the sun and stars. Annu Rev Astron Astrophys, 1985, 23: 169–224
18 Bastian T S, Benz A O, Gary D E. Radio emission from solar flares. Annu Rev Astron Astrophys, 1998, 36: 131–188
19 Chen L, Ma B, Wu D, et al. Spectral characteristics of fundamental-harmonic pairs of interplanetary type III radio bursts observed by PSP. Astrophys J Lett, 2024, 975: L37
20 Li C, Chen Y, Zhang Z, et al. High-harmonic plasma emission induced by electron beams in weakly magnetized plasmas. Astrophys J, 2024, 960: 111
21 Alvarez H, Haddock F T. Decay time of type III solar bursts observed at kilometric wavelengths. Sol Phys, 1973, 30: 175–182
22 Reid H A S, Ratcliffe H. A review of solar type III radio bursts. Res Astron Astrophys, 2014, 14: 773–804
23 Tan B, Mészárosová H, Karlický M, et al. Microwave type III pair bursts in solar flares. Astrophys J, 2016, 819: 42
24 Tan B L, Karlický M, Mészárosová H, et al. Diagnosing the source region of a solar burst on 26 September 2011 by using microwave type-III pairs. Sol Phys, 2016, 291: 2407–2418
25 Tan B L, Karlický M, Mészárosová H, et al. Diagnosing physical conditions near the flare energy-release sites from observations of solar microwave type III bursts. Res Astron Astrophys, 2016, 16: 013
26 Chen X, Kontar E P, Yu S, et al. Fine structures of solar radio type III bursts and their possible relationship with coronal density turbulence. Astrophys J, 2018, 856: 73
27 Fainberg J, Stone R G. Type III solar radio burst storms observed at low frequencies. Sol Phys, 1970, 15: 222–233
28 Kaiser M L. The solar elongation distribution of low-frequency radio bursts. Sol Phys, 1975, 45: 181–187
29 Caroubalos C, Steinberg J L. Evidence of solar burst directivity at 169 MHz from simultaneous ground based and deep space observations (STEREO-1 preliminary results). Astron Astrophys, 1974, 32: 245–253
30 Dulk G A, Steinberg J L, Lecacheux A, et al. The visibility of type III radio bursts originating behind the Sun. Astron Astrophys, 1985, 150: L28
31 Lecacheux A, Steinberg J L, Hoang S, et al. Characteristics of type III bursts in the solar wind from simultaneous observations on board ISEE-3 and Voyager. Astron Astrophys, 1989, 217: 237–250
32 Hoang S, Poquérusse M, Bougeret J L. The directivity of solar kilometric type III bursts: Ulysses-Artemis observations in and out of the ecliptic plane. Sol Phys, 1997, 172: 307–316
33 Sasikumar Raja K, Maksimovic M, Kontar E P, et al. Spectral analysis of solar radio type III bursts from 20 kHz to 410 MHz. Astrophys J, 2022, 924: 58

34 Chen L, Ma B, Wu D, et al. An interplanetary type IIIb radio burst observed by Parker solar probe and its emission mechanism. Astrophys J Lett, 2021, 915: L22
35 Badman S T, Carley E, Cañizares L A, et al. Tracking a beam of electrons from the low solar corona into interplanetary space with the low frequency array, Parker solar probe, and 1 au spacecraft. Astrophys J, 2022, 938: 95
36 Ma B, Chen L, Wu D, et al. Statistics of low frequency cutoffs for type III radio bursts observed by Parker solar probe during its encounters 1–5. Astrophys J Lett, 2021, 913: L1
37 Ma B, Chen L, Wu D, et al. Discrepancy between the low-frequency cutoffs of type III radio bursts based on simultaneous observations by WIND and PSP. Astrophys J Lett, 2022, 932: L26
38 Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. The solar probe plus mission: Humanity's first visit to our star. Space Sci Rev, 2016, 204: 7–48
39 Bale S D, Goetz K, Harvey P R, et al. The FIELDS instrument suite for solar probe plus. Space Sci Rev, 2016, 204: 49–82
40 Pulupa M, Bale S D, Bonnell J W, et al. The Solar Probe Plus Radio Frequency Spectrometer: Measurement requirements, analog design, and digital signal processing. JGR Space Phys, 2017, 122: 2836–2854
41 Müller D, St. Cyr O C, Zouganelis I, et al. The Solar Orbiter mission. Astron Astrophys, 2020, 642: A1

Study on ultra-long wavelength solar radio type-III bursts

TAN BaoLin[1,2*], HUANG Jing[1,2], CHEN XingYao[3], CHEN Ling[4], KONG XiangLiang[5], ZHANG Yin[1] & TAN ChengMing[3]

[1]*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
[2]*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China*
[3]*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
[4]*Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China*
[5]*School of Space Science and Physics, Institute of Space Sciences, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, China*
**Corresponding author (email: bltan@nao.cas.cn)*

The solar radio type-III burst is a coherent plasma emission generated by the interaction between non-thermal energetic particles and local plasmas along the path from corona to interplanetary space. It is a direct response signal of the solar non-thermal energetic particle flow and an important probe for environmental disturbances in interplanetary and near-Earth space. The frequency range of solar radio type-III bursts is very wide, extending from the high-frequency centimeter wavelength above 10 GHz to the kilometer wavelength below 100 kHz. However, the existing observations have significant shortcomings, with space observations always below 19 MHz, and limited time resolution and temporal resolution. Although ground observations cover frequencies from 10 MHz to above 10 GHz, it is difficult to obtain a complete and clean broadband dynamic spectrum due to interference signals such as lightning in the Earth's atmosphere and various artificial signals from the ground. The Hongmeng project will obtain dynamic spectrum and quasi-imaging observations in the frequency range of 0.1–30 MHz using the lunar ultra-long wave radio interferrometer array, and broadband dynamic spectrum observations in the frequency range of 30–120 MHz. These frequency range covers a huge area from the lower corona, via the interplanetary space, to the near-Earth space. Due to its deployment in a lunar orbit far away from Earth and the ability to conduct observations of the Sun on the lunar far side, it will minimize interference from various natural and artificial electromagnetic signals from Earth, and can obtain a very clean broadband radio dynamic spectrum. This work first discussed the recent research status and the existing problems of solar radio type III bursts, and then discussed the spectrum and quasi-imaging observation data based on the lunar ultra-long wave radio interferrometer array in the Hongmeng Project. By utilizing these observations, it is expected to make a new progress in the research of a series of important topics, such as the internal fine structures, the starting frequency, quasi-periodicity, and the origin of non-flare type III bursts, as well as the propagation of the related non-thermal energetic particles, and their impact on the near-Earth space environment. These results can not only help us better understand the mechanism of solar activities, but also provide important observations for interplanetary space physics and the prediction of catastrophic space weather events.

solar activity, energetic particles, space weather, solar type III radio burst, ultra-long wavelength radio emission

PACS: 96.60.Q-, 96.50.Vg, 94.05.sd

doi: 10.1360/SSPMA-2026-0012