

空间甚低频太阳射电Ⅲ型爆研究进展

谭宝林^{1,2}, 谭程明^{1,2}, 黄静^{1,2}, 陈林杰¹

(1. 中国科学院国家天文台太阳活动重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学天文学与空间科学学院, 北京 100047)

摘要: 太阳非热高能粒子流是产生灾害性空间天气事件最主要的驱动源之一, 其主要观测特征是具有快速频率漂移特征的射电Ⅲ型爆。主要介绍了国际上在空间甚低频波段 (<30 MHz) 太阳射电Ⅲ型爆的主要观测设备和研究进展, 包括具备高时间-频率分辨能力的空间和月基甚低频频谱仪等, 对存在的主要问题进行了详细讨论, 系统分析了空间甚低频射电探测器观测数据在太阳射电Ⅲ型爆研究方面的主要科学目标和应用前景。

关键词: 太阳活动; 太阳射电; 射电观测; 空间天气

中图分类号: P182, P162.11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)01-0092-08

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20190227002

引用格式: 谭宝林, 谭程明, 黄静, 等. 空间甚低频太阳射电Ⅲ型爆研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8 (1): 92-99.

Reference format: TAN B L, TAN C M, HUANG J, et al. Research advances of solar radio type III bursts at space very low frequencies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8 (1): 92-99.

引言

太阳爆发包括耀斑(solar flare)、日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)、爆发日珥等。它们是发生在整个太阳系中最为猛烈的爆发过程^[1-3]。例如, 一次典型的X级太阳耀斑爆发, 能够在大约10 min内释放出 10^{25} J的能量(作为对比, 一枚100万t TNT当量的氢弹爆炸所释放的能量大约为 10^{16} J, 也就是说, 一次X级耀斑所释放的能量相当于10亿颗百万t当量的氢弹在10 min内同时爆炸)。太阳爆发释放的物质和能量主要通过下列3种载体对行星际空间和近地空间环境产生剧烈扰动(有时也称之为3波攻击方式)^[4-6]:

1) 增强的电磁波辐射。在太阳爆发期间, 可以看见太阳光球表面和色球在可见光波段的快速增亮, 全日面辐射流量可增加5%~10%; 在紫外(UltraViolet, UV)和极紫外(Extreme UltraViolet, EUV)波段增亮比可见光波段还要明显, 全日面辐射流量约增加20~50%; 在软X射线和射电波段的辐射流量则可增加几十倍到几十万倍。电磁辐射以光速进行传播, 大约需要8 min就能从太阳爆发源区传播到近地空间。

2) 非热高能粒子流发射。太阳爆发过程会加速产生大量非热高能粒子, 一次典型的太阳耀斑爆发过程会释放的非热电子大约可达 10^{31} 个/s, 并伴有几乎全波

段的电磁波辐射增强。这些非热高能粒子大约以 $0.1\sim 0.9c$ (c 为光速)的速度在行星际空间高速飞行, 大约需要几十min~2 h就可以达到近地空间。高能粒子流在日冕和行星际空间的高速飞行将产生具有高速频率漂移的射电Ⅲ型爆^[7-8]。

3) 抛出高速磁化热等离子体流。包括各种尺度的重联喷流(Jet)和CME等。一次典型的CME活动所抛射出的磁化热等离子体大约为100亿t! 这些抛射的磁化热等离子体团以大约 $500\sim 2\ 000$ km/s的速度在行星际空间高速运动, 大约需要1~3 d时间即可达到近地空间并产生剧烈扰动。磁化热等离子体流在日冕和行星际空间高度运动时会形成激波, 并产生具有缓慢频率漂移的射电Ⅱ型爆^[9-11]。

在上述3种太阳爆发的能量载体中, 非热高能粒子流发射是对空间安全, 尤其是大量空间飞行器、空间载人飞行以及深空探测构成严重危害的一种高能载体, 能产生灾害性的空间天气事件(space weather events)。如何监测和预警由太阳高能粒子流触发的灾害性空间天气事件是摆在太阳物理学家和空间物理学家们面前的一项重大课题。

非热高能粒子流在日冕和行星际空间高速飞行时, 将在背景等离子体中激发Lang-muir波, 该Lang-

muir波与等离子体中的其它波模耦合产生相干等离子体辐射，从观测特征上则表现为具有快速频率漂移的射电III型爆。因此，射电III型爆是日冕和行星际空间非热高能粒子流的示踪^[12]。通过对射电III型爆的探测和追踪，可以研究高能粒子流的产生、传播和演变。太阳非热高能粒子流在太阳爆发的源区（在色球顶部到低日冕附近）时产生的III型爆的频率通常在厘米-分米波段（频率大约为300 MHz~3 GHz）；当它们刚离开爆发源区在初始传播区域附近时（位置在距离太阳光球表面以上0.2~3倍太阳半径），产生的射电III型爆的辐射频率则一般在米波-10米波波带（频率约30~300 MHz）^[13-14]。上述频段的射电III型爆基本上不受地球大气层中的风云雨雪，包括电离层扰动等因素的影响，可以畅通无阻地到达地面，因此均可从地面太阳射电望远镜中直接探测。但是，当非热高能粒子流飞离太阳表面以上大约3倍太阳半径的行星际空间后，它们与背景等离子体相互作用所产生的射电爆发的辐射频率将低于30 MHz。在这个频段，由于地球电离层等离子体的散射和吸收效应非常显著，使得该频段来自太阳的任何电磁波辐射都完全被屏蔽了，无法有效到达地面望远镜被观测到。因此，只能将望远镜发射到地球电离层以外的外太空或月球基地才能对该频段的射电爆发进行探测。也正因为如此，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）。事实上，在接近SVLF波段附近，比如30~80 MHz频段，虽然来自于太阳及外太空其它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的干扰，在地面望远镜的探测也越来越难以将外太空天体的辐射信号同这些干扰信号区分开来，因此，人们也倾向于在空间对该频段进行观测，从而获取干净可靠的观测数据。

近年来，随着我国一系列空间计划，包括探月计划的逐步实施，已经逐步具备条件将射电探测器发射到空间、月球背面、甚至更远的深空去探测太阳射电爆发的信号，获取可靠的、非常干净的观测数据。本文重点讨论与太阳非热高能粒子流有密切关系的射电III型爆在低频至空间甚低频段的观测和研究进展。其中，第1节主要介绍国际上现有的低频和空间甚低频段太阳射电III型爆的主要观测设备及其特点；第2节重点总结目前国际上在太阳射电III型爆的观测和研究方面所取得的主要进展；第3节讨论在太阳射电III型爆的观测和研究方面存在的主要问题；第4节为结论。

1 低频和空间甚低频段太阳射电III型爆的主要探测设备

现有探测实验表明，即使将射电探测器发射到距地面36 000 km的地球同步轨道上，仍然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远小于在月球正面的探测。因此，要观测空间甚低频段的射电辐射信息，只有把望远镜发射到远离地球电离层以上的外太空去进行观测，比如在月球背面、远离地球的日地拉格朗日点、甚至更远的深空，以尽可能减少来自地面人工信号和地球大气中雷电信号等的干扰。

国际上进行空间甚低频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型爆的观测实验，其中包括RAE^[15]、IMP-6^[16]、Mars-3^[17]、Voyager、ISEE 3^[18-19]、Ulysses^[20]等。上述设备在太阳射电III型爆的研究方面仅有零星的观测活动，并且先后停止了工作。目前国际上在轨运行的可用于系统探测低频和空间甚低频太阳射电III型爆的设备主要有两个：一个是WIND卫星所携带的射电波和等离子体波探测器组合WIND/WAVES，另一个是日地关系天文台（Solar TERrestrial RELations Observatory, STEREO）所携带的低频射电频谱仪SWAVES。

1) WIND/WAVES

WIND卫星是美国1994年11月1日发射的一颗太阳、行星际及地球磁场探测卫星，在完成对地球磁层的一系列探测任务之后，于2004年5月成功定位于距离地球约150万km的日地第一拉格朗日点（L1）附近，工作至今。根据其所携带的燃料估计，该卫星还能继续运行50年，即有可能一直工作到2070年左右。

WIND卫星所携带的射电波和等离子体波探测器WIND/WAVES由3组互相垂直的偶极子天线构成，其中一组天线沿卫星的自转轴，即 E_x 轴，长度为100 m，另外两个轴分别为 E_y 轴长度为15 m， E_z 轴长度为12 m。各天线的长度还可以根据需要分别调整为41.1 m、3.79 m和2.17 m。射电波接收机分4个频段进行观测：

(1) 低频FFT接收机（Low frequency Fast Fourier Transform receiver, Low-FFT）：观测频率为0.3~11 kHz。

(2) 热噪声接收机（Thermal Noise Receiver, TNR）：观测频率为4~256 kHz，分16或32个频道，带宽按对数分布，介于0.4~6.4 kHz之间。

(3) 射电接收机RAD1：观测频率为20~1 040 kHz。

(4) 射电接收机RAD2：观测频率为1.075~13.825 MHz。

其中RAD1和RAD2的组合是探测太阳射电III型爆的主要设备,可得到带宽为0.02~13.825 MHz的爆发动态频谱。

2) SWAVES

STEREO于2006年10月26日发射,有A、B两个几乎一样的太阳探测器,大致位于地球绕日轨道,其中A星向地球前方飞行,绕日轨道周期为347 d,星-日-地夹角每年增加21.650°;B星向地球后方飞行,绕日轨道周期为387 d,星-日-地夹角每年退行21.999°。2011年2月6日,A、B两星与太阳正好位于180°连线上。2015年,两个探测器均到达太阳的背面,并在几个月时间里与地面失去联系,到2016年8月21日重新与地面取得联系。2023年左右,它们将重新回到近地轨道附近。STEREO提供了距离太阳大约1 AU、从空间不同视角对太阳爆发过程同时观测的机会。

STEREO携带的探测日地空间低频射电爆发的低频射电频谱仪SWAVES,可在SVLF频段对太阳活动进行追踪观测。SWAVES的天线系统为互相垂直的3个单极子天线,长度均为6 m,每根天线质量为1 kg,相关附属硬件0.3 kg。SWAVES主要包括如下4个射电接收装置:

- (1) LFR Lo频谱仪:工作频率为10~40 kHz。
- (2) LFR Hi频谱仪:工作频率为40~160 kHz。
- (3) HFR频谱仪:工作频率为0.125~16.075 MHz,频率分辨率为0.05 MHz。
- (4) FFR1:工作频率为50 MHz,为单频流量计。

LFR Lo、LFR Hi和HFR组合在一起可以得到频率范围为0.01~16.075 MHz的太阳射电III型爆的动态信息。

简单归纳一下,迄今为止国际上所有空间甚低频射电探测设备的探测频率基本上都工作在频率16 MHz以下,在16~30 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也尚不尽人意,尚待提高。

2018年5月,我国在西昌卫星发射中心发射了“嫦娥四号”中继星,该星搭载了由中国和荷兰科学家合作研制的甚长波射电探测器NCLE,能够在月球背面对太阳及其它天体在0.1~80 MHz的射电辐射进行高频谱分辨率的探测,预计将在太阳射电III型爆的探测方面发挥重要作用。

2 太阳射电 III 型爆低频观测和研究的主要进展

太阳射电III型爆是一种常见的快速射电爆发形

式,在太阳耀斑、CME等剧烈太阳活动过程中常常成群出现。每一群一般包含几个到几十个单个III型爆。在太阳活动中等强度的年份,每年可观测到成千上万次射电III型爆。它们有时出现在耀斑开始时刻,有时出现在耀斑的峰值期间,有时也出现在耀斑后相中。同太阳耀斑有关的射电III型爆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^[21]。

太阳射电III型爆的显著特征是快速的频率漂移。在低频段,太阳射电III型爆的频漂率均为负,即爆发从高频迅速向低频漂移,频漂率也随频率的减小而降低。人们利用大量观测进行统计分析,发现在550 MHz~74 kHz频段,频漂率与频率之间近似满足下列拟合关系^[22]

$$\frac{df}{dt} \approx -0.01f^{1.85} \quad (1)$$

其中:频漂率 $\frac{df}{dt}$ 的单位为MHz/s,频率 f 的单位为MHz。上述拟合关系在低频和甚低频段基本适用,但是在厘米-分米波段的射电III型爆的频漂率则常常显著偏离上述结果^[23]。科学家甚至可以观测向低频和高频方向漂移的III型爆发生,即频漂率符号相反的III型爆对(type III pair),符号反转对应的频率称为反转频率(f_r)。统计表明,太阳射电III型爆的反转频率在不同的耀斑事件中差别较大,大约介于300 MHz~3.4 GHz之间^[24-25]。反转频率对应于耀斑爆发的初始能量释放源区,也即粒子加速区附近的射电辐射频率,也间接指示了源区的空间高度。如果知道不同频率随高度的变化函数关系,也就可以给出粒子加速源区的空间位置。在不同爆发事件中反转频率在米波段到分米波段变化这一特征表明,粒子加速源区的高度在不同爆发事件中是有显著差别的,大致介于从1万~10万 km之间。

从反转频率往高频方向漂移的射电III型爆,频漂率为正,称为反向III型爆,反映了高能粒子离开加速源区后向太阳表面的飞行过程;与此相反,从反转频率向低频漂移的射电III型爆的频漂率为负,通常称为正常III型爆,反映了高能粒子离开加速源区后向远离太阳的行星际空间飞行的过程。式(1)仅给出了正常III型爆频漂率的拟合规律。空间甚低频段的射电III型爆通常也都属于正常III型爆。

利用WIND/WAVES、SWAVES等空间低频-甚低频射电探测器,人们在该频段的射电III型爆的研究方

面已经取得了大量非常重要的研究^[26]。图1是一例由SWAVES于2009年7月18日观测到的太阳射电 III 型爆事件^[27]。在该事件中，射电 III 型爆从频率 16 MHz 一直向低频段延续到大约 26 kHz 附近，总持续时间超过 2 h。在 16 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，爆发的持续时间则接近半 0.5 h 之久。与此相对比，在米波段的射电 III 型爆的持续时间通常只有几 s，而在厘米-分米波段的射电 III 型爆，有时其持续时间甚至不到 100 ms^[28]。

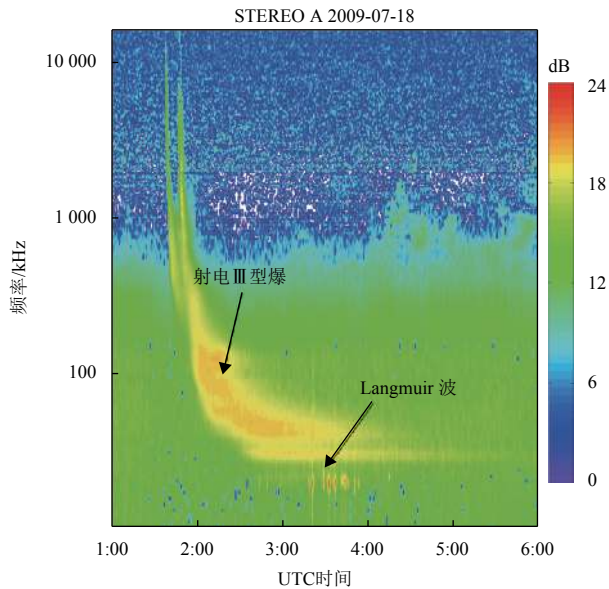


图 1 SWAVES 观测到的一例射电 III 型爆事件^[27]

Fig. 1 A solar radio type III burst observed by SWAVES^[27]

利用地面太阳射电望远镜和空间太阳射电探测器的观测数据进行组合，可以得到从分米波直到千米波以下射电 III 型爆的超宽带频谱图。图2是利用瑞士 Phoenix 4 射电频谱仪（200~900 MHz）、法国 Nancay 10 米波射电频谱仪（14~80 MHz）和空间 WIND/WAVES 射电探测器（0.02~14.0 MHz）等包括地基和空间望远镜在内共同获得的 2014 年 2 月 16 日一个超宽带射电 III 型爆事件^[29]。该事件中覆盖了从分米波一直延伸到波长为 10 km 的超长波段。

辐射频率在几百 MHz 米波段到 1 GHz 左右的分米波段的射电 III 型爆辐射源区非常靠近粒子加速源区，即低日冕的太阳耀斑源区附近，距离太阳光球表面大约只有 0.01~0.1 倍太阳半径左右。但是，波长为几千米到十几千米的超长波（频率 < 0.1 MHz）射电 III 型爆，它们的辐射源区则非常靠近地球轨道附近，与太阳耀斑的爆发源区大约距离 200 倍太阳半径以上。图2中的频谱结构表明，在不同频段的 III 型爆在如此巨

大的空间跨度上实际上是同一个连续的过程，即它们很可能直接反映了同一束非热高能粒子流在日冕和行星际空间高速飞行的轨迹。

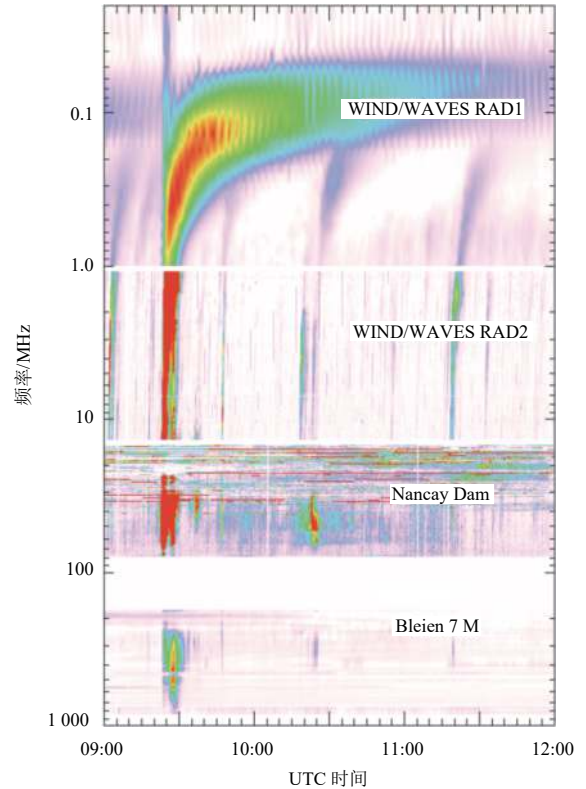


图 2 Phoenix 4 射电频谱仪、Nancay 10 米波射电频谱仪和 WIND/WAVES 射电探测器在 2014 年 2 月 16 日获得的一例超宽带射电 III 型爆的综合频谱图^[29]

Fig. 2 A synoptic spectrogram of a type III radio burst with super-wide frequency band observed by Phoenix 4 decimeter spectrometer, Nancay decimeter array and WIND/WAVES on 2014 February 14^[29]

在关于太阳射电 III 型爆的源区研究方面，人们利用靠近 SVLRF 频段的地面低频射电成像望远镜观测发现，太阳射电 III 型爆的源区距离太阳表面的高度随频率的降低而逐渐增加，源区的尺寸也随频率的减小而逐渐增加。例如，同一个 III 型爆的从 169 MHz 变化到 43 MHz 时，其源的大小则从大约 5' 而逐渐增加到 20'。图3给出了人们利用欧洲 LOFAR 低频射电阵观测得到的频率为 30~90 MHz 的 III 型爆群的频谱结果和其中一个 III 爆的源区图像，可以看出，III 型爆源从 50~55 MHz 演变到 30~35 MHz 时，其源区位置逐渐从太阳表面附近增加到大约 3 倍太阳半径处，源区尺寸也从不到 0.5 倍太阳半径（16'）逐渐增加到 1.0 倍太阳半径以上^[30]。

根据上述低频射电的成像观测结果，似乎可以外推，在 SVLRF 频段的射电 III 型爆的源区尺寸很可能会超过一个太阳直径以上。在行星际空间，比如辐射频率

在1 MHz附近的射电III型爆, 其源区尺寸甚至可能达到数倍太阳直径大小, 其角径可能达到1°甚至几度的数量级。

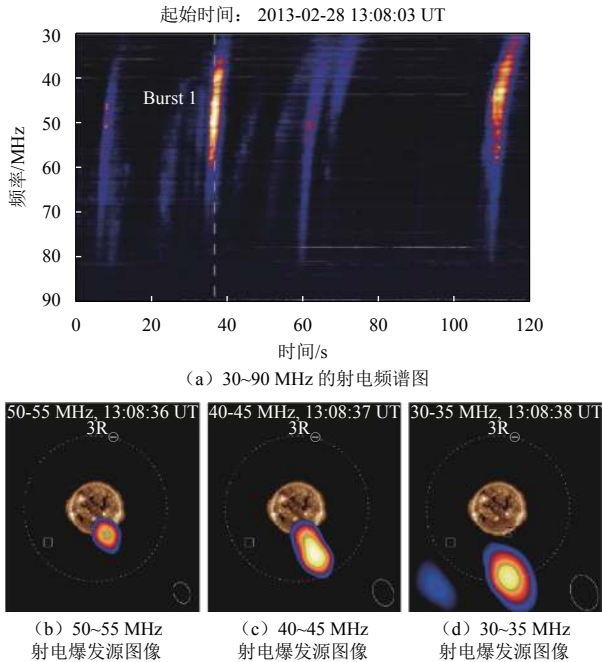


图3 LOFAR阵列对低频太阳射电III型爆的观测^[30]

Fig. 3 Observations of a low frequency type III radio burst by LOFAR^[30]

射电III型爆源区的空间尺度随频率的减小而逐渐增加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, 在经过行星际介质的散射后, 其角径 (θ_{IPM}) 将被扩大, 成为一个有一定展宽的弥散面源, 面源的大小近似为

$$\theta_{IPM} \approx \frac{100'}{(f/\text{MHz})^2} \quad (2)$$

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"大小的面源; 而在30 MHz时, 该点源则变成一个大约为7"的面源, 在1 MHz处则成了一个角径为100' (即1.6°) 大小的弥散面源。这对望远镜的空间分辨率提出了一个限制。例如, 在观测频率为1 MHz处望远镜是无法区分小于1.6°的结构细节的。

3 太阳射电 III 型爆低频观测研究存在的主要问题

虽然人们在空间甚低频波段对太阳射电III型爆开展了大量观测研究, 已经取得了许多非常重要的成果, 但也还存在许多问题尚待解决。

首先, 空间甚低频的射电III型爆是否存在内部的精细结构呢? 最近, 陈星瑶等^[31]利用LOFAR在高灵敏度的观测发现, 在30~80 MHz之间的射电III型爆内部还存在非常复杂的精细结构 (如图4所示), 它们似乎受到行星际空间太阳风湍流的调制, 它们的精细结构对应的空间尺度的分布非常接近于一个Kolmogorov形式的湍流谱, 谱指数接近-5/3。那么, 在30 MHz以下的空间甚低频段的射电III型爆是否也拥有类似的内部精细结构呢? 这些精细结构的分布律是否也是湍流谱呢?

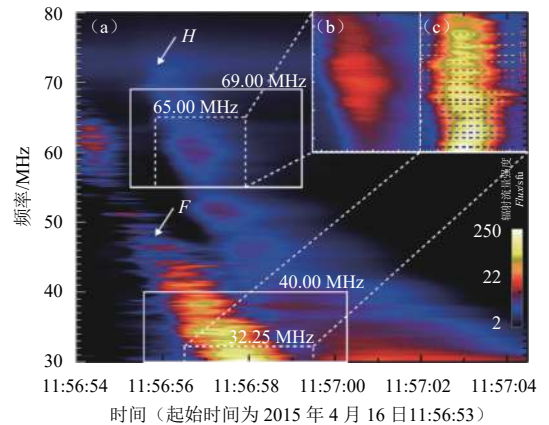


图4 LOFAR观测低频太阳射电III型爆的精细结构, 显示被行星际空间湍流调制的特征^[31]

Fig. 4 The fine structures of low frequency Type III radio burst observed by LOFAR, which shows the modulation by interplanetary turbulence^[31]

其次, 前面已经提到, 射电III型爆的反转频率通常都出现在厘米-分米波段, 在空间甚低频段出现的射电III型爆都属于正常III型爆。但是, 空间甚低频段覆盖了从10米波到十千米波长3个数量级范围, 其对应的源区则覆盖了从太阳表面以上大约3倍太阳半径的近地轨道附近大约200倍太阳半径的巨大行星际空间。非热高能粒子流在如此巨大的行星际空间中飞行过程中是否会受到其它因素的作用和影响呢? 比如, 在行星际空间是否还存在其它形式的加速过程呢? 如果存在某种行星际空间的加速机制, 那么就有可能在空间甚低频段发现具有反转频率特点的射电III型爆对。通过对这种空间甚低频段射电III型爆对的研究, 将进一步找到行星际空间的重要物理过程, 这对研究空间物理和空间天气都是非常有意义的。

对上述问题的解答, 要求必须拥有具有较高频率分辨率和时间分辨率的空间甚低频射电宽带频谱仪, 能够分辨识别空间甚低频射电III型爆的内部结构特征。那么, 这里又面临一个新的问题: 在空间甚低频段的太阳射电观测的分辨率该取多少为合适呢? 如果

频率分辨率和时间分辨率选得过高, 势必会降低望远镜的灵敏度; 如果分辨率选得过低, 又有可能无法分辨识别射电III型爆的内部精细结构。到目前为止, 还无法给出一个来自观测的依据说明探测器的分辨率应当取多少合适, 只能借助厘米波-米波段的射电频谱精细结构的统计结果来外推。考虑到各频段射电尖峰爆发都是已知最小尺度的太阳射电爆发过程, 很可能对应于太阳爆发中的元过程, 即最小尺度的粒子加速和能量释放过程, 谭宝林等^[32]最近收集了大量来自国内外从厘米波到米波段的尖峰爆发观测事例并进行统计分析, 发现尖峰爆发的频率带宽大约为中心频率的1%, 其平均寿命则随频率的降低而逐渐增加。如果把这一规律外推到空间甚低频段的射电III型爆的内部精细结构上来, 那么, 要识别这种精细结构所需要的频率分辨率至少需要达到观测频率的0.3%, 其时间分辨率则需要至少达到单个尖峰的平均寿命的1/3。照此计算, 则在频率为10~30 MHz之间, 频率分辨率需要达到70 kHz, 时间分辨率需要达到1 s左右; 在3~10 MHz之间, 频率分辨率需要20 kHz, 时间分辨率则需要2 s左右; 以此类推。

空间甚低频射电观测还常常面临大量来自地面各种人工信号干扰的问题, 即使在数万千米高度的地球静止同步轨道上, 这种干扰信号都非常强烈。因此, 人们很自然地将目光投向了月球背面和远离地球的拉格朗日点, 比如L3、L4和L5点等^[33-34]。不过, 这对远距离探测器的定位和测控、数据传输等都提出了极高的要求。

4 结 论

空间甚低频太阳射电III型爆是来自太阳爆发产生的非热高能粒子流在高日冕和行星际空间高速飞行过程的信号。通过对这种信号的探测和研究, 可以直接追踪太阳高能粒子在行星际空间飞行时的演变过程, 并了解行星际空间的各种扰动机制, 还可以探知太阳活动对近地空间粒子环境的作用和影响。这种了解和把握对于当今各种航空、航天、卫星通讯与导航等高技术系统的运行都具有不可替代的作用。人们在空间甚低频波段对太阳射电III型爆开展了大量的观测研究, 已经取得了许多非常重要的成果, 同时也还存在许多亟待解决的问题。这些尚待解决的问题包括需要进一步提高探测器的频率带宽、频率分辨率、时间分辨率, 从而实现在整个空间甚低频段观测到射电III型爆的内部精细结构。“嫦娥四号”中继星上搭载的中荷月基长波射电探测器NCLE, 预计获得频率在0.1~

80 MHz范围的太阳射电III型爆的超宽带频谱观测数据, 并能从中反演出比以往更为丰富的有关该频段射电III型爆的频谱精细结构背后的物理信息, 为更好地开展空间天气事件的预报提供更为可靠的依据。而在空间甚低频段的成像观测方面, 目前在国际上尚属空白, 我们完全有理由相信, 角径达到几度的太阳SVLF射电III型爆的源区不太可能是均匀的, 一定存在内部结构。对这种结构特征的探测和研究, 将会给出许多关于行星际空间物理过程的细节。

参 考 文 献

- [1] HUDSON H S. Global properties of solar flares[J]. *Space Science Reviews*, 2011, 158(1): 5-41.
- [2] FLETCHER L, DENNIS B R, HUDSON H S, et al. An observational overview of solar flares[J]. *Space Science Reviews*, 2011, 159: 19-106.
- [3] AULANIER G, DÉMOULIN P, SCHRIJVER C J, et al. The standard flare model in three dimensions. II. upper limit on solar flare energy[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2012, 549(1): 419-419.
- [4] SCHWENN R. Space weather: the solar perspective[J]. *Living Reviews in Solar Phys*, 2006(3): 2.
- [5] PULKKINEN T. Space weather: terrestrial perspective[J]. *Living Reviews in Solar Phys*, 2007, 4: 1.
- [6] 汪景琇, 季海生. 空间天气驱动源——太阳风暴研究[J]. *中国科学-地球科学*, 2013, 43: 883-911.
WANG J X, JI H S. Recent advances in solar storm studies in China[J]. *Science China-Earth Science*, 2013, 43: 883-911.
- [7] GOPALSWAMY N, MÄKELÄ P. Long-duration low-frequency type iii bursts and solar energetic particle events[J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 721: L62-L66.
- [8] WINTER L M, LEDBETTER K. Type II and Type III radio bursts and their correlation with solar energetic proton events[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809: 105.
- [9] CANE H V, STONE R G. Type II solar radio bursts, interplanetary shocks, and energetic particle events[J]. *The Astrophysical Journal*, 1984, 282: 339-344.
- [10] MANN G, CLASSEN T, AURASS H. Characteristics of coronal shock waves and solar type II radio bursts[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1995, 295: 775-783.
- [11] CANE H V, ERICKSON W C. Solar type II radio bursts and IP type II events[J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 623: 1180-1194.
- [12] LIN R P, POTTER D W, GURNETT D A, et al. Energetic electrons and plasma waves associated with a solar type III radio burst[J]. *The Astrophysical Journal*, 1981, 251: L364-L373.
- [13] DULK G A. Radio emission from the Sun and stars[J]. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 1985, 23: 169-224.
- [14] BASTIAN T S, BENZ A O, GARY D E. Radio emission from solar flares[J]. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 1998, 36: 131-188.
- [15] FAINBERG J, STONE R G. Type III solar radio burst storms observed at low frequencies[J]. *Solar Physics*, 1970, 15: 222-233.
- [16] KAISER M L. The solar elongation distribution of low-frequency radio bursts[J]. *Solar Physics*, 1975, 45: 181-187.

- [17] 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)[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1974, 32: 245-253.
- [18] DULK G A, STEINBERG J L, LECACHEUX A, et al. The visibility of type III radio bursts originating behind the sun[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1985, 150: L28-L30.
- [19] 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[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1989, 217: 237-250.
- [20] HOANG S, POQUERUSSE M, BOUGERET J L. The directivity of solar kilometric type III bursts: ulysses-artemis observations in and out of the ecliptic plane[J]. *Solar Physics*, 1997, 172: 307-316.
- [21] REID H A S, RATCLIFFE H. A review of solar type III radio bursts[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 8: 773-804.
- [22] ALVAREZ H, HADDOCK F T. Decay time of type III solar bursts observed at kilometric wavelengths[J]. *Solar Physics*, 1973, 30: 175-182.
- [23] 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[J]. *Solar Physics*, 2016, 291: 2407-2418.
- [24] TAN B L, MÉSZÁROSOVÁ H, KARLICKÝ M, et al. Microwave type III pair bursts in solar flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 819: 42.
- [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[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16: 82.
- [26] REINER M J, GOETZ K, FAINBERG J, et al. Multipoint observations of solar type III radio bursts from STEREO and wind[J]. *Solar Physics*, 2009, 259: 255-276.
- [27] THEJAPPA G, MACDOWALL R J. A langmuir solitons in solar type III radio bursts: STEREO observations[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 864: 122.
- [28] HUANG J, TAN B L. Microwave bursts with fine structures in the decay phase of a solar flare[J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 745: 186.
- [29] REID H A S, KONTAR E P. Stopping frequency of type III solar radio bursts in expanding magnetic flux tubes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 577: A124.
- [30] MOROSAN D E, GALLAGHER P T, ZUCCA P, et al. LOFAR tied-array imaging of Type III solar radio bursts[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, 568: A67.
- [31] CHEN X Y, KONTAR E P, YU S J, et al. Fine structures of solar radio type III bursts and their possible relationship with coronal density turbulence[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 856: 73.
- [32] 谭宝林, 程俊, 谭程明, 等. 尖峰爆发标度律及其对新一代太阳射电望远镜参数的约束[J]. *天文学报*, 2018, 59(4): 37.
- TAN B L, CHENG J, TAN C M, et al. Scaling-laws of radio spike bursts and their constraints on new solar radio telescopes[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2018, 59(4): 37.
- [33] 纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(2): 150-157.
- JI Y C, ZHAO B, FANG G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far-side[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 150-157.
- [34] 薛长斌, 周晴, 王雷, 等. “嫦娥4号”任务有效载荷系统设计与实现[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(6): 515-521.
- XUE C B, ZHOU Q, WANG L, et al. Design and implementation of payload system in Chang'e-4 mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 515-521.

作者简介:

谭宝林(1966-), 男, 中国科学院国家天文台研究员, 中国科学院大学等离子体天体物理学首席教授, 博士生导师, 主要研究方向: 太阳物理学、太阳射电天文学和等离子体天体物理。

通讯地址: 北京市朝阳区大屯路20号甲中国科学院国家天文台(100101)

电话: (010)64860263

E-mail: bltan@nao.cas.cn

Research Advances of Solar Radio Type III Bursts at Space Very Low Frequencies

TAN Baolin^{1,2}, TAN Chengming^{1,2}, HUANG Jing^{1,2}, CHEN Linjie¹

(1. CAS Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100047, China)

Abstract: Solar non-thermal high-energy particle flows are one of the main triggering sources of the disastrous space weather events. Their main observational manifestation is radio Type III bursts with fast frequency drifting rate. This work introduces the main advances of observational instruments and scientific researches on the solar radio Type III bursts at the space very low frequency (< 30 MHz SVLF) in the world, including the space-based or lunar-based solar SVLF spectral polarimeters with high temporal and spectral resolutions. We also discuss carefully the existing problems on the solar radio observations and related researches, also including the main scientific aims and prospective of the space-based or lunar-based solar SVLF observations.

Keywords: solar activity; solar radio; radio observations; space weather

Highlights:

- The importance and significance of observations at solar radio type III bursts at space very low frequency are given.
- A comprehensive introduction of the main international space SVLF detection equipment and working condition is presented.
- The main research results of solar radio Type III bursts at SVLF in the world are summarized.
- The existing problems on the solar radio observations and related researches, also including the main scientific aims and prospective of the space-based or lunar-based solar SVLF observations are discussed.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]