III型太阳射电爆发精细结构的观测研究

冯士伟^{1*}, 赵飞²

1. 山东大学空间科学与物理学院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 空间科学研究院, 威海 264209;

2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

* E-mail: winfeng@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020-03-01; 接受日期: 2020-04-26; 网络版发表日期: 2020-07-28

国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金项目(批准号: U1831101)资助

摘要 III型太阳射电爆发是一种瞬时的太阳射电辐射增强现象, 在动态频谱上常常表现为由高频向低频快速漂移的宽带射电信号; 为能量电子沿磁力线从日冕向外传播过程中激发的等离子体辐射, 辐射的基频频率接近当地等离子体频率. 某些III型暴具有特殊的形态或精细结构, 包括J, U和N型暴, 反向III型暴和III型暴对, IIIb型暴, 以及III-L型暴. 这些精细结构可用于诊断电子密度、能量电子速度和日冕大气湍流等日冕参数以及预报空间天气, 被视为太阳爆发过程和太阳射电研究的一个关键点; 而且有些精细结构的形成原因仍不明确, 需要进一步研究. 本文将介绍III型暴精细结构的观测研究进展以及将来研究中需要关注的问题.

关键词 太阳射电爆发, III型暴, 射电暴精细结构

1 引言

在太阳射电动态频谱上, 典型的III型暴通常表现为由高频(~GHz)向低频(~几十kHz)快速漂移的太阳辐射瞬时增强的现象. 它是一种最常见的太阳射电暴, 可单支呈现, 亦可多支成群地依次出现.

III型暴对应太阳爆发过程中被加速的能量电子激发的等离子体辐射, 辐射的基频频率接近当地等离子体频率, $f_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{\pi m_e}}$. 相关的能量电子由日冕沿磁力线向行星际传播并一直到达1 AU处, 因此III型暴可视为日冕磁力线开放至行星际空间的表征. 局地处于太

阳风中的仪器设备记录到这些能量电子束流, 而且还探测到与III型暴相关的朗缪尔波, 这直接证实了III型暴对应能量电子激发的等离子体辐射^[1]. 基于这一性质, III型暴可用于计算电子数密度等日冕参数, 常作为一种独特的太阳大气诊断手段.

有些III型暴, 除了存在基频(F)支外, 还有谐频(H)分量, 包括二次甚至三次谐频. H与F的频率之比并不单单是2, 而是处于1.6~2之间, 平均值约为1.8^[2,3]. 某些事例中不同支的频率之比为1.5, 这两支分别是三次和二次谐频^[4,5]. 频率<100 MHz的III型暴, F和H分量可同时看到; 频率>100 MHz时, F和H很少被同时观测到, 可观测到的为H分量^[6,7]. 这种现象可以通过电磁波在

引用格式: 冯士伟, 赵飞. III型太阳射电爆发精细结构的观测研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 35–45

Feng S W, Zhao F. Observational study on the fine structures of solar type III radio bursts (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 35–45, doi: 10.1360/SST-2020-0066

等离子体中的传播效应进行解释. 电磁波在传播过程中当频率接近等离子体频率时, 群速度趋向于零; 频率远大于等离子体频率时, 群速度接近光速; H相对F支, 频率更高于源区区域和传播路径上的等离子体频率, 辐射信号更易/早地由辐射源区传出. 对频率 > 100 MHz的III型暴, 源区的日冕密度高、结构复杂, F支的辐射无法由源区传播出来.

观测显示, 相同频率上F和H的源区大致重合, 无法区分; H与F的频率之比为2时, H的源区位置比F的更低. 这两个观测结果出乎人们的意料. 这是因为, 基于等离子体辐射, 若F和H支的频率相同, H支的源区应位于等离子体频率接近H/2的区域, 而高于频率等于H的区域(F支的源区); 若H为F的二倍频, F和H支的源区同处于等离子体频率为F的位置, H与F支的射电源区高度相同. 研究者试图通过电磁波的折射、反射效应来解释这些观测现象, 但是结果并不理想. 关于F和H的源区大小, Dulk和Suzuki^[8]给出F(43 MHz)和H(80 MHz)的源区大小基本相同或仅有微小差别. 最近, Kontar等人^[9]利用最新的观测数据研究给出, F和H支的源区位置主要是由电磁信号的散射效应而不是辐射源本身决定的, 电磁波的传播效应导致太阳辐射源区尺度的增加.

太阳III型暴还具有圆极化性质. 在日冕中, 磁化等离子体存在两种模式的100%圆极化的电磁波, 正常模(O)和反常模(X), 二者具有完全反向的准圆近似极化特征. 对于X模式的辐射, 电场矢量在射电源区的旋转方向与电子绕磁场的转动方向一致. 两种不同模式的辐射同时被观测到时需要计算净剩余极化量, 即圆极化度——圆极化分量(Stokes V)与总强度(Stokes I)的比值:

$$R_c = \frac{T_{b,x} - T_{b,o}}{T_{b,x} + T_{b,o}},$$

其中, $T_{b,x}$ 和 $T_{b,o}$ 分别表示X模和O模的亮温度^[10]. 圆极化度的大小依赖辐射机制、源区的等离子体参数、电磁波的折射以及波模的耦合.

等离子体辐射的圆极化度受到谐波级数的影响. 观测显示, III型暴的圆极化度比较低, H相对F的更低, 二者的极化模式相同. Dulk和Suzuki^[8]对997例III型暴的极化特性进行了分析, 发现F(H)支圆极化度的平均值和最大值分别为35%(11%)和60%(30%); 圆极化度

大小不依赖于频率的变化; 圆极化度随源区从日心向临边偏移时逐渐减少. Mercier^[11]研究了164~432 MHz频率区间的III型暴, 发现极化强度随频率的增加变高, 从5%(164 MHz)升至15%(432 MHz); 还发现极化强度在射电爆发峰值流量之前或与峰值流量同时达到最大值, 不会出现在峰值之后.

在太阳大气中, O模和X模的截止频率分别为 $f_o=f_p$ 和 $f_x = \frac{1}{2}f_e + \frac{1}{2}\sqrt{f_e^2 + 4f_p^2}$, 其中 $f_e = eB/2\pi m_e c$. III型暴源区的等离子体频率等于(低于)O(X)模的截止频率, X模的辐射被完全阻挡, III型暴的圆极化度应该为100%的O模. 但观测上仍未探测到完全极化的III型暴. 电磁波在传播过程中经过不均匀的日冕大气时, 由磁场引起的模式耦合^[12]和由低频波或动力Alfven波^[13,14]引起的散射能够在一定程度上降低圆极化度, 然而这些因素不足以解释为何未观测到完全极化的III型暴. Wentzel^[13]提出射电源区存在某种程度的内禀消极化过程. 需要指出, 基频辐射的极化方向与O模的旋转方向一致, 这为判断源区视向磁场方向提供了依据.

二次谐波极化的成因比较复杂. 极化强度依赖朗缪尔波的角分布, 假设与磁场相比朗缪尔波仅限于相对小的角内(<20°, 考虑相关的磁场强度, 这种假设是成立的), 可认为二次谐波为O模辐射^[15]. 然而, 在特定情况下, 朗缪尔波呈现各向同性或者波矢与磁场方向垂直, 也可能为X模式主导, 但这种情况并不常见^[16].

目前, 太阳(及其他恒星)中未测量到线极化射电辐射, 这是因为射电信号在穿过太阳(及其他恒星)大气向地球传播过程中受到法拉第效应的影响, 线极化分量可被完全消除^[6].

正如赵仁扬^[17]提到的关于等离子体辐射极化性质的解释是不能令人满意的. III型暴的基频、谐波以及极化特征还需要更多最新的观测数据进行研究. 国内已建成或正在建造一系列太阳射电观测设备, 包括山东大学和云南天文台的太阳射电动态频谱仪以及中国科学院国家天文台和国家空间科学中心的日像仪. 这些仪器记录30 MHz~15 GHz频率区间全频带的太阳射电频谱和太阳射电像; 在即将到来的太阳活跃期将记录大量的数据, 这为III型暴的研究提供了有力的支撑.

III型暴除了基频、谐波等基本特征外, 还有变种/精细结构, 例如, J, U和N型, 反向III型和III型暴对, IIIb

型暴, 以及III-L型暴. 这些精细特征可被用于电子数密度、大气湍动等日冕参数的诊断以及空间天气的预报. 它们是太阳爆发相关过程以及日冕物理研究的一个关键亮点. 高冠男等人^[18]曾对米波和分米波II和III型暴精细结构进行总结, 包括斑马纹、纤维爆发和尖峰辐射. 本文主要关注III型暴精细结构的研究进展以及在相关研究中需要注意的问题.

2 J, U和N型暴

某些III型暴的频率漂移率是变化的, 在射电动态频谱图上呈现J, U或N形, 这些爆发被认为是由约束于闭合冕环中的能量电子束流激发的^[19,20], 如图1所示. 对于J型暴, 当能量电子束流沿闭合冕环由环顶向日面方向传播、辐射频率升高时, 射电辐射停止; 对于U型暴, 能量电子激发的辐射可由低频持续至更高的频率; 对于N型暴, 受磁镜效应的影响, 能量电子束流在激发U型暴的基础上, 反向运动并进一步激发由高频向低频漂移的辐射.

关于激发J, U和N型暴的能量电子的来源. 观测显示有些U型暴可以在几分钟内重复出现, 这表明存在持续注入冕环的能量电子^[21,22]. 最近, Morosan等人^[23]利用射电、极紫外波段的成像数据, 通过分析太阳极

紫外喷流和J型暴的关系, 发现能量电子从极紫外喷流附近区域沿着闭合的磁力线运动, 到达一个高度为360 Mm的闭合冕环的顶部. 极紫外喷流是由新浮现磁通与已有磁场结构重联引起的, 因此激发J型暴的能量电子应该也是在这个磁场重联过程中加速产生的.

J, U和N型暴可用于诊断约束于冕环内的能量电子的速度. 在相关研究中, 有些借助日像仪数据提供的位置信息, 有的完全没有日像仪的观测数据. 借助日像仪的数据, Aschwanden等人^[22]以及Reid和Kon-tar^[24]分别测量出激发J(1.1~1.7 GHz)和U(30~80 MHz)型暴的能量电子的速度, 速度大小分别为 $0.14c \sim 0.21c$ 和 $0.13c \sim 0.24c$ (c 为光速). 在缺少日像仪数据提供的位置信息时, 研究者借助日冕电子数密度模型诊断能量电子的速度. 如, Yao等人^[25]和Fernandes等人^[26]分别给出激发J(1.0~2.8 GHz)和U(0.95~2.5 GHz)型暴的能量电子的速度为 $0.26c \sim 0.38c$ 和 $0.16c \sim 0.53c$.

有些J, U和N型暴还具有谐波结构. Stewart^[3]给出U型暴谐频与基频的频率之比为 1.8 ± 0.14 或 1.91 ± 0.15 . Aurass和Klein^[21]利用OSRA的频谱数据研究了23例U型暴, 发现其中一例事件中两支U型暴上沿频率之比为3:2, 可能分别对应三次和二次谐频. Dorovskyy等人^[27]利用Giant Ukrainian Radio Telescope的观测数据研究了10~70 MHz频率间的一例具有基频、谐频特征

图1 J, U和N型暴, 反向III型暴和III型暴对的太阳射电爆发动态频谱图(左图)和成因(右图)的示意图, f_p 为等离子体频率
Figure 1 Diagram of solar radio dynamic spectra (left) and causes (right) of solar type J, U, N, reverse-slope, and radio type III pair bursts, f_p is the plasma frequency.

的U型暴,发现基频相对谐频分量的时间延迟为7 s,并认为时延是由基频、谐频之间群速度的差异引起的。

最近, Kong等人^[20]通过结合NRH射电成像和SDO/AIA极紫外日冕成像观测,报道了一例清晰的N型暴事件,如图2所示。通过研究,他们证实了该N型暴确实是由同一高能电子束沿大尺度闭合磁场传播并发生反射激发的;另外N型暴的第1支与第2和第3支的源区分别位于大尺度闭合磁场结构的两侧(并具有相反的极化方向)。但是,该研究中NRH射电成像数据的频率点较少,仅150和173 MHz两个频率点,观测数据无法提供N型暴倒转频率处的太阳射电像,而且极紫外成像数据未能观测到与N型暴相关的冕环结构。

上述观测数据未提供与J, U或N型暴相关的极紫外冕环,无法与极紫外观测结果相对比。因此,需要使用最新全频带太阳射电成像数据进行更深入地研究,特别需要注意J, U或N型暴倒转频率处的射电像是否位于冕环的顶部。

3 反向III型暴和III型暴对

还有些III型射电爆发由低频向高频漂移,呈现反向(reverse-slope)III型暴;有时,反向和正常漂移的III型暴在同一频率(反转频率: separate frequency)和时刻发生,即双向频率漂移的III型暴对(radio type III pair)^[28]。

图 2 (a) GAURI记录的50~250 MHz间的太阳射电动态频谱图;“I”、“II”和“III”分别表示N型暴的三条分支,“F”和“H”表示射电暴的基波和谐波。(b) GLASGOW (50~80 MHz), OOTY (80~144 MHz)和ORFEES (144~250 MHz)观测数据拼合成的射电频谱图,黑色加号标记出各个分支在单频点上最强辐射强度的位置,蓝色线通过线性拟合最强辐射强度获得;虚线表示两个NRH成像频率(150和173 MHz)。(c) 四个频率上的射电强度轮廓曲线;需要指出, GLASGOW和OOTY的轮廓曲线已分别移动了1.5和103 s,以保持曲线轮廓的一致性。见Kong等人^[20]文中的图1

Figure 2 (a) Radio dynamic spectrum recorded by GAURI in the frequency range of 50–250 MHz. “I”, “II”, and “III” denote the three branches of the radio type N burst, and “F” and “H” denote the fundamental and harmonic components. (b) A composite spectrum from GLASGOW (50–80 MHz), OOTY (80–144 MHz), and ORFEES (144–250 MHz). The black pluses show the profiles of individual branches by maximum intensity at a given frequency using the ORFEES data and the blue lines are obtained by linearly fitting the data points. Dashed lines indicate the two NRH imaging frequencies (150 and 173 MHz). (c) Temporal profiles of radio intensity at four frequencies from several instruments are plotted in arbitrary units. Note that the spectra of GLASGOW and OOTY have been shifted by 1.5 and 103 s, respectively, to keep the spectral data consistent. See Figure 1 of Kong et al. ^[20].

其中, III型暴对是耀斑爆发过程中能量释放和电子加速的最直接证据, 反映磁场重联以及磁场重联区域的日冕性质.

Aschwanden和Benz^[28]曾给出III型暴对的起始频率处于220~910 MHz, 能量电子加速区的电子数密度为 $6 \times 10^8 \sim 1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. 最近, Tan等人^[29]利用更宽频率范围的观测数据进行统计分析, 结果表明, III型暴对的反转频率在1.08~3.42 GHz之间, 对应的源区等离子体密度为 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, 推断耀斑初始能量释放时重联发生的区域应该在更低的日冕中. 另外, Tan等人^[30]提出, 可以利用III型暴对的观测特征, 直接诊断耀斑能量释放区的空间尺度、等离子体密度、磁场、源区的等离子体比压值以及非热粒子能量等参数. 这使III型暴对的研究有了实际应用价值.

射电动态频谱具有很高的时间分辨率, 反向III型暴和III型暴对可以高时间分辨地反映磁场重联区域的日冕特征. 因此, 二者一直是研究的热点.

研究人员在这个方向做了大量的工作^[31~37]. Ning等人^[34]利用紫金山天文台的观测数据研究了22例反向III型暴, 发现在6 GHz上这些爆发的平均持续时间、准周期大小和频率漂移大小依次为0.1~2 s, $2.0 \pm 0.6 \text{ s}$ 和 7.0 GHz s^{-1} ; 并提出准周期特征的形成原因: (1) 同一位置处磁场重联的准周期过程, (2) 耀斑过程中存在空间无法分辨的随机过程. 近期, Tan等人^[37]在研究中给出一次伴随X1.3级耀斑的射电暴, 分析了其中的III型暴对、随机出现的窄带尖峰爆发和叠加在II型暴上类似尖峰爆发的辐射, 指出其中的III型暴对是由重联加速的双向非热电子出流激发的.

另外, Feng等人^[35]研究了发生于2014年8月24日的一次有趣的日冕射电爆发事件, 该事件存在II型和反向III型暴. Feng等人联合使用太阳射电动态频谱和射电、极紫外波段的成像观测数据, 发现反向III型暴的辐射源区位于日冕抛射体内并且似乎与该处的磁场重联相关, 如图3所示. 但是, 在此项研究中太阳射电像的频率点也较少, 观测数据无法提供反向III型暴起始频率处的源区位置.

鉴于反向III型暴和III型暴对在研究日冕活动、诊断日冕参数等方面的独特作用, 我们需要更多高分辨率的全频射电成像数据开展更深入的研究. 特别是, III型暴对反转频率处的射电源区对应能量电子的加速、形成区, 即磁场重联和能量释放的位置. 这种射电

爆发的成像观测研究有助于我们确认磁场重联发生区域的时空性质.

4 IIIb型暴

III型暴有时伴有IIIb型暴, 表现为IIIb-III型暴的基频-谐频对^[38]. 在动态频谱上, IIIb型暴由许多分散的、频率漂移非常小的条带状辐射组成, 这些条带按照频率大小依次排列成链条结构; 整个链条的形态、频漂与普通III型暴的类似, 如图4所示.

观测表明, 单个辐射条带的带宽与条带之间的频率间隔相似, 约60~100 kHz; 条带的持续时间、流量和频率漂移随其源区在太阳表面位置的移动而变化^[39]. IIIb型暴的条纹结构在基频分量上比较清晰, 谐频分量中不够清晰. 但是, 有时在谐频支中也能辨识出条带结构, 可呈现IIIb-IIIb型基-谐频暴^[40]. 关于IIIb型暴的成因, Takakura和Yousef^[41]最先指出, IIIb型暴是由能量电子束流传播路径上的日冕电子密度涨落引起的, 如图4所示. 后来, Kontar^[42]的研究证实了该说法, 他们利用数值模拟的方法进行研究, 发现日冕等离子体的密度不均匀性引起朗缪尔波的块状(clumpy)分布, 导致IIIb型暴的形成. 此外, 基于电子回旋脉泽辐射机制, Zhao等人^[43]和Wang^[44]分别指出线极化的均匀Alfven波和超低频波(ultra-low-frequency)可以调制电子回旋脉泽辐射过程, 产生IIIb型暴中的带状结构. 需要说明的是, IIIb型暴形成的等离子体辐射机制被更多研究者接受.

基于等离子体辐射机制, Loi等人^[45]指出IIIb型暴中的条纹结构可用于诊断日冕和太阳风中的密度不均匀性. 近期, 多位学者使用最新的射电频谱和成像数据通过IIIb型暴诊断日冕大气湍流大小, 以理解电磁波传播效应对观测到的射电像尺寸和亮温的影响^[40,42,46~48].

Kontar等人^[9]使用LOFAR高时间、空间和频率分辨率的数据通过将IIIb型暴源区固有属性与电磁波的传播效应解耦, 给出了IIIb型暴的属性及其辐射在不均匀大气中传播时受到的影响. 他们给出IIIb型暴的源区尺度为 $20'$, 推测出真实的源区大小约为 $0.1'$. 电磁波的传播效应而不是射电源本身决定了所观测到的源区空间尺度. 这个研究结果为定量研究电磁波传播路径上日冕大气湍流提供了依据, 也有利于更精确地计算射电暴源区的亮温度. Mugundhan等人^[47]利用两单元的

图 3 三条III型暴的射电频谱图((a), (b))和成像数据((c)~(h)). (a), (b) 射电动态频谱图, 图中叠加了归一化的流量密度曲线(白色)和NRH T_B 曲线(黑色); 三个加号标示出432 MHz上选取的NRH记录数据的时刻, 三个时刻的源区位置在(h)中给出; 三对短箭头指出反向漂移III型暴的大致时间段. (c)~(h) 12:13 UT左右AIA在211和304 Å波段上的图像, 图中抛射体内有疑似磁场重联特征, 箭头指向一对平行的日珥结构及其形态变化. 见Feng等人^[35]文中的图5

Figure 3 Radio spectral ((a), (b)) and imaging data ((c)~(h)) for the three episodes of type IIIs. (a), (b) Dynamic spectra overplotted by the normalized flux profiles (white) and NRH T_B curves (black). The three pluses show the selected points at 432 MHz at which the NRH sources are presented in (h). The pairs of vertical short arrows present the estimated durations of the reversely drifting part of type IIIs. (c)~(h) The imaging sequence of AIA at 211 and 304 Å around 12:13 UT, to show the signature of the suspected reconnection within the ejecta. The arrows point to the pair of parallel filamentary structures and their morphology change. See Figure 5 of Feng et al. ^[35]

射电干涉阵列在53 MHz上测量IIIb型暴, 该阵列的基线长为200 km, 角分辨率为3". 他们发现在53 MHz上可以观测到角大小 $<15''$ 的瞬时IIIb型暴, 这与Kontar等人^[9]给出的结果差别较大.

日冕大气密度涨落的诊断结果主要有, 幅度为 $\Delta n/n=10^{-3}$, 尺度小于1000 km, 传播速度为400~800 km s⁻¹; 日冕密度涨落的谱指数为-1.7, 接近Kolmogorov扰动谱指数(-5/3)^[40,46,48].

可见, IIIb型暴在诊断日冕大气湍动方面具有重要的作用, 而其源区大小仍存在较大争议. 电磁波特别是低频信号在日冕中传播时受到反射、折射的影响较大, 这些传播效应目前还无法准确确定. 因此, 需要更多更深入地研究. 特别是, 对III-IIIb型暴的研究, 应关

注其中III型与IIIb型暴源区位置的异同, 分析判断他们所受电磁波传播效应的影响.

5 III-L型暴

III-L型暴是一种持续时间长、流量密度大的III型暴, 经常出现在低频频段, 呈现的形态较为复杂, 如图5所示. 由于其形态复杂, 曾被命名为复杂的III型暴 (complex type III)、激波加速(shock accelerated, SA)或激波伴随(shock associated, SA)的事件. 相关能量电子的起源也曾出现多种说法: (1) 爆炸激波(blast-wave)加速的能量电子束流, 即激波加速的事件, 与激发II型暴中herringbone的能量电子的成因类似^[49]; (2) 耀斑过

图 4 IIIb型暴动态频谱谱形(a)和成因(b)的示意图, f_p 为等离子体频率

Figure 4 Diagrams of solar radio dynamic spectra (a) and causes (b) of solar type IIIb radio bursts, f_p is the plasma frequency.

图 5 (网络版彩图)III-L型太阳射电爆发动态频谱谱形(a)和成因(b)的示意图, f_p 为等离子体频率

Figure 5 (Color online) Diagrams of solar radio dynamic spectra (a) and causes (b) of solar type III-L radio bursts, f_p is the plasma frequency.

程中加速的能量电子, 即激波伴随的事件^[50,51], (3) 耀斑爆发时低日冕中被加速的电子束流在传播路径上遇到激波, 能量电子被激波进一步加速^[52,53], 即激波伴随的事件, 如图5所示。

III-L型暴究竟是激波加速还是激波伴随的事件取决于它与相关II型暴的关系。由于激发II型暴的能量电子是由激波加速产生的, 这些高能电子也可激发III-L型暴。在太阳射电动态频谱图上, 多数III-L型暴伸展至或起源于II型暴, 起始频率在100~500 MHz之间, 并随时间降低。激发III-L和II型暴的能量电子均由激波

加速, 为激波加速的III-L型暴事件。然而, 通过分析较宽频率区间的太阳射电动态频谱, 研究者发现III-L型暴的起始频率可高于II型暴, 持续时间也能超过II型暴, 甚至有时没有相关联的II型暴, 应为激波伴随III-L型暴事件。可见, 激发III-L型暴的能量电子的起源仍存在争议, 需进一步研究, 特别是借助射电成像观测数据。

III-L型暴受到关注的另一个原因是, 它与太阳高能粒子(solar energetic particle, SEP)事件具有很强的相关性。研究表明, 大约70%以上的SEP事件伴有III-L

型暴^[50,54,55]. SEP事件是空间天气中一种最重要的危害, 强的SEP事件可引起卫星失灵、损害宇航员身体健康. SEP事件主要是由日冕中加速的高能质子(能量达到10~100 MeV)引起的. 理论上, 加速质子的日冕环境也很容易加速电子; 另外, 高能电子更容易产生电磁波辐射, 这些电磁波相对高能质子较早地到达地球. 因此, 人们很自然地想到寻找一种电磁辐射来预报SEP事件.

III-L型暴是SEP事件的一种预警器, 我们可通过对III-L型暴的研究揭示SEP的形成机制. 为更好地预报SEP事件, 需要开展如下问题的研究: (1) III-L型暴持续时间长和形态复杂的成因是什么? (2) III-L型暴与II型暴源区的相对位置关系是怎样的? (3) 如何利用III-L型暴预报SEP事件发生的时间、强度等? 这些问题的研究均需要使用全频带的太阳射电成像数据, 我国新建的射电日像仪将在相关研究中发挥重要的作用.

6 总结

太阳射电爆发已有70多年的研究历史, 尽管III型暴是其中一种最常见的射电爆发, 目前有关它的研究仍存在许多问题, 如射电爆发源的极化性质、尺度大小、亮温高低等属性, 如表1所示.

(1) J, U和N型暴在太阳射电动态频谱图中呈现J, U和N形; 常出现在米波和十米波波段; 同时具有基频和谐频支; 具有圆极化特征; 为约束于冕环内的电子束流激发的辐射; 可用于诊断冕环的电子数密度和能量

电子的速度; 存在的问题是, 射电源区的属性以及相关冕环的性质缺乏研究.

(2) 反向III型暴和III型暴对在太阳射电动态频谱图中呈现反向频率漂移、正反向频率漂移对; 常出现在分米波和米波波段; 一般为谐频支; 具有圆极化特征; 为向日面、同时向日面和行星际传播的电子束流激发的辐射; 可用于确定能量电子的速度和电子加速区的位置和尺度等参数; 存在的问题是, 能量电子加速区的位置和尺寸不明确.

(3) IIIb型暴在太阳射电动态频谱图中呈现条带状且多个条带包络成III型暴的形状; 常出现在十米波波段; 基频较清晰; 具有圆极化特征; 由途经日冕大气湍流的电子束流激发; 可用于诊断日冕湍流大小、确定湍流对射电观测像的影响; 存在的问题是, IIIb型暴与III型太阳射电爆发的关系和IIIb型暴射电源区的性质.

(4) III-L型暴在太阳射电动态频谱图上表现出低频、复杂、持续时间长的性质; 通常从II型暴谱中伸展出来; 常出现在十米波波段; 谐频较多; 极化特征不明确; 或由途经CME驱动激发的电子束流激发; 可用于预警SEP事件; 存在的问题是, 驱动III-L型暴的电子束流的成因以及III-L型暴的极化性质不清楚.

鉴于III型暴精细结构在诊断日冕参数方面的独特作用, 需利用我国自主研发设备记录的最新高分辨射电数据对III型暴及其精细结构进行更深入的研究, 诊断日冕参数; 并将这些研究和诊断结果与其他电磁波段观测设备(SDO/AIA, STEREO和Hinode)的测量结果进行对比, 以更深入地理解太阳爆发过程

另外, 由于III型暴是一类频率跨度很宽的爆发现

表 1 III型射电爆发精细结构的谱形特征、频率范围、极化性质、形成原因、应用以及在研究中存在的问题

Table 1 The spectral shapes, frequency ranges, polarizations, causes, applications, and problems on the study of solar type III radio burst fine structures

类型	谱形	波段	谐波	极化	成因	应用	问题
J, U和N型	J, U和N形	米、十米波	基频和谐频	圆极化	冕环内的能量电子束流激发	诊断冕环的密度和能量电子的速度	射电源区的属性、相关冕环的性质
反向III型、III型暴对	反向频率漂移、正反向频率漂移对	分米、米波	谐频	圆极化	向日面、同时向日面和行星际传播的电子束流激发	确定能量电子的速度和电子加速区的位置、尺度等	能量电子加速区的位置、尺寸
IIIb型	条带状且多个条带包络成III型暴状	十米波	基频较清晰	圆极化	途经日冕大气湍流的电子束流激发	诊断日冕湍流大小, 确定湍流对射电观测像的影响	与III型太阳射电爆发的关系, 射电源区的性质
III-L型	低频、复杂、持续时间长, 由II型暴中伸出	十米波	谐频	\	途经CME驱动激发的电子束流激发	预报SEP事件	电子束流的成因, 极化性质

象, 在不同频段可以揭示不同区域的物理特征. 比如, 在厘米、分米波段的III型暴反映耀斑源区的一些物理特征、粒子加速过程等; 在米波、十米波段的III型暴反映高层日冕中的扰动特征; 在甚低频段的III型暴可以揭示行星际空间的扰动和传播特征等. 我国在北京、内蒙古、昆明、威海等地拥有不同频段的射电频谱仪, 我们需要将这些观测数据结合起来, 实现从高频到低频对太阳射电III型暴及其精细结构开展全面的研究, 构建完整的物理图像. 再结合射电以及其他电磁波段的成像观测数据, 确定射电爆发源区的位置, 分析太阳大气参数以及大气扰动, 构建全方位的、多层的太

阳画像.

最后, 我们知道太阳射电爆发包括微波爆发、I-V型暴以及斑马纹、尖峰辐射等精细结构. 本文主要关注III型暴是因为它的如下两特征: (1) 发生频次高、最为常见, 跨越频带宽; (2) 等离子体辐射的形成机制已被局地观测证实. 这两特点使得III型暴既容易被观测到又有较清晰的物理图像, 也便于人们认识和理解. 当然, 我们随后将总结其他类型射电暴精细结构的研究进展, 以加深人们对其他类型射电暴的认识, 以及进一步促进我国太阳射电领域的技术发展和设备研制.

参考文献

- 1 Lin R P. Non-relativistic solar electrons. *Space Sci Rev*, 1974, 16: 189–256
- 2 Wild J P, Murray J D, Rowe W C. Harmonics in the spectra of solar radio disturbances. *Aust J Phys*, 1954, 7: 439–459
- 3 Stewart R T. Harmonic ratios of inverted-U type III bursts. *Sol Phys*, 1974, 39: 451–458
- 4 Zheleznyakov V V, Zlotnik E Y. On the third harmonic in solar radio bursts. *Sol Phys*, 1974, 36: 443–449
- 5 Brazhenko A I, Melnik V N, Konovalenko A A, et al. Search for the third harmonic of type III bursts radio emission at decameter wavelengths. *Odessa Astronom Publ*, 2012, 25: 181–183
- 6 Suzuki S, Dulk G A. *Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths (A87-13851 03-92)*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 1985
- 7 Robinson P A, Cairns I H. Fundamental and harmonic emission in type III solar radio bursts—III. Heliocentric variation of interplanetary beam and source parameters. *Sol Phys*, 1998, 181: 363–394
- 8 Dulk G A, Suzuki S. The position and polarization of type III solar bursts. *Astron Astrophys*, 1980, 88: 203–217
- 9 Kontar E P, Yu S, Kuznetsov A A, et al. Imaging spectroscopy of solar radio burst fine structures. *Nat Commun*, 2017, 8: 1515–1524
- 10 Dulk G A. Radio emission from the sun and stars. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1985, 23: 169–224
- 11 Mercier C. Polarisation of type III bursts between 164 and 435 MHz: Structure and variation with frequency. *Sol Phys*, 1990, 130: 119–129
- 12 Zheleznyakov V V, Zlotnik E Y. Polarization of radio waves passing through a transverse magnetic field region in the solar corona. *Soviet Astron*, 1964, 7: 485–491
- 13 Wentzel D G. Polarization of fundamental type III radio bursts. *Sol Phys*, 1984, 90: 139–159
- 14 Melrose D B. Depolarization of solar bursts due to scattering by low-frequency waves. *Sol Phys*, 1989, 119: 143–156
- 15 Melrose D B, Dulk G A, Smerd S F. The polarization of second harmonic plasma emission. *Astron Astrophys*, 1978, 66: 315–324
- 16 Willes A J, Melrose D B. The polarization of second harmonic coronal type III bursts. *Sol Phys*, 1997, 171: 393–418
- 17 Zhao R Y. *Solar Radio Emission Theory* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999 [赵仁扬. 太阳射电辐射理论. 北京: 科学出版社, 1999]
- 18 Gao G N, Lin J, Wang M, et al. Research and observation of metric and decimetric type II and type III solar radio bursts with fine structures (in Chinese). *Prog Astron*, 2011, 30: 35–47 [高冠男, 林隽, 汪敏, 等. 太阳米波和分米波II型、III型射电暴及其精细结构观测研究进展. 天文学进展, 2011, 30: 35–47]
- 19 Maxwell A, Swarup G. A new spectral characteristic in solar radio emission. *Nature*, 1958, 181: 36–38
- 20 Kong X, Chen Y, Feng S, et al. Observation of a metric type N solar radio burst. *Astrophys J*, 2016, 830: 37–44
- 21 Aurass H, Klein K L. Spectrographic and imaging observations of solar type U radio bursts. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 1997, 123: 279–304
- 22 Aschwanden M J, Bastian T S, Benz A O, et al. Decimetric solar type U bursts—VLA and PHOENIX observations. *Astrophys J*, 1992, 391: 380–392
- 23 Morosan D E, Gallagher P T, Fallows R A, et al. The association of a J-burst with a solar jet. *Astron Astrophys*, 2017, 606: A81–A92

- 24 Reid H A S, Kontar E P. Imaging spectroscopy of type U and J solar radio bursts with LOFAR. *Astron Astrophys*, 2017, 606: A141
- 25 Yao J X, Tlamicha A, Wei F S, et al. Analysis of a solar decimetric U-type burst. *Chin Astron Astrophys*, 1997, 21: 221–228
- 26 Fernandes F C R, Dutra J A S S, Cunha da Silva R D, et al. Flaring loop parameters estimated from solar decimeter type U-like and type J-like fine structures. *Adv Space Res*, 2012, 49: 1607–1614
- 27 Dorovskyy V V, Melnik V N, Konovalenko A A, et al. Decameter U-burst harmonic pair from a high loop. *Sol Phys*, 2015, 290: 181–192
- 28 Aschwanden M J, Benz A O. Electron densities in solar flare loops, chromospheric evaporation upflows, and acceleration sites. *Astrophys J*, 1997, 480: 825–839
- 29 Tan B, Mészárosóvá H, Karlický M, et al. Microwave type III pair bursts in solar flares. *Astrophys J*, 2016, 819: 42
- 30 Tan B L, Karlický M, Mészárosóvá 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
- 31 Huang G L, Qin Z H, Yang G, et al. The energetic spectrum of non-thermal electrons in an acceleration region calculated from a solar microwave type III burst with both positive and negative frequency drifts. *Astrophys Space Sci*, 1998, 259: 317–326
- 32 Ning Z J, Fu Q J, Lu Q K. Type III burst pair. *Sol Phys*, 2000, 194: 137–145
- 33 Ma Y, Zheng X M. Analysis of characteristics of type III drift pair bursts. *Publ Yunnan Obs*, 2002, 90: 22–28
- 34 Ning Z, Ding M D, Wu H A, et al. Microwave type III bursts and pulsation groups. *Astron Astrophys*, 2005, 437: 691–697
- 35 Feng S W, Chen Y, Song H Q, et al. An imaging study of a complex solar coronal radio eruption. *Astrophys J*, 2016, 827: L9
- 36 Tan B L, Karlický M, Mészárosóvá 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
- 37 Tan B L, Chen N H, Yang Y H, et al. Solar fast-drifting radio bursts in an X1.3 flare on 2014 April 25. *Astrophys J*, 2019, 885: 90
- 38 de La Noe J, Boisshot A. The type III B burst. *Astron Astrophys*, 1972, 20: 55–62
- 39 Melnik V N, Brazhenko A I, Frantsuzenko A V, et al. Properties of decameter IIb-III pairs. *Sol Phys*, 2018, 293: 26–41
- 40 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. *Astrophys J*, 2018, 856: 73–81
- 41 Takakura T, Yousef S. Type IIIb radio bursts: 80 MHz source position and theoretical model. *Sol Phys*, 1975, 40: 421–438
- 42 Kontar E P. Dynamics of electron beams in the solar corona plasma with density fluctuations. *Astron Astrophys*, 2001, 375: 629–637
- 43 Zhao G Q, Chen L, Wu D J. Solar type III radio bursts modulated by homochromatic Alfvén waves. *Astrophys J*, 2013, 779: 31–37
- 44 Wang C B. A scenario for the fine structures of solar type IIIb radio bursts based on electron cyclotron maser emission. *Astrophys J*, 2015, 806: 34–43
- 45 Loi S T, Cairns I H, Li B. Production of fine structures in type III solar radio bursts due to turbulent density profiles. *Astrophys J*, 2014, 790: 67–79
- 46 Mugundhan V, Hariharan K, Ramesh R. Solar type IIIb radio bursts as tracers for electron density fluctuations in the corona. *Sol Phys*, 2017, 292: 155–167
- 47 Mugundhan V, Ramesh R, Kathiravan C, et al. The first low-frequency radio observations of the solar corona on ≈ 200 km long interferometer baseline. *Astrophys J*, 2018, 855: L8
- 48 Sharykin I N, Kontar E P, Kuznetsov A A. LOFAR observations of fine spectral structure dynamics in type IIIb radio bursts. *Sol Phys*, 2018, 293: 115–130
- 49 Cane H V, Stone R G, Fainberg J, et al. Radio evidence for shock acceleration of electrons in the solar corona. *Geophys Res Lett*, 1981, 8: 1285–1288
- 50 Cane H V, Erickson W C, Prestage N P. Solar flares, type III radio bursts, coronal mass ejections, and energetic particles. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1315–1327
- 51 Reiner M J, Karlický M, Jiříčka K, et al. On the solar origin of complex type III-like radio bursts observed at and below 1 MHz. *Astrophys J*, 2000, 530: 1049–1060
- 52 Bougeret J L, Zarka P, Caroubalos C, et al. A shock associated (SA) radio event and related phenomena observed from the base of the solar corona to 1 AU. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 2513–2516
- 53 Gopalswamy N, Mäkelä P. Long-duration low-frequency type III bursts and solar energetic particle events. *Astrophys J*, 2010, 721: L62–L66
- 54 Cliver E W, Ling A G. Low-frequency type III bursts and solar energetic particle events. *Astrophys J*, 2009, 690: 598–609

- 55 Duffin R T, White S M, Ray P S, et al. Type III-L solar radio bursts and solar energetic particle events. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2009. Abstract ID. SH33A-1475

Observational study on the fine structures of solar type III radio bursts

FENG ShiWei¹ & ZHAO Fei²

¹ Shandong Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, School of Space Science and Physics, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China;

² National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Solar type III radio bursts are transient radio radiation enhancement phenomena, which appear in the solar radio dynamic spectrum as signals that rapidly drift from high to low frequencies. The bursts are believed to be the plasma emissions excited by energetic electrons that propagate outward from the corona along the magnetic field lines, and the emission frequency is close to the local plasma frequency. Certain type III radio bursts have special morphologies or fine structures, such as the types J, U, and N and the inverted/bi-directional drift types III, IIIb, and III-L radio bursts. These fine structures can be used to diagnose the coronal parameters, such as the electron densities, atmospheric turbulences, and energetic electron velocities. In addition, these structures can forecast the space weather. The burst was regarded as the key point in the study of solar eruptions and solar radio bursts. The reasons for the appearance of fine structures are still unclear, and further studies are needed. This article investigates the progress made by the observational studies of the fine structures of the solar type III radio burst.

solar radio burst, type III burst, solar radio burst fine structure

doi: [10.1360/SST-2020-0066](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0066)