

行星低频射电爆发的空间探测进展

平劲松^{1,2}, 王明远^{1,2}, 张 墨^{1,2}, 陈林杰^{1,2}, 董 亮^{2,3}, 武宇翔^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院大学 天文学与空间科学学院, 北京 100047;
3. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650011)

摘 要: 在低频电磁波频带, 部分行星类天体不仅存在热辐射, 还存在非热的爆发辐射。其中代表性的非热辐射是行星极光射电辐射爆发, 包括千米波爆发、木星百米波爆发及10米波爆发。人类对太阳系的这些射电爆发已经开展了数十年的地面和空间探测, 这些探测方法可以作为遥感手段拓展用于对木星磁场及其内部构造的探测。然而, 关于行星射电爆发及其变化特性和机理尚未得到完全揭示, 还有许多待解之谜。太阳系外其它行星系统极可能发生类似木星的低频射电爆发。随着空间探测技术的发展, 射电天文学领域在低频波段的观测能力延展覆盖到了千米、10千米波长的电磁波。未来在空间采用大型低频射电阵列有可能在揭示行星爆发机理和探测系外行星方面做出贡献。已实施的“嫦娥四号”月球探测任务携带的低频射电探测设备, 作为探路者有机会在地球和木星射电爆发探测方面进行探索, 获得数据并积累更多的经验。

关键词: 行星; 射电爆发; 极光; 地球; 木星

中图分类号: P185.4+6

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)01-0080-12

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20200016

引用格式: 平劲松, 王明远, 张墨, 等. 行星低频射电爆发的空间探测进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(1): 80-91.

Reference format: PING J S, WANG M Y, ZHANG M, et al. Introduction of space exploration progress for planetary radio burst emission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(1): 80-91.

引 言

太阳系大行星和少量天然卫星存在射电波段的能量辐射现象。小尺度的行星类天体表面或大气在射电低频波段辐射电磁波信号, 覆盖数十kHz~数十MHz的频带。相较于恒星、星系和类星体等天体的射电辐射, 行星类型的天体射电辐射能量较弱。20世纪60年代以来, 借助地面和空间探测手段, 在射电波段已收到过几乎所有太阳系大行星的射电辐射。探测记录到的太阳系行星射电频谱特征非常不同, 表明类地行星和气体巨行星具有不同特性^[1-4]。

包括月球在内的类地星体的射电辐射一般是次表层和表层的热辐射, 而对固体行星的射电辐射测量在一定程度上可以探测到其稀薄大气的性质。除了热辐射, 空间和地面低频观测手段还探测到了来自地球、木星、天王星和海王星的射电爆发辐射^[4]。在射电爆发频谱方面, 地球的射电爆发集中在千米波波长附近; 木星等巨型气体行星的射电爆发表现为两类: 一类在短波高频段, 另一类在短波的低频段和中波波段。

目前为止的研究认为导致太阳系行星射电爆发辐射可能的机理是: 太阳系中地球和4个巨型气体行星的外层大气存在磁层, 穿越磁层飞行的电子能力被增强到数千至数兆电子伏特, 这些高能电子会在行星冕区域和磁极上空区域密集辐射非热低频的电磁波^[4-5]。行星射电爆发辐射存在寻常(O)模式和非寻常(X)模式。初步认为发生在这些射电行星磁层内部的局部电子回旋频率不稳定变动, 可能是产生行星极区射电辐射的通常机制, 而且这些爆发辐射还会受到太阳风和环绕行星的卫星运动的干扰、调制。此外, 行星大气中发生的雷电现象, 是产生行星低频射电辐射的另一个原因。

这些射电辐射源位于太阳系内, 在辐射频段看起来很亮。其中木星射电辐射长期处于活跃期, 等效亮度落在10米波段, 主要的爆发辐射频率可以达到40 MHz, 在地面上就可以观测到。其它气体行星和地球的射电爆发辐射频率低于1 MHz, 由于这些频率远远低于地球电离层等离子体的截止频率, 无法达到地球表面,

收稿日期: 2019-03-13 修回日期: 2019-03-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11941003); 中科院与荷兰科技组织射电天文国际合作项目(GJHZ1867); 嫦娥四号月球着陆探测NCLE载荷专项(2016年); 北京市科技委专项基金(2018年)

所以无法在地球表面被探测到。

对太阳系行星低频射电爆发的观测手段包括地面手段和空间手段^[4,6-8]。地面观测聚焦在高频(High Frequency, HF)(3~30 MHz)和甚高频(Very High Frequency, VHF)(30~300 MHz)低频波段,主要有两类技术:工作在HF~VHF波段的大型射电天文阵列和近年来在发展的日像仪阵列,这些大型阵列如荷兰的低频射电阵(LOW Frequency ARray, LOFAR)、印度的大型米波射电望远镜(Giant Metrewave Radio Telescope, GMRT)、乌克兰的T形射电望远镜阵(Ukrainian T-shaped Radio telescope, UTR-2)、美国境内的甚大阵(Very Large Array, VLA)和中国的明安图日像仪阵列等在开展针对恒星、星系和太阳的射电观测同时,顺带在相同波段开展对行星射电爆发的监测;针对木星的低频无线电(Radio JOVE)简易观测设备,在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)木星观测计划驱动下,由全球专业人员和业余无线电爱好者使用振子天线开展的木星射电HF~VHF波段爆发监测。其中后者的长期连续监测,为木星射电爆发的规律统计做出了巨大贡献。空间观测覆盖的频段拓展到全部HF、MF(0.3~3 MHz)和部分LF(30~300 KHz)频段,在单独的空间探测器或探测器阵列上搭载射电天线、电场感应载荷、磁场感应载荷等实施飞掠、绕飞监测。这些探测器克服了地球电离层的阻碍,在HF的中低频段更清晰地检测到了木星的爆发特性,并在MF频段看到了地球、木星、天王星和海王星的射电爆发辐射。

行星射电爆发的观测,除了揭示行星自身等离子体环境物理特性之外,理论上还提供了一个途径去探索系外行星^[9],包括在HF波段探测系外类木行星、在MF波段和HF低频段探索系外类地行星。可以预期,对系外行星射电爆发的直接探测,将是发现更多系外行星以及解开系外行星演化特征的重要手段之一。这个发展方向将是牵引未来空间低频射电波段射电天文科学探测的两个主要科学目标之一,与宇宙黑暗时代的探测并列。

行星射电爆发的地基观测和空间测量相互补充。空基观测可以提供更低频率的有用信息。射电辐射的精细结构牵引并提供了对于冕层等离子体研究的遥感探测可行性。采用空间低频阵列模式的探测可以获取目标的快照,进而观测小时尺度的行星辐射变化特性。未来在月球空间或深空开展更系统的卫星集群观测是一个很有竞争力的发展方向。

1 地球极光千米波射电爆发探测

在地球高纬地区上空,太阳风沿着地球磁力线高速进入到南北磁极附近的高层大气中,其携带的大量高速带电粒子撞击地球高层大气中的气体分子或原子,激发产生电磁风暴和极光。携带电磁波、电场、磁场等仪器的空间探测器从空间看地球发现,地球是一个电磁辐射很强的天然射电源,地球大气在极光区域有HF和MF频带的射电爆发辐射发生,辐射频率最低可至数kHz,辐射能量可达107~108 W,而且部分爆发与地球的磁暴有关联。其最大谱密度集中在250~350 kHz带域,波长约为1 km,又称为地球极光千米波爆发(Aurora Kilometer Radiation, AKR)^[10-14]。

地球AKR辐射如果来自等离子体热辐射,则这类辐射会对应极高的大于 10^{15} K的亮温度,比任何行星等离子层等离子体温度都高。它无法用一个热辐射生成机制来解释,也不能用诸如等离子体不稳定这样的相干辐射过程来解释。AKR辐射由相对论电子的回旋不稳定产生,主要产生X-模电磁波。AKR的主要辐射发生在地球极光区域的夜间那一半,磁纬度高于 65° ,高度为5 000~15 000 km。其强度在亚爆发生期间、伴随着磁层活动的增强而增强,Benediktov等首次注意到了这个现象^[10],后续研究也证实了这一现象^[11-14]。在AKR辐射源附近,有可能激励其更低频率的爆发辐射,如1 min尺度的AKR爆发辐射就与一种10~60 kHz的地球射电辐射爆发密切相关。迄今为止关于AKR的产生机理和理论模型并没有清晰解明,仍然是开放问题。

日本与美国合作的地球磁尾探测器GEOTAIL使用MH频带的射电观测设备和更低频段的电场探测设备获得了大量的地球AKR探测数据,证实了部分之前研究获得的模型和机理^[15]。图1是使用GEOTAIL卫星1993年1月30日在轨探测数据给出的地球射电爆发AKR频谱的一个实例(<http://space.rish.kyoto-u.ac.jp/gtlpwi/gtldata.html>)。

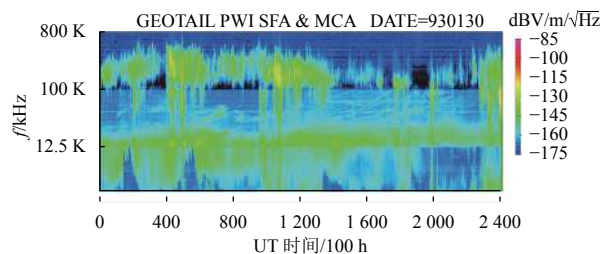


图1 GEOTAIL卫星1993年1月30日在轨探测到的地球射电爆发频谱
Fig. 1 Spectra of the Earth AKR burst detected by GEOTAIL on Jan. 30, 1993

GEOTAIL卫星在轨工作20余年,积累了大量观测数据。通过地球磁尾探测器GEOTAIL收集分析长期的AKR射电辐射数据,发现AKR连续辐射部分的辐射频率分布变化表现出与地球自转的世界时关联变化特性^[16],而且显示出弱的类似季节尺度的变化特征^[16-17]。这表明地球是一个旋转调制的变化着的射电源,同时说明地球的磁层与电离层存在物理耦合过程^[18]。值得注意的是,这个类似季节尺度的变化机理特征并未得到解决,它是否与日、地、月空间位置变化关联,进一步地是否存在地球以及太阳的潮汐调制,也仍然是待解决的问题。

在200 kHz以下到数十kHz的千米连续波辐射是一种磁层非热辐射,它是所有行星磁层的基本电磁辐射之一,起源于行星大气的等离子体层,在等离子层顶部、密度缺口区、空腔梯度区等一些特殊区域发生概率很高。可以确认的是密度梯度下的模式转换对激发这类辐射起着重要作用^[4,18]。观测表明这类辐射由一个磁层俘获成分和一个逃逸成分组成,存在一个难以理论解释的窄带精细结构。尽管已经被观测研究了近50年,关于这类辐射是如何发生的,仍然有未解明的理论问题,以及更多的关于这类辐射与磁层动力学关系的未知问题。这些诸如与等离子体层缺口边缘或缺口结构关联的窄维度集束结构窄带域精细结构,提供了一个新的机会来观测触发这些辐射以及探索等离子体层动力学关系。

相比较于单一探测器的频谱探测,无论是探测地球的千米波AKR爆发辐射还是千米连续波辐射,如采用多探测器同步在轨观测,获得探测信息,对于提供分离时、空效应和验证现有理论都至关重要。进一步地,在辐射发生的不稳定性开始和增长期间都实施这种多探测器的同步观测,并监测大尺度等离子体的动力学特性,有很大机会促进描绘发生这种辐射的最佳理论研究取得重大进展。一个典型的例子是,研究者使用Cluster星座多个卫星同步获得的宽带数据,采用空间甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术手段,测量AKR爆发脉冲到达卫星星座每一对基线两端的亚毫秒精度的时间延迟,基于三角测量法组合使用这些时延观测量,前后获得了一千多个AKR爆发源的空间位置 and 变化信息。比较影像数据,这类VLBI方法测量发现AKR辐射爆发倾向于沿着位于极光椭圆明亮区域上方的磁力线发生,频率与局部回旋频率的辐射一致或接近^[19]。Cluster星座卫星轨道和时间测量误差大、高度低使得测量得到的AKR源头或爆发位置测量的不确定性仍然很大。未来

有理由更好地优化这些技术问题,如卫星星座搭载高精度的时间计量手段把VLBI时间延迟测量精度提高2~3个量级、在地月距离上布设星座、提高卫星轨道的测量和确定精度等,将会更有效地测量AKR事件的三维小尺度结构及电磁场和粒子的时空变化的探测,解决现在还不能解决的地球空间物理的一些关键科学问题。

2 木星和太阳系其它外行星射电爆发

多数的太阳系行星都有较宽的射电热辐射,亮度在100~数百K,覆盖了毫米波到厘米波段。这些热辐射来自其大气层和类地行星的表面,波长越长,产生辐射的层次愈深。而在MH和HF频段,数十年来的行星际探测器在木星、土星、天王星、海王星上探测到了射电爆发。太阳系的外行星射电辐射最典型的是木星和土星。以土星为例,除了发生在波长从1 mm~94 cm的波段内的气体产生的电磁波热辐射,非热射电辐射或爆发也被探测到,并发现这些射电爆发的产生需要有包围着行星的磁层^[3-4,18,20-21]。这一发现支持了早期关于这些行星内部构造、特别是核体部分存在高温金属物质的理论或假说,这些行星的高温金属核体在转动时形成了磁场,并辐射到了行星大气空间。对MF波段射电爆发的探测和监测,也成为了一种解释行星内部构造和时变动力学特性的关键手段之一。

2.1 气体大行星的极光爆发特性

拥有强磁场的气体行星,如土星和木星,它们的强磁场把行星际太阳风中的带电粒子汇聚到两极,粒子与其高层大气中的气体分子或原子相互碰撞作用下释放出大量的电子,当这些电子与带正电的粒子复合成中性分子时就会在可见光波段产生辐射,极光就产生了。这类极光的产生时效性短暂,且根据太阳风的强弱而变化^[4,20]。数十年来这些气体行星绚丽的极光现象被空间和地面天文光学望远镜以及探测器携带的光学遥感设备拍摄记录下来。图2是欧洲南方天文台(European Southern Observatory, ESO)拍摄到的木星极光(<https://www.eso.org/public/images/eso0123e/>),图3是NASA哈勃空间望远镜拍摄的土星极光演化过程(<https://apod.nasa.gov/apod/ap050222.html>)。

太阳系行星的极光爆发在地球、木星、土星、天王星、海王星上被空间探测器首先探测到。数十年来空间探测的观测结果证实,发生在气体大行星上的极光也辐射千米波射电信号。这些行星极光射电爆发的谱特征在文献[4]中有分析描述,图4是根据该文献重新编辑的中文图示。从图4中可以看出,气体大行星都

有宽谱的千米波辐射，强弱差异显著，其中木星频谱中还存在有很强的射电百米波、10米波辐射爆发谱。

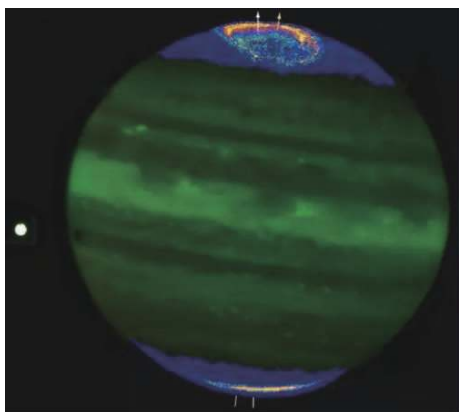


图2 地面光学天文台拍摄到的木星极光现象

Fig. 2 Jovian aurora image taken from a ground optical observatory

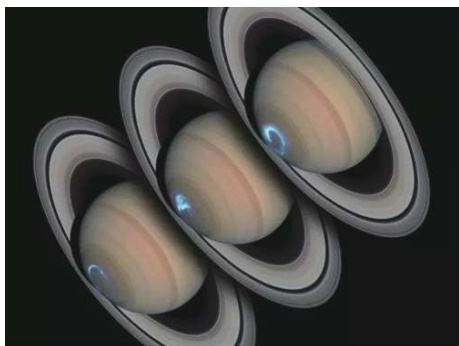


图3 哈勃空间望远镜拍摄到的土星极光演化过程

Fig. 3 An evolution images of Saturn aurora taken by space telescope

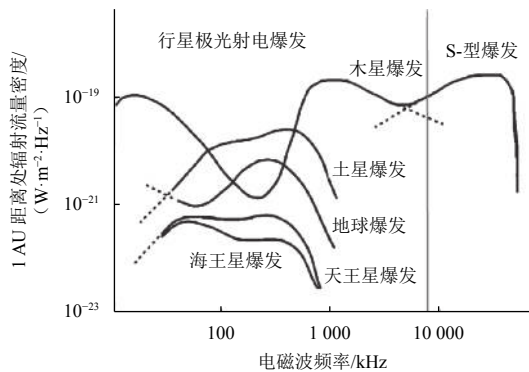


图4 距离1 AU处行星射电辐射爆发密度谱

Fig. 4 Spectra of planetary radio burst density at a distance of 1 AU

2.1.1 土星极光射电辐射爆发

1979年美国发射的行星际探测器“先驱者11号”(Pioneer 11)在离土星130万km处发现了土星的磁场，它的范围比地球磁场的范围大上千倍。土星的非热射电辐射包含3种成分，其中2种起源于环绕土星的磁层等离子体中，第3种可能是由于土星大气中的雷暴所产生的。1980年1月，“旅行者1号”(Voyager 1)和

“旅行者2号”(Voyager 2)飞船分别在距土星2 AU和3 AU 较远的距离上第一次观测到土星的非热射电辐射，辐射集中在50~500 kHz的宽千米波范围内，被称为土星千米波辐射，它的峰值强度出现在约175 kHz处。这种辐射表现出时标从几s到几min的爆发^[2-4,20]。

这类辐射信号随着该行星的每次旋转而变化，为此研究者们使用“旅行者号”“海盗号”(Viking)和“尤利西斯号”(Ulysses)探测器获得的土星千米辐射射电观测数据，研发了一种分析方法推算解析获得了土星自转一圈或者一天的长度为10.66 h。这种手段成为精确测量气体大行星和矮星动力学自转的有效方法，之后的“尤利西斯号”和“卡西尼号”(Cassini)探测器获得的数据优化了这一结果，把土星自转周期的观测结果精确到了秒级精度。奇特的是对土星两极上空极光千米波辐射测量获得的周期特性并不一致。“卡西尼号”探测数据初步显示出了两种不同的周期^[22-24]，从土星北极释放的射电信号显示土星一天长度为10.6 h，而来自南极释放的射电信号显示土星一天长度为10.8 h，南北极平均射电数据显示土星一天长度为10.67 h。当太阳直接照射在土星赤道区域时，同时出现南极射电信号稳定地逐渐减少，北极射电信号则逐渐增加的现象。

类似的射电信号变化也出现于1980年“海盗号”航天器的观测数据里，同时也出现于1993—2000年“尤利西斯号”探测器观测数据中。这些研究发现土星南北极射电信号存在着差异，差异性在土星春秋分时最明显。这种差异现象很难用土星两极旋转速率不同来解释，更可能的是射电信号的变化是南极和北极高空风流差异性所导致。

研究还显示，土星两极磁场变化与极光和射电波释放相匹配^[24-25]，由此认为所观测到的土星射电辐射爆发的全部变化与太阳对土星的影响相关。研究者还提出一个响应的模型：磁层顶的开尔文-亥姆霍兹不稳定性会导致阿尔芬波沿着弯曲的磁力线传播到土星极区附近，并在这个过程中使土星电离层附近的粒子加速沉降，发生回旋不稳定性，进而产生X模式辐射的非寻常波。极区发生回旋不稳定性的区域就是土星千米波辐射源的区域。

土星也可能存在很弱的10米波辐射，可以在未来的空间探测或使用地面的巨型HF阵列来检测。

2.1.2 木星极光射电爆发

木星的射电辐射爆发自20世纪50年代就被探测到，1973年“先驱者10号”(Pioneer 10)直接拍摄到了木星的极光，1979年“旅行者1号”也成功地观测到了木星的极光，推定木星存在磁场。“先驱者10号”“先驱者

11号”经过木星时,发现它周围的磁场和辐射强度远大于预期。对木星进行过飞掠探测的探测器列表见表1^[26]。

表1 木星射电探测的飞掠探测器和距离
Table 1 Jupiter fly-by space mission and distance

探测器	接近或探测时间	探测器-木星距离/km
先驱者10号	1973年12月3日	130 000
先驱者11号	1974年12月4日	34 000
旅行者1号	1979年3月5日	349 000
旅行者2号	1979年7月9日	570 000
尤利西斯号	1992年2月8日 2004年2月4日	408 894 120 000 000
卡西尼号	2000年12月30日	10 000 000
新视野号 (New Horizons)	2007年2月28日	304 535

木星极光辐射的电磁波存在于从LF射电波段到软X射线全部的电磁波频谱段。研究认为木星的强磁场来自于木星大气层的深处,那里由于压力巨大,存在一层可以导电的“金属氢”层,内部气压超过400万标准大气压,电子和质子像金属晶格那样聚集。结合木星的快速自转形成这一层的涡流电流进而产生强大的磁场,分布范围可能远至土星^[4-5,20]。

由于木星磁场太强,后续木星探测器,如“伽利略号”(Galileo),从较远的安全距离上探测木星和它的卫星。直到20世纪90年代空间观测发现^[4,26-28],木星的极光比预期多许多,并且发现木星的极光实际上比最初想象的要亮几千倍。钱德拉X射线天文台(Chandra X-ray Observatory, CXO)进一步研究表明,大部分极光实际上是以X射线的形式射出,与其它几个行星的极光相比较,木星极光的覆盖范围很大,可以达到地球地表面积的数倍。而且木星极光的产生机制可以不依赖于太阳风。

木星极光喷射揭示能量通过木星大磁气圈传输和消散。日本研究者观测发现在木星的表面观测到持续发光的“爆发极光”^[29-30]。这种连续的极光现象不能用外部太阳风受压引发来解释,太阳风极光产生机理只能解释通常类型的短暂明亮的极光发生。日出卫星(Hisaki)和哈勃望远镜提供的证据表明,恒稳态行星旋转的内部驱动可以产生这类连续极光爆发。强烈喷射从木星极冠区域延伸至木卫一极光迹象附近的纬度,暗示着通过内部等离子循环过程,能量快速进入木星极地区域。远紫外辐射观测显示,这种类型木星爆发极光也与木星-卫星交互作用关联^[4,26,28,31],木星和木卫一交互作用产生极光现象,木卫一表面火山释放带电离子和电子云,进入木星周边弥漫强磁场的区

域,伴随着木星快速旋转,在木星磁场旋转作用下牵引木卫一物质环绕其周围,导致木星极地出现强电场。这种加速离子和电子产生强极光现象,几乎照亮了电磁波谱的可见光与射电波段所有部分。在上述过程中,木星大气的带电区域与附近的所有粒子相互作用,将它们拉入巨大的电压风暴中,剥离这些粒子中的电子,粒子在电子减速并接近行星表面时再将之吸引回来。这个过程尽管消耗了来自大气层的正常粒子,但是还有相对恒定的其它粒子供应到木星的大气中。例如,木卫一上有数百个火山喷出氧气和气态硫,喷发出的气体粒子会逐渐进入木星的极地区域,当这些粒子的电子被剥离然后再被吸引回来时,导致极地周围发射出几乎恒定的极光辐射。木卫一之外的木星的卫星在运行过程中也会产生带电粒子,并被木星磁场捕获,它们向木星两极靠近时也会产生相对弱的极光。上述发生过程没有涉及太阳活动。

木星的极光产生机制包括有、无太阳风参与的两类。在各个电磁波段产生的木星极光中,初步分析认为从紫外到红外波段的极光主要是太阳风撞击木星高层大气中的带电粒子产生的,而X-射线和射电波段的极光则主要是由于大气层中积淀下来的粒子本身所发出的辐射而产生,即通过高能光子产生的荧光作用而产生。然而,这两类发生的几率如何、哪一类主导,二者对探究木星磁场影响其大气层的贡献如何,等等,都是开放的科学问题。

木星两极千米波射电波观测数据表现出来的情况比土星更有特色^[4,27-28]。它包括一个低频宽谱成分,频谱位于约10 kHz~1 MHz的千米波波段;一个频段略高的宽谱成分,频谱位于300 kHz~10 MHz的百米波段。木星的长波长的极光爆发除了存在千米波和百米波两类强的爆发辐射之外,还存在一类弱的、平稳的木星极光千米波辐射成分,是O模辐射,介于两类强的千米波辐射频带之间的过渡频带域。这个弱的辐射经常与前两类强射电爆出现在相同的位置区域,是一种平稳的木星极光千米波射电成分。Ladreitner等^[28]的研究表明,低频宽谱成分来源于纬度稳定于9°~15°区域的一个70°~75°的开阔范围,辐射波束沿着围绕源磁场的一个旋转对称的半顶角为30°~80°锥形壁。在这个成分中,“尤利西斯号”探测器发现了强的X模射电辐射。

关于探测到的频段略高的数百米波长的宽谱成分,“尤利西斯号”的统一无线电和等离子体波实验(Unified Radio and Plasma Wave Experiment, URAP)从距离木星40~100个木星半径处,在低纬度地区即观

测到了具有与 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 半顶角的填充锥形光束, 也观测到了纵向分布的空心光束一致的模式。观测还表明, 这个波段的极光射电辐射频率发生在极光磁力线附近的本地电子回旋频率, 辐射源距离木星的范围在 $2\sim 4$ 个木星半径^[4]。

Ladreiter等^[28]还发现, 木星千米波和百米波射电辐射都是以X模为主导的纯圆极化辐射, 北半球多是右旋圆极化, 南半球多是左旋圆极化。木星千米波辐射还有一些瞬时源, 它们出现的范围很小并且位置随时间变化, 几min就会扩散 1° 左右。

木星百米波射电爆发辐射存在时变特性, 变化原因迄今没有完全解释清楚。“卡西尼号”土星探测器于2000年12月30日飞掠木星, 在距离木星1350个木星半径处借助搭载的射电与等离子体波科学装置RPWS与在轨飞行的木星“伽利略号”(Galileo)探测器在 $0.5\sim 16$ MHz波段对木星百米波射电辐射和极紫外极光辐射进行了联合探测^[32-33]。探测发现两类辐射都类似与地球极光紫外和射电爆发辐射变化, 是由来自太阳的行星际激波触发, 联合观测直接确认了这批次的木星极光辐射爆发受到太阳风的控制。由于这次飞掠探测时间很短, 没有机会获得更多的联合或协同观测实例, 为未来的探测留下了待解决的问题。

继“伽利略号”探测器之后, NASA的“朱诺号”(Juno)探测器开启了新一轮木星探测, 而且研究木星极光和射电辐射特性是其重要科学目标(“朱诺号”任务的介绍参见https://www.nasa.gov/mission_pages/juno/spacecraft/index.html)。“朱诺号”木星探测器搭载了射电波和等离子体波传感器MWR, 并安排了专门的极光分布探测实验JADE来观测两极的磁层和极光, 通过测量极光区域的射电和等离子体光谱, 确定极光电流和粒子加速情况, 探究木星磁场影响其大气层的机理, 通过近距离观测揭示木星磁场的内部结构。探测器还专门携带了由1 cm厚的钛合金板构成的防护罩, 在近距离探测时阻挡和屏蔽木星辐射带上的高能粒子对它的电子设备和太阳能电池板造成的损害。它搭载的MWR可以在6个射电频段对木星的射电爆发辐射进行探测, 结合重力场、磁场的探测联合判定其核心的质量, 探测它是否存在一个像地球这样的岩石核心以及评估金属含量情况。

MWR的一个标志性成果是绘制了木星大气内部的电磁波辐射分布图, 并在最初的8次抵近木星的探测过程中^[34]MWR侦测到了377次闪电放电, 记录在MHz到GHz之间很宽的频带上, 揭示了木星大气闪电的电磁波辐射特性, 同时使用记录到的电磁波探测了木星的

电离层和等离子体层的分布特性。观测结果表明, 木星的高温导致闪电分布是由内向外并大部分闪电活动发生在两极, 而很少发生在中低纬度和赤道附近, 与地球情况截然不同。按照任务计划“朱诺号”探测器还将继续开展对木星的探测工作, 到2021年中期结束。更多的MWR成果还在期待中。

2.2 木星10米波射电爆发与探测

由图4可见, 木星的极光射电爆发除了千米波段的超宽带成分之外, 还存在10米波射电爆发成分。木星10米波强辐射爆发成分可以穿透地球电离层的阻挡, 在地面就可以探测到。从1955年在地面探测到开始, 已经被包括射电天文探测卫星(Radio Astronomy Explorer, RAE)1号和2号、“旅行者1号”“旅行者2号”“尤利西斯号”“伽利略号”、日地空间探测卫星WIND以及当今的“朱诺号”等大量的地球和行星际空间探测器观测, 使得木星成为了射电爆发被观测最多的行星。从1999年开始, NASA发起并实施了一个长期射电木星射电观测的教育科研与普及结合的观测活动, 组成了一个松散的全球联盟, 前后聚集了来自全球70多个国家的中学和大学的数百个兴趣小组, 参与到了木星10米波射电爆发的联合观测。组织者向这些团队提供了设备、软件、观测技术、木星射电监测结果共享服务(<http://radiojove.gsfc.nasa.gov>), 扩大了射电天文学的普及和影响, 也培养和提升了青年学者参与行星射电观测研究的兴趣。

木星的10米波射电爆发辐射频率可以向上延伸到40 MHz。这个频带的辐射的主要部分Io-DAM与木卫一强相关。残余部分non-Io-DAM与木卫一无关联, 可能是百米波极光爆发辐射的高频延伸, 对此目前尚无定论。木卫一木星空间电流系统是Io-DAM成分的发源地, 在许多方面可以被认为是第二个“极光”来源。non-Io-DAM辐射爆发发生在极地上空, 而Io-DAM的辐射空间位置多位于纬度比non-Io-DAM辐射低一些的区域, 一部分Io-DAM包含有非常短暂(毫秒尺度)和强烈的无线电爆发。

木卫一尺寸和地球的月亮相当, 是太阳系火山活动最活跃的天体^[26]。它受到木星和木星其它卫星的潮汐引力作用, 导致其内部处于熔融状态, 而且位于表面的火山持续地喷发释放大量的含硫为主的气体物质。这些气体物质的一部分会逃逸到外部空间, 气体分子很快会失去部分电子被电离, 然后被木星的磁场捕获, 在木星周围形成一个巨大的Io环。长期的地面和空间观测表明, 是木卫一倍增了木星的10米波射电辐射爆发。木星磁场快速扫过木卫一和木卫一的轨

道,当木卫一位于轨道上的特定位置时,木卫一携带着自身稀薄的导电大气层穿越木星磁场时,在木卫一和木星之间产生强电流,激励发生10米波辐射,进而在空间和地球上可以探测到这些被增幅了的辐射。

木星的10米波射电辐射爆发源与百米波、千米波源相比,来自于接近木星表面的空间或来自于木星的表面。图5 (http://jupiter.kochi-ct.jp/cg/jupier_radio_sources.gif) 是日本国立技术大学(National University of Technology)今井实验室(Imai laboratory)给出的木星低频射电辐射各频段爆发产生位置示意图,蓝色实线为自转轴,绿色实线为磁轴,红色区域为木卫一调制的木星HF射电爆发区域。

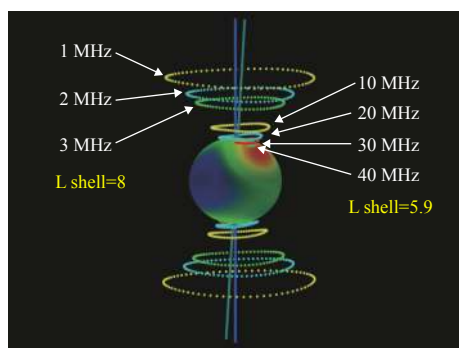


图5 木星低频射电辐射爆发产生位置示意图

Fig. 5 Source position diagram of Jovian low-frequency radio bursts

考虑到电离层的遮挡和HF无线通信的干扰,经验表明地面上观测木星10米波射电爆发的较佳频段位于10~28 MHz左右^[31]。地面观测发现木星10米波爆发由强相干的O模和X模同步产生。偏振状态在木星数h的覆盖数MHz带宽的射电风暴过程中非常稳定,预示着木卫一-磁层相互作用源的位置沿着经度方向扩展,但在特定时间对于特定的观测几何构型只能看见少量的一部分,无法看见全部范围,预示着它是高度椭圆偏振射电辐射^[4]。和土星类似,木星的射电爆发提供了测量木星自转的手段,特别是使用可以长期监测到的10米波爆发,精确测量到了木星的自转周期为9 h 55 min 29.71 s^[35]。

木星10米波射电辐射爆发存在有爆发持续时间特性,主要包括短脉冲S爆发和长脉冲L爆发两类。短脉冲S爆发的脉冲持续时间1~10 ms,频率在爆发时间内发生单向漂移;长脉冲L爆发的脉冲持续时间0.5~5 s,包含在频率上可以向上或向下漂移的调制通道^[31]。木星的短脉冲S爆发信号特性与脉冲调频雷达信号类似,在短短时数ms内频率漂移几百kHz到几MHz。这类爆发的产生机制已经争议了40多年没有定论。对大量观测记录的高时间和频率分辨率的分析表明,S爆发产生

机理的一个可能解释是能量为-5 keV的电子分布的回旋脉塞发射,在木卫一附近被加速,然后沿着连接木卫一和木星极光区的磁力线准绝热运动。辐射电子的总能量、速度和俯仰角,以及爆发射电源的范围,都可由射电测量得到^[27]。这也预示着木星10米波S爆发探测是一类潜在的可以探测木星磁层物理和动力学特性的遥感工具,未来甚至可以推而广之到其它“射电”行星,如系外行星探测。

3 系外行星射电爆发探测初步展望

早在1976年系外行星尚未被发现时天文学家就推测,既然木星在射电波段的爆发辐射如此剧烈,人类应该可以利用已知的木星射电辐射知识来寻找系外行星。目前,空间低频射电探测的主要驱动来自太阳射电爆发预警监测、宇宙早期演化射电辐射探测、行星和系外行星射电爆发探测。其中发展空间大型低频射电阵列的驱动来自宇宙学和系外行星探索的需求^[9]。

针对系外行星探索,光学天文波段发现了数千颗系外行星或系外行星候选体。这些天体既有大量的类木巨行星,也有部分类地固体行星。系外行星探索数据网页<http://exoplanet.eu>公布了全部已经发现的系外行星数据。截至2019年8月底,确认发现可以被证实的系外行星将近4 000颗,其中近700颗的质量低于1个木星质量,其余的质量都比木星大,最大可达将近300个木星的质量。依照其质量-半径关系,主要分为大质量大体积和小质量小体积的两个集中的集团,见图6。

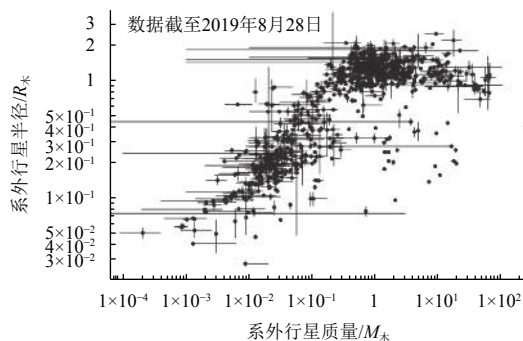


图6 已经发现的系外行星质量-半径分布情况

Fig. 6 The mass-radii distribution of discovered exo-planets

有理由认为,任何一个具有全球性磁场的系外行星也都具有形成极光现象的潜力。类比木星和土星上的极光现象,对这类巨型气态行星极光的研究有助于探索系外天体的极光现象。可以合理推断,系外行星也会与太阳系行星类似发生射电辐射或射电爆发。考虑到这些系外行星距离地球远、辐射能量低、低频辐射在行星际传输路径上的星际介质损耗严重,使用现

有手段能力的观测过程中难以实现长时间稳定观测、对信号进行累积积分,使得直接探测系外行星射电爆发无论在地面和空间都变得非常困难。另外,除了其它射电干扰,仅银河系自身的射电背景辐射就很强,还有来自自然的和人为的射电信号也在干扰着这类观测。

尽管如此,射电天文观测却能够获得在可见光波段很难、甚至不能获得的行星类天体辐射的细节信息,例如行星磁场的强度、自转与进动速度、行星与宿主恒星之间的相互作用等。在这个领域的探测技术方法都还是处于最早期的探索阶段。通过对太阳系行星射电辐射、射电爆发的大量探测,将为系外行星探测提供许多新的参数或约束。

基于上述理念的驱动,国际上几个射电天文研究小组在数GHz频段探测到了褐矮星甚至更小质量的恒星发出的强射电信号。褐矮星拥有更强的磁场,使得这些射电爆发更明亮。这些偏振射电信号的产生机制可能和木星的射电爆发机制相同,一定程度上可以用于解释褐矮星和类似小质量恒星产生的射电信号的强度和出现频率。

如果系外行星与太阳系中木星的情况非常相似,巨大的气体行星距离恒星几个AU、拥有类似木卫一的卫星,如第2节所描述的情况,行星公转快,拥有强磁场,那么它将产生最强的射电信号。另一类距离恒星近类木行星可以适用“炽热木星”的情况——巨大的气体行星由于距离它的恒星过近而无法保住自己的卫星。在强烈的恒星高速粒子猛烈轰击下产生强烈的极光射电辐射爆发。地面的射电望远镜就可能探测到距离我们数十光年远的“炽热木星”,有几个带有行星的恒星系统已经在这个距离范围之内。这类行星也可以扮演类似木卫一的角色——即为它的恒星提供等离子体,就能产生比木星亮数十万倍的射电爆发并传递到星际空间。这可以为科学家探索遥远外星世界的极光提供检测途径,也有助于发现其它恒星系统的宇宙生命和宜居行星。

太阳系的情况预示着能够辐射射电波的系外行星大量存在,而系外超大木星的发现,使搜寻系外行星的非热辐射成为可能。迄今为止,已使用几乎所有低频射电望远镜阵列对木星进行观测^[36-38],并尝试搜寻系外行星射电爆发。阵列包括位于印度的大型米波射电望远镜(Giant Metrewave Radio Telescope, GMRT),位于乌克兰的T形射电望远镜阵(UTR-2)和位于美国境内的VLA。新近由荷兰主导的LOFAR于2012年12月开始常规的观测工作^[7,39],也参与到了对系外行星系统

的射电波段搜寻中。

目前的搜寻工作一类是集中于探测已知的、类似木星大小的系外行星的直接射电爆发。截至目前只有印度的GMRT阵列探测到了疑似来自系外行星的射电信号,但并未得到最终证实^[40]。在对“炽热木星”的候选者探测时,从HD 189733b探测到了一个极其微弱的信号,对其来自系外行星的研判还在进行中,从另一个候选者HAT-P-11b探测到一次稍微强些的射电信号,但在那个信号之后再没有出现。可能目前理论预测给出的探测范围过于宽泛,我们还不清楚目前的望远镜是否已经足够灵敏、能够探测到直接来自系外行星射电辐射的信号。

另一类探测是,依照LOFAR的探测灵敏度,在VHF波段预计能够探测多达40个临近的恒星系统行星与恒星相互作用产生的射电爆发。针对“炽热木星”与主恒星相互作用这一类型的情况,一个有价值的新进展是射电天文学家使用LOFAR阵列成功探测到了非常不活跃或非常安静的、M型红色矮星GJ1151发出的异常无线电波,探测到了距离我们几十光年的类木行星系统发出的信号^[41]。

信号的辐射特性与行星极光射电爆发辐射(如木星的10米波辐射)极为相似,预示着GJ1511的冕结构是被一个球形的低密度等离子体磁层包裹着。可以传输到太阳系的剧烈射电爆发无法从GJ1511自身缓慢的自转产生,而是由其磁层等离子体与一个短周期系外行星之间的次级阿尔芬相互作用产生。辐射信号特性还表明这个类似地球大小的行星环绕GJ1511的轨道周期只有1~5 d。这是天文学家第一次能够识别出这类来自系外行星与主恒星相互作用的特征。这次LOFAR超高灵敏度的射电观测技术,目前已经能够探测到系外行星系统的射电信号,这次成功探测的经验会指引科学家将来的搜寻工作以获得更多的成功。

来自系外行星的射电辐射将为人类展开一个全新的探索领域,并且增进人类对太阳系外遥远世界的了解,也为在可居住区发现系外行星并研究其存在环境的新方法打开了大门。可以进一步考虑突破由于地球表面和近地空间电磁辐射干扰带来的限制,使用与LOFAR振子天线阵列类似的手段设置在月球空间,灵敏度可以提高约15 dB;而如果设置在月球背面隔绝来自地球和太阳的干扰,就可以提高20~30倍的灵敏度,在HF和VHF频带探测到数十亿光年范围内比GJ1511信号弱数十倍到千倍的系外行星射电辐射爆发。对振子组成的阵列单元个数的一个初步预期估计如表2所示,一个包括100个左右的2~2.5 m长度的振

子单元组成的空间阵列, 距离地球数十万km之外或者月球背面开展探测, 将开启射电天文前沿探测的新纪元。

表2 科学目标对空间低频探测阵列单元数目的需求
Table 2 Unit number estimation for a space low-frequency radio array targeting scientific objectives

低频射电辐射源	偶极子单元	阵列 (单元数目)
宇宙黑暗时代	全球辐射信号检测	功率谱特性探测 (约100~1000)
行星射电	太阳系行星射电爆发/雷电	系外行星射电 (约100~1000)
行星际射电爆发	爆发源动力学频谱	爆发源定位追踪 (约10)

4 行星射电爆发探测方法进展

行星射电爆发发生在HF和更低频段, 通常的方法是使用不同频带和分辨能力的低频射电频谱仪进行探测。伴随着射电天文技术的数字化和软件化新进展, 相比20世纪的经典频谱探测技术, 对行星射电爆发的探测也在技术方法上取得了多方面的进展。包括: ①采用数字化高性能低频超宽带探测载荷对行星爆发的抵近和环绕探测; ②月球与行星环绕器搭载的探地和大气探测雷达被动复用探测行星射电爆发; ③地面探测方法的专业化发展。

行星射电爆发探测最具挑战和信息量最大的探测, 是使用专用的跨LF-MF-HF-VHF超宽频段、高分辨率、全数字化的无线电和等离子体波探测仪 (WAVES) 或频谱探测仪器设备, 对行星开展抵近、飞掠、环绕探测。探测使用的天线设备频率感知低至10 KHz, 带宽达到几十到上百MHz, 并使用高动态范围的全数字化信号采集观测记录模式, 星上试验了自主的频谱信号分析技术。条件允许的探测器, 还搭载了多极化探测单元, 对爆发的方向性以及空间磁场特性有更细致的感知和把握。

多科学目的空间载荷复用技术方法, 是空间科学探测的发展趋势之一。绕行星进行浅层结构和物质探测的低频雷达, 可以使用其被动测量模式, 对环境中的行星射电爆发进行探测。如日本的月球探测器KAGUYA/SELENE, 携带了大型的探月雷达在HF低频波段开展工作。我国的火星探测器也将借鉴采用类似的方式开展行星际射电探测。

由于HF通信技术的发展和和其它一些原因, 行星射电爆发的地面探测, 长期处于业余无线电爱好者使用相对简易的软件无线电定义的数字化接收设备, 倾听记录木星射电爆发的状态。伴随着对空间天气的地面射电

监测技术的发展和射电天文平方千米阵列国际合作的发展, 来自许多国家的地面专业化大型的太阳射电频谱监测设备以及LOFAR低频射电阵列等, 开启了对行星射电爆发的专业化探测, 更灵敏、精细地探测了木星的射电辐射爆发。个别大型设备如“阿雷西博” (Arecibo) 射电望远镜, 对陨石撞击月球产生的宽频带范围的低色散FRB进行了试验观测, 取得了有价值的探测信息, 也为我国FAST望远镜和其它大型多波束射电望远镜指明了一个崭新的FRB探测方向。

5 “嫦娥四号”行星低频射电观测机会

“嫦娥四号”月球探测任务搭载了两种低频射电探测载荷: 设置在着陆器上的低频射电频谱仪和设置在鹊桥中继通信卫星上的中荷合作低频射电探测仪。两种设备都采用了可以展开到5 m正交的3极子天线, 工作频段覆盖数十kHz到数十MHz。着陆器低频射电频谱仪的高频段探测能力充分考虑了木星射电辐射探测需求, 截止到40 MHz^[42]; 中荷合作低频射电探测仪, 充分考虑宇宙学探测需求, 高频段频率可以达到80 MHz。贾瑛卓等对载荷的基本特性进行了描述^[43]对载荷的基本特性进行了描述。

着陆器低频射电频谱仪于2019年1月开始工作, 在每个月昼开展数天到10 d左右的观测, 每天获得数小时的观测数据。作为搭载载荷的中荷合作低频射电探测仪2019年底也在轨实现了天线展开, 3个天线分别展伸达到了超过2、3、4 m的长度, 初步的测试和分析表明其具备了在150 kHz以上开展探测工作的基本条件。就单一载荷探测而言, 两台载荷目前都已具备开展针对太阳、木星、月球空间环境和宇宙背景的射电辐射探测的能力; 中继星低频射电探测仪还具备在MF频段开展地球AKR射电辐射爆发的能力, 发掘AKR不同时间尺度的时变特性。

上述两台低频射电载荷都配备性能较好的时频参考信号源, 结合星地链路的时间同步操控, 以及根据目前地面和空间的设备状态, 可以开展空间的独立观测和星-地协同观测, 以及基于地面观测的稳定性对同步的空间观测提供定标支持。载荷与地面对木星爆发的协同观测, 有机会实现首次地-月基线干涉测量, 获得精度比目前高两个量级的木星射电爆发空间位置, 优化木星射电爆发统计规律或模型。

在地球表面和地月空间观测木星射电爆发的最佳选择是, 当地球和木星位于太阳的同一侧时观测木星的10米波Io-DAM射电爆发。这类爆发包括A、B、C 3种类型。图7给出了Io-A、Io-B、Io-C爆发的可见机会

的木卫一轨道位置和CML空间位相的相对关系^[31]。以能量最强的Io-B爆发为例对可观测条件予以说明，要求在地球-木星直线连线上，以木星质量中心为起点，以地球指向木星方向矢量为0°起算逆时针计量，当木卫一位于轨道上经度位置65°~110°区间并且中央子午线经度CML位于95°~195°区间时，在地球或地月空间可以探测这类爆发。“嫦娥四号”任务中继通信卫星“鹊桥”搭载的低频射电仪，几乎不受空间几何遮挡影响，存在可长期随时加电供电开展工作的可能性，对HF和VHF频段的木星DAM射电爆发观测是一个有利的设备，期望可以获得比地球同类设备多得多的探测时段，以及观测更低频段的频率覆盖。

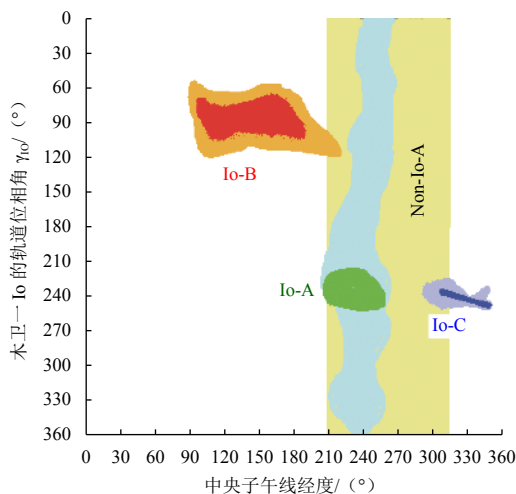


图7 Io-DAM射电爆发的地球观测几率构型限制

Fig. 7 The space chance to observe the Io-DAM radio burst from the Earth

位于月球背面表面的着陆器在月昼期间都可以随时加电工作。它们每隔几天就会有对木星10米波爆发进行观测的机会。而对于地面探测器而言，指定的测站由于所处位置的纬度和地球自转的限制，最多每周有一次机会，每个月有一次遇到信号极大的机会。在考虑星-地协同观测时，可选地面设备包括位于荷兰的LOFAR中心阵、明安图日像仪观测基地和山东大学嵯山太阳射电频谱仪。预报3站观测Io-A、Io-B、Io-C的可能时段，与“嫦娥四号”的空间低频设备运行时间重叠，即可协同实施。可以预期携带低频射电探测设备的月球探测任务有希望在地球AKR辐射爆发的周日和季节性爆发、月球轨道运动队AKR的调制，以及在木星10米波射电爆发的连续测量等方面取得新的成果。

参 考 文 献

[1] BARROW C H, MORROW D P. The polarization of the Jupiter radiation at 18 Mc/s[J]. *The Astrophysical Journal*, 1968, 152: 593-608.

[2] BAHNSEN A, PEDERSEN B M, JESPERSEN M, et al. Viking observations at the source region of auroral kilometric radiation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 6643-6654.

[3] GALOPEAU P, ORTEGA-MOLINA A, ZARKA P. Evidence of Saturn's magnetic field anomaly from SKR high-frequency limit[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 14129-14140.

[4] ZARKA P. Auroral radio emissions at the outer planets: observations and theories[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(E9): 20159-20194.

[5] DESCH M D. Does solar radio emission trigger SKR?[M]//Planetary Radio Emissions. Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 1998.

[6] BENEDIKTOV E A, GETMANTSEV G G, SAZONOV Y A, et al. Preliminary results of measurements of the intensity of distributed extraterrestrial radio frequency emission at 725 and 1525 kHz[J]. *Issled*, 1965, 1: 614.

[7] VAN HAARLEM M P. LOFAR: the low frequency array[J]. *EAS Publications Series*, 2005, 15(7): 431-444.

[8] 梅丽, 苏彦, 周建锋. 极低频射电天文观测现状与未来发展[J]. *天文学报*, 2018, 15(2): 127-139.

MEI L, SU Y, ZHOU J F. The history and development of the low frequency radio observation[J]. *Astronomical Research & Technology-Publications of National Astronomical Observatories of China*, 2018, 15(2): 127-139.

[9] BENTUM M J, VERMA M K, RAJAN R T, et al. A roadmap towards a space-based radio telescope for ultra-low frequency radio astronomy[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(2): 856-867.

[10] ENSON R F, AKASOFU S I. Auroral kilometric radiation/aurora correlation[J]. *Radio Science*, 1984, 19: 527.

[11] GURNETT D A. The Earth as a radio source: terrestrial kilometric radiation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79: 4227.

[12] WU C S, LEE L C. A theory of terrestrial kilometric radiation[J]. *The Astrophysical Journal*, 1977, 230: 621-626.

[13] GURNETT D A, GREEN J L. On the polarization and origin of auroral kilometric radiation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83: 689.

[14] GURNETT D A. High latitude electromagnetic plasma wave emissions[M]//High Latitude Space Plasma Physics. New York: Springer, 1983: 355-375.

[15] MATSUMOTO H, NAGANO I, ANDERSON R R, et al. Plasma wave observations with GEOTAIL spacecraft[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1994, 46: 59-95.

[16] MORIOKA A, MIYOSHI Y, KURITA S, et al. Universal time control of AKR: Earth is a spin-modulated variable radio source[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118: 1123-1131.

[17] GREEN J L, BOARDSEN S, GARCIA L, et al. Seasonal and solar cycle dynamics of the auroral kilometric radiation source region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: A05223.

[18] KAISER M L. Observations of non-thermal radiation from planets[C]//Plasma Waves and Instabilities at Comets and in Magnetospheres. Washington, DC: AGU, 1989.

[19] MUTEL R L, GURNETT D A, CHRISTOPHER I W, et al. Locations of auroral kilometric radiation bursts inferred from multispacecraft wideband Cluster VLBI observations. I: description of technique and initial results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(A11): 1398.

- [20] KAISER M L, DESCH M D. Radio emissions from the planets Earth, Jupiter and Saturn[J]. *Reviews of Geophysics*, 1984, 22: 373-384.
- [21] KAISER M L, DESCH M D, CONNERNEY J E P. Radio emission from the magnetic equator of Uranus[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 2399-2404.
- [22] READ P L, DOWLING T E, SCHUBERT G. Saturn's rotation period from its atmospheric planetary-wave configuration[J]. *Nature*, 2009, 460: 608-670.
- [23] GURNETT D A, LECACHEUX A, KURTH W S, et al. Discovery of a north-south asymmetry in Saturn's radio rotation period[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L16102.
- [24] GURNETT D A, GROENE J B, PERSOON A M, et al. The reversal of the rotational modulation rates of the north and south components of Saturn kilometric radiation near equinox[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L24101.
- [25] DOUGHERTY M K, CAO H, KHURANA K K, et al. Saturn's magnetic field revealed by the Cassini Grand Finale[J]. *Science*, 2018, 362(6410): 46.
- [26] LELLOUCH E, MCGRATH M E, JESSUP K L. Io's atmosphere[M]//Io After Galileo: a New View of Jupiter's Volcanic Moon. [S. l.]: Springer Praxis Publishing Ltd, 2007: 231-264.
- [27] ZARKA P, FARGES T, RYABOV B P, et al. A scenario for Jovian S-bursts[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(2): 125-128.
- [28] LADREITER H P, ZARKA P, LECACHEUX A. Direction-finding study of Jovian hectometric and broadband kilometric radio emissions: Evidence for their auroral origin[J]. *Planetary and Space*, 1994, 42: 919-931.
- [29] KIMURA T, TSUCHIYA F, MISAWA H, et al. Radiation characteristics of quasi-periodic radio bursts in the Jovian high-latitude region[J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(15): 1967-1976.
- [30] MORIOKA A, NOZAWA H, MISAWA H, et al. Rotationally driven quasi-periodic radio emissions in the Jovian magnetosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: A04223.
- [31] BHATTACHARYA A B, RAHA B. Detection of radio emissions from Jupiter[J]. *OJP*, 2013, 5(1-2): 1-12.
- [32] GURNETT D A, KURTH W S, HOSPODARSKY G B, et al. Control of Jupiter's radio emission and aurorae by the solar wind[J]. *Nature*, 2002, 415: 985-987.
- [33] HOSPODARSKY G B, KURTH W S, CECCONI B, et al. Simultaneous observations of Jovian quasi-periodic radio emissions by the Galileo and Cassini spacecraft[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: A09S07.
- [34] BROWN S, JANSSEN M, ADUMITROAIE V, et al. Prevalent lightning sferics at 600 megahertz near Jupiter's poles[J]. *Nature*, 2018, 558: 87-90.
- [35] HIGGINS C A, CARR T D, REYES F. A new determination of Jupiter's radio rotation period[M]//Planetary Radio Emissions IV. Vienna: Austrian Acad. Sci. Press, 1997: 43-50.
- [36] WINTERHALTER D, KUIPER T, MAJID W, et al. Search for radio emissions from extrasolar planets: the observation campaign[M]//Planetary Radio Emissions VI. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2006.
- [37] ZARKA P. The search for exoplanetary radio emissions, in Planetary Radio Emissions V II [M]. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, 2011: 287-301.
- [38] SIROTHIA S K, DES ETANGS A L, KRISHNA G, et al. Search for 150 MHz radio emission from extrasolar planets in the TIFR GMRT Sky Survey[J]. *A&A*, 2014, 562(2): A108.
- [39] SHIMWELL T W, HAVERKORN M, CSEH D, et al. The LOFAR two-metre sky survey: I. survey description and preliminary data release[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017, 598: A104.
- [40] DES ETANGS A L, SIROTHIA S K, KRISHNA G, et al. Hint of 150 MHz radio emission from the Neptune-mass extrasolar transiting planet HAT-P-11b[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 552: A65.
- [41] VEDANTHAM H K, CALLINGHAM J R, SHIMWELL T W, et al. Coherent radio emission from a quiescent red dwarf indicative of star-planet interaction[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4: 577-583.
- [42] 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.
- [43] 贾瑛卓, 邹永廖, 薛长斌, 等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置[J]. *空间科学学报*, 2018, 38(1): 118-130.
- JIA Y Z, ZOU Y L, XUE C B, et al. Scientific objectives and payloads of Chang' E-4 mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(1): 118-130.
- 作者简介:
平劲松(1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 射电天文学、行星物理、天体测量与天体物理学。
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)64881147
E-mail: jsping@nao.cas.cn

Introduction of Space Exploration Progress for Planetary Radio Burst Emission

PING Jinsong^{1,2}, WANG Mingyuan^{1,2}, ZHANG Mo^{1,2}, CHEN Linjie^{1,2}, DONG Liang^{2,3}, WU Yuxiang^{1,2}

(1. 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;

3. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China)

Abstract: At low frequency electron-magnetic wave band, planetary bodies not only emit thermal radiation, but also emit non-thermal radiation burst. The typical emission is planetary auroral radio burst consists of planetary kilometric wave burst, Jovian radiation at hectometer and decameter wavelengths. This kind of burst has been observed on the ground and in the space for dozens of years. The developed method can also be used as remote sensing tool to detect the inner structure of Jovian magnetosphere. However, the characteristics and mechanism have not been fully understood for the solar system planetary radio burst, there are still quite a lot of open questions left. Similar radio burst may also be observed from the exoplanetary systems. Following the development of space technology, radio astronomical observation has extended to kilometer wave. In the future the large radio array at low frequency can play key role to uncover the mechanism for the planetary radio burst, and also can be used to detect the exoplanets. The Chang'e-4 lunar mission with its low frequency payloads is working as pathfinder for the Earth Auroral Kilometer Radiation (AKR) and Jovian bursts,

Keywords: planet; radio burst; aurora; Earth; Jupiter

Highlights:

- AKR radio emissions observed in the space has been reviewed, with open questions like possible lunar tidal effect listed.
- Planetary radio emissions are historical topics, new specifications are still being detected and observed. This topic can be extended to link with exoplanetary system explorations on the ground and in the space.
- Jovian radio emission has many modes, and DAM can be observed on the ground and in the space, even by means of Earth-space VLBI method. Special modes can only be observed by flyby and orbiting spacecraft. New questions are listed.
- Chang'e-4 lunar mission brings two sets of MF-HF-VHF antennas in the space and on the lunar far-side ground. These new instruments may play pathfinding roles for future lunar space radio astronomical development.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]