

打开宇宙电磁频谱的新窗口

——超长波

陈学雷

(中国科学院国家天文台 100101)

1. 超长波及其早期观测历史

1800年2月11日,英国天文学家威廉·赫谢尔在观测太阳光谱热效应时意外发现了肉眼不可见的红外辐射。此后,随着麦克斯韦电磁理论的建立,人们开始意识到,在可见光之外,还存在着其他波段的电磁波,它们的差别只在于频率或者说波长。现代的天文研究综合了这些不同波段的观测以获取信息。但是,地球大气对于观测不同频段的天体辐射却有很大影响。图1为地球大气对不同波段电磁辐射的吸收。我们看到,这其中有两个几乎完全透明的窗口,分别位于可见光波段和无线电波段(米波至厘米波)。我们的眼睛之所以对可见光敏感大概是长期进化的产物。现在,地面的天文观测也是以可见光和射电(无线电)天文观测为主,而其

他波段特别是X射线、伽玛射线等高能天文观测,以及红外和毫米波观测,则往往依赖航天器的空间观测或火箭、气球等近邻空间观测手段,或者至少是利用高海拔观测站以尽量减少大气吸收。仅X射线波段,空间望远镜和实验就已有几十个。这些空间观测,打开了高能天文的观测窗口。

在图1中,我们注意到在频谱中最低频的一段,也就是频率低于30 MHz、波长大于10米的部分,受到电离层的强烈吸收,也是一个在地面很难观测的频段。在无线电通讯中,30~300 MHz被称为甚高频(VHF),3~30 MHz被称为高频(HF),0.3~3 MHz被称为中频(MF),0.03~0.3 MHz被称为低频,更低的频率还有甚低频 VLF (3~30 kHz),特低频 ULF (300~3000 Hz),超低频 SLF (30~300 Hz)等。不过就射电天文观测而言,300 MHz以下已是低频段了,因此

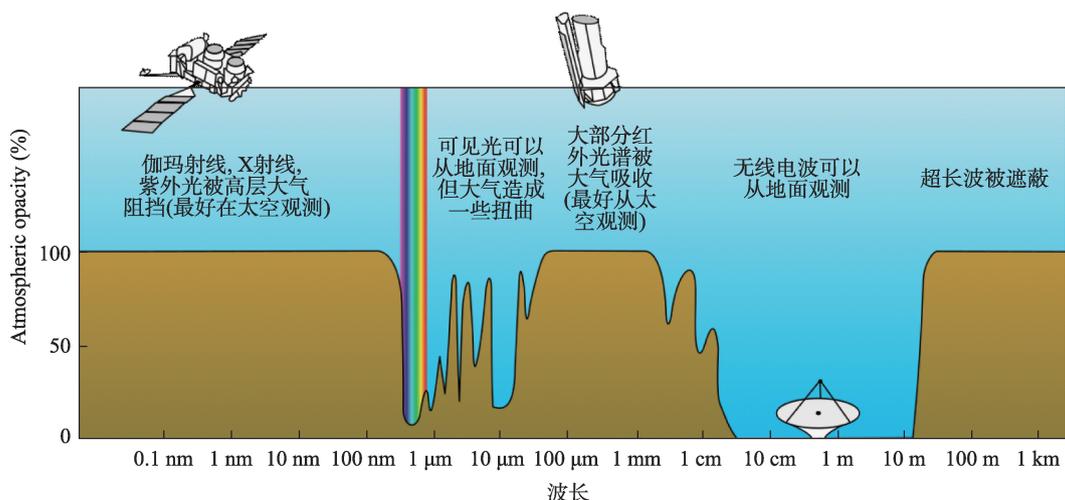


图1 地球大气对不同波段电磁辐射的吸收(图取自维基百科)

称为甚高频、高频、中频等容易引起误解,所以在本文中我们将 30 MHz 以下的频段称为超长波(ultralong wavelength)。实际上,对于 0.03 MHz 以下的频段,无线电波在传播中会受到星际空间等离子体的强烈吸收,电波传播距离很短,对天文观测来说价值不大。因此,可以说 0.03~30 MHz 的超长波频段是电磁频谱中最后的处女地。

1.1 超长波的地面观测历史

对于超长波波段人们也不是完全没有尝试过地面观测。人类首次接收到射电天文信号就是贝尔实验室的卡尔·央斯基(Karl Jansky)在 20.5 MHz 上探测到来自银河系中心的射电信号^①。射电天文学的另一位先驱、20 世纪 30 年代在自家后院建起碟形反射面天线首次进行有意识的射电天文观测的格罗特·雷伯(Grote Reber),二战后也一直尝试进行这一频段的观测^②。但是,在 10~30 MHz,由于地球大气电离层的折射,造成很强的畸变和闪烁,需要在信号处理上采取特殊措施以还原信号;在 10 MHz 以下,电离层对电磁波的吸收很强。而且,地球上的无线电干扰也是上述波段天文观测的一个主要障碍:这一频段有大量广播和通讯信号,这些信号的强度比天文信号大得多,还会被电离层和地面反复反射传播。因此,在一般情况下往往很难进行地面的观测,只有尽量利用高磁纬地区冬季夜间电离层变薄时开展观测。目前这一频段只有很少

的地面观测资料,主要是 20 世纪 60~70 年代在接近南磁极的塔斯马尼亚岛及澳大利亚,以及接近北磁极的加拿大观测取得的^②。观测数据量很少,观测时的角分辨率也很差,难以分辨单个天体,且没有全天完整的观测数据,目前的天图(图 2)只是根据地面不同的观测拼凑成的,这些观测本身并不一致,因此拼图时需要人为调整修正^③。近年来新建的低频射电阵,如 LOFAR, LWA 等,也有一些观测频率低至 10 MHz,但主要是试图观测太阳爆发和木星射电等特别明亮的少数低频射电源。

1.2 超长波的空间观测历史

为了突破电离层的屏障,人们也开展了一些空间实验。1968 年,美国发射了射电天文探索者 1 号(RAE-1)卫星。该卫星采用近地轨道,却发现地球有很强的人工辐射和自然辐射(自然辐射源主要包括雷电和极光活动),几乎无法进行天文观测。1971 年,行星际空间监视者-6 号(IMP-6)卫星搭载的射电天文实验在月地空间之间进行了观测。1973 年,美国又发射了绕月的 RAE-2 卫星^④(图 3)。该星的观测表明,月球遮挡了来自地球的辐射,因此月球背面具有非常理想的观测条件(图 4)。但是,RAE-2 虽然使用了每边长达 229 米的双边 V 型天线,由于观测波长太长,观测的角分辨率仍然很差^⑤(图 5)。此外,这些不同卫星测得的全天平均频谱也有较大差别^⑥。

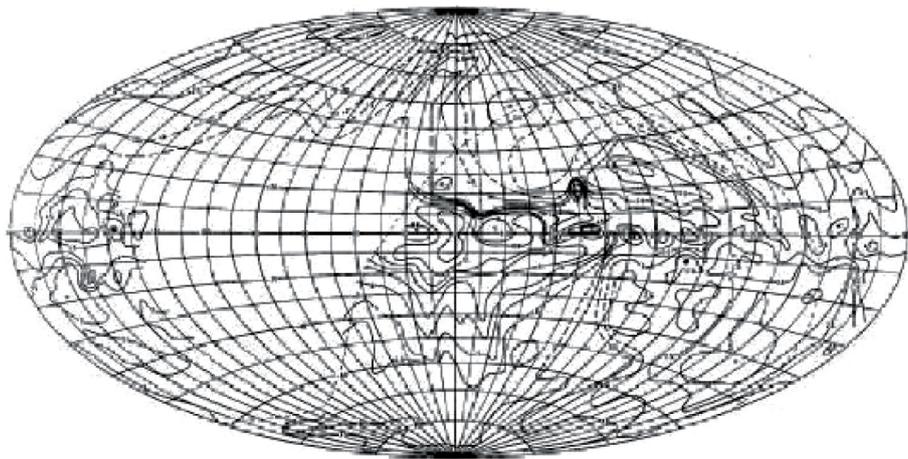


图 2 综合南北半球的观测绘制的 10 MHz 天图^③

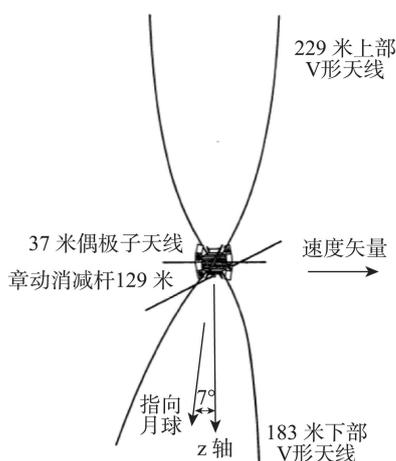


图3 RAE-2卫星。下方的V型天线设计长度也是229米，但在项目的前16个月中因故障只展开到183米

此后，一些太阳、空间环境或行星探测卫星如STEREO, WIND, GALILEO, ULYSSES, CASSINI, PARKER等航天器也携带了低频射电探测载荷，但主要用于观测太阳爆发或行星射电辐射。

2. 超长波观测的科学意义

随着天文学的发展，目前从伽玛射线到射电的

电磁频谱已被基本覆盖，只有极少数频段还没有被观测或者只有少量观测数据，而上述频段正是其中之一。由于不同天体的辐射机制不同，对每一个频段的观测，往往都会产生新的发现，揭示新的天文现象。因此，对这一频段的观测也有可能揭示完全未知的新现象，发现新的天体类型。除了发现未知的新现象外，目前已经知道有许多天体可以产生低频射电辐射，因此对回答许多天文学问题都会提供新的线索。例如，太阳的活动如耀斑和日冕物质抛射，日地空间环境，地球以及太阳系行星特别是其电离层和磁场活动，褐矮星和地外行星，脉冲星，超新星遗迹，宇宙线的加速和传播，星系介质的分布和湍流，银河系的结构，类星体射电源的辐射机制，星系团，星系际介质与磁场，大尺度结构乃至宇宙起源等。

就目前而言，超长波波段最让人期待的是对宇宙黑暗时代和黎明的观测^④。所谓宇宙黑暗时代，是指宇宙大爆炸结束、第一代恒星形成前的时期(图6)。在这一时期，宇宙中的原初扰动还基本处

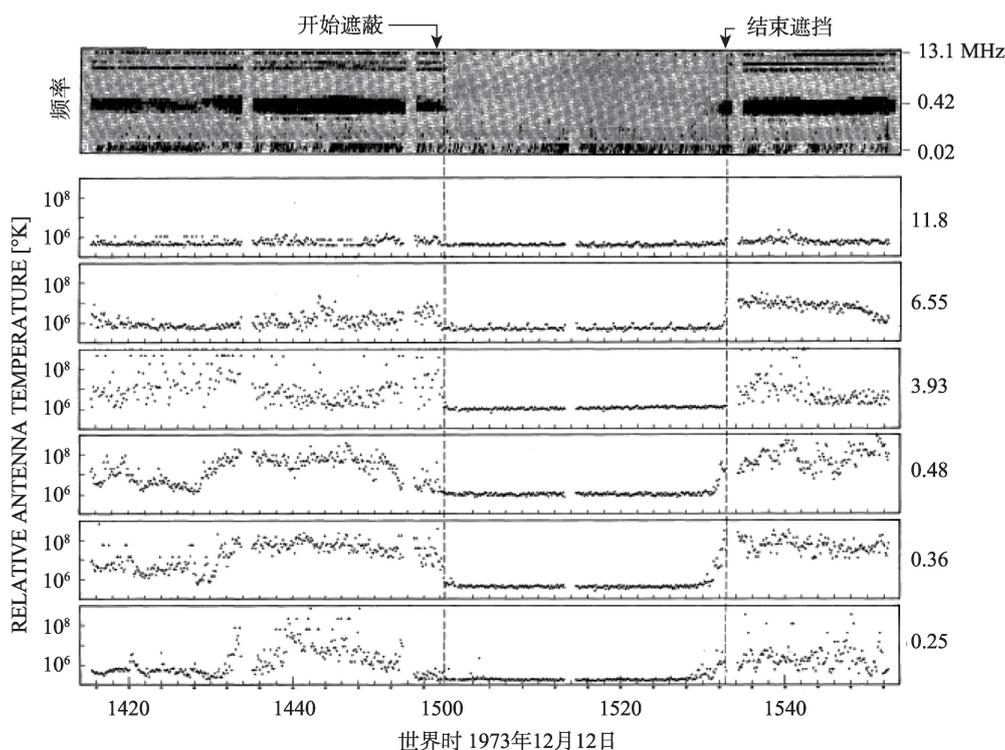


图4 RAE-2在被月球遮蔽前后与遮蔽时测到的频谱对比^④

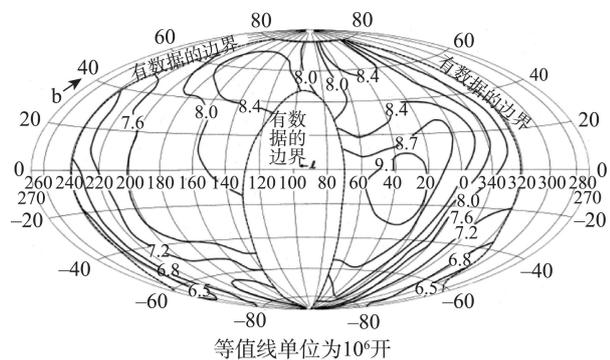


图5 RAE-2测量的2.2 MHz天图^⑤

于线性演化阶段,这些原初扰动是宇宙极早期形成的,是研究宇宙起源和暗物质性质的极重要的信息来源。由于这时还没有恒星、星系等天体,对这一时期的观测,主要依靠对中性氢发出的21 cm信号观测。考虑到中性氢自旋温度的演化,可观测的红移范围为红移200~30之间,对应的频率为7~47 MHz。原则上这种观测可以提供大量关于极早期宇宙的信息,是其他观测所难以企及的。根据可观测宇宙的独立模式数目,黑暗时代可提供给我们 10^6 倍于CMB所能提供的信息量^⑥。若能对宇宙黑暗时代的物质分布及其演化进行三维测量,将能够精确限制宇宙原初的非高斯性,宇宙原初密度扰动谱等关键物理量。标志黑暗时代结束的是宇宙黎明,即宇宙中第一代发光天体开始形成并重新照亮宇宙的时期,这时气体的温度低于宇宙背景辐射温度,在第一代恒星莱曼阿尔法光子的Wouthuysan-Field耦合机制作用下,产生可观测的21 cm吸收谱特征^⑦。此后恒星、吸积黑洞等产生的紫外与X射线光子逐渐把周围星系际介质中的氢原子电离,宇

宙从此进入再电离时期,并逐渐演化为我们今天观测到的宇宙。宇宙黎明时期的第一代恒星和星系由于距离遥远难以直接观测,因此红移21 cm信号也是主要的观测手段。这一转变发生在红移30~10,对应47~130 MHz,频率略高于超长波,但地面的观测仍在一定程度上受到大气电离层的影响。

对宇宙黑暗时代和黎明的观测有非常高的难度,这是因为信号比较微弱,而银河系、河外射电源等前景辐射的亮度都远远高于信号亮度。其中最主要的是银河系的低频辐射,产生机制为宇宙线电子同步辐射,其亮温度可近似写为

$$T(\nu) = 300\text{K} \left(\frac{\nu}{150\text{ MHz}} \right)^{-\gamma}$$

其中谱指数 $\gamma \approx 2.5$ 。在高银纬天区,15 MHz频率上的天空亮温度约 10^5 K,银道面上温度还要更高一些,至少高出目标信号6个量级。原则上,前景与红移21 cm信号是可以区分的,前景来自同步辐射、韧致辐射等,在频谱上是光滑的,而不同频率对应不同红移的21 cm信号,因此红移21 cm信号是随机变化、频谱上不光滑的,在观测到的信号中只要减除光滑成分就可以提取出红移21 cm信号。但实际上望远镜本身对信号的响应是随着频率变化的,因此必须高度精确地识别观测信号的频率变化是来自望远镜还是天空,才可能进行这种减除。对于干涉阵列来说,每对单元测量的信号对应天空辐射强度的一个傅里叶分量,其尺度是由以波长为单位的基线长度决定的。同一个物理长度的基线,在不同观测波长下对应的是不同的傅里叶分量。因

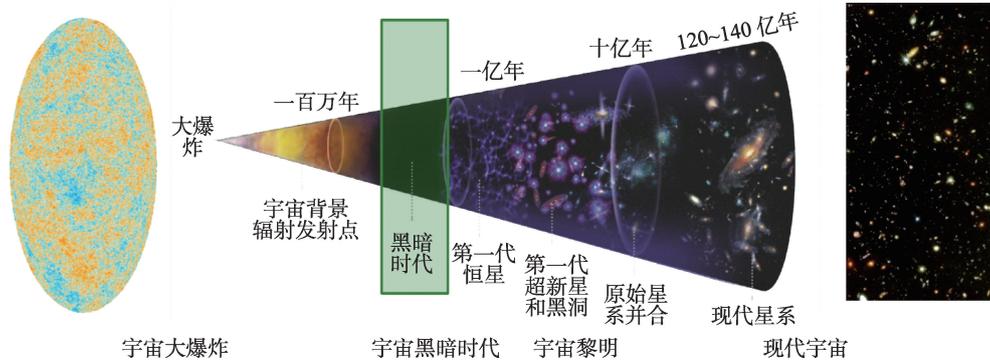


图6 宇宙演化历史

此,要精确减除前景,需要测量一定波数范围内的全部傅里叶分量,这就要求有几乎填满的、大面积的干涉阵。据估计,对黑暗时代的三维成像观测需上百万个偶极子天线、总接收面积达几十平方千米的阵列^⑩。

由于三维成像观测所需的阵列规模极为巨大,目前阶段人们退而求其次,主要考虑的是对整体谱的观测,也就是放弃成像,而精确测量黑暗时代和宇宙黎明时代的全天平均频谱。测量整体谱只需要单天线即可。如图7所示。这些信号的强度仍远低于前景辐射,需要确保测量装置有不随频率改变、或非常平滑地改变的响应,才有可能测量出来。由于整体谱测量装置要求的实验规模不大,目前,国际上有 EDGES(美国)、BigHorn(澳大利亚)、SCI-HI(美国-墨西哥)、High-Z(美国)、PRIZM(南非-加

拿大)、SARAS(印度)、LEDA(美国)等许多实验尝试进行整体谱测量。2018年2月,EDGES实验宣称首次测量到78 MHz处的吸收特征,找到了宇宙黎明信号^⑪,引起了轰动,被评为2018年世界十大科技进展之一。但是,这一结果是否可靠仍有待进一步的验证。同时,发现的吸收谱信号高达550 mK,远高于一般模型的理论预言(若考虑宇宙气体非均匀分布,与理论的差异可能还更大^⑫),如果成立的话,需要引入与重子物质相互作用的暗物质等非标准的模型才能解释^⑬。

除了宇宙黑暗时代外,在太阳射电爆发、行星的磁层、星际介质、系外行星、宇宙线起源、脉冲星辐射机制、超大质量黑洞与喷流等方面,超长波观测也有许多令人期待的成果。限于篇幅,这里就不赘述了。

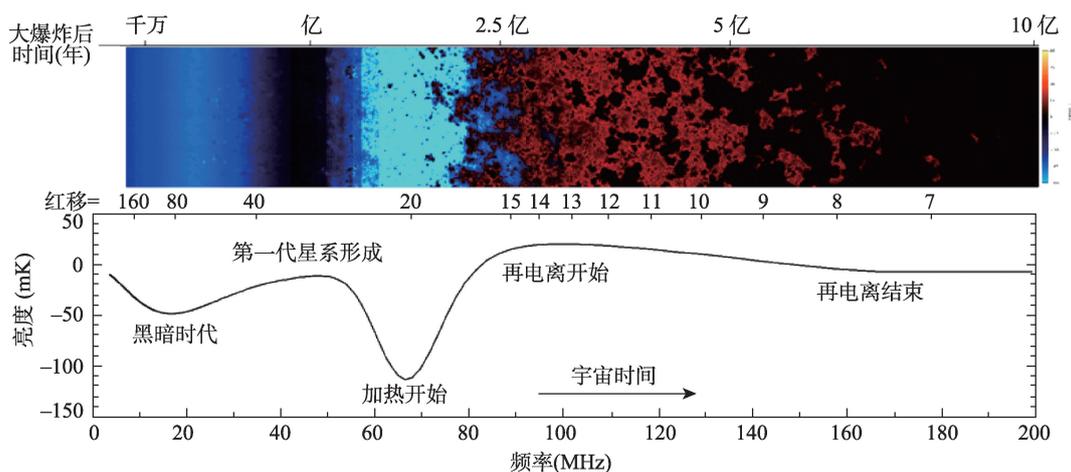


图7 宇宙演化(上)和对应的红移21 cm整体谱(下)

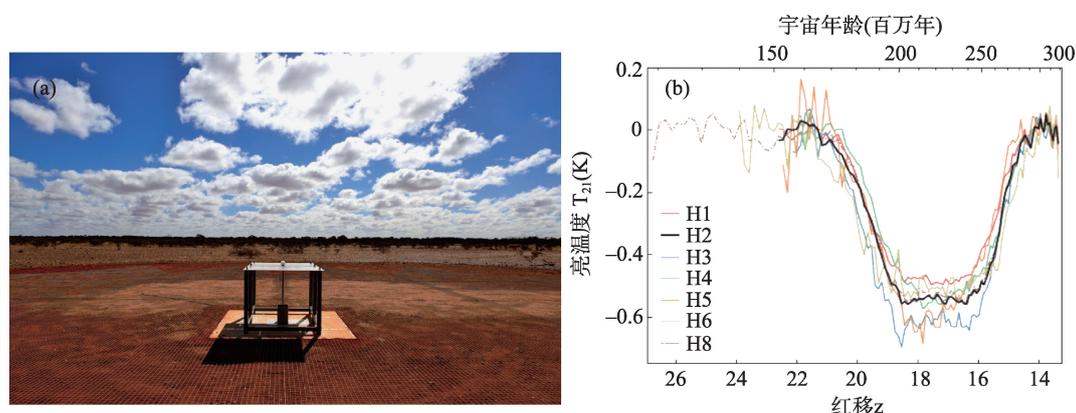


图8 EDGES实验的偶极天线(a)和发现的吸收谱特征(b)

3. 嫦娥-4号的超长波观测

RAE-2的研制还在20世纪60~70年代,当时的电子技术还比较简单。从20世纪80年代以来,随着电子技术、数据处理技术的发展,许多科学家一直希望能够开展新的超长波空间观测,打开这一电磁频谱的新窗口。2018年,随着嫦娥-4号任务的开展,我国科学家迈出了重启超长波观测的第一步。

由于潮汐锁定,月球的公转周期和自转周期相等,因此月球在旋转过程中始终是以同一面对着地球。直到1959年10月,前苏联的航天器月球3号绕飞月球并发回了传真照片,人类才首次看到了月球背面的样子。此后,虽然有阿波罗载人飞船和多个无人飞船在月球着陆,但着陆点均在月球正面,月球的背面还一直是空白,嫦娥-4号是人类首次在月球背面着陆。为了能够监控航天器的着陆过程、传回在月球背面的探测数据,需要有一个中继星运行在月球后侧能同时看到月球背面和地球的地方,负责传递数据。我国为此发射了“鹊桥”号中继星,在环绕地月系统L2点的光晕轨道上运行,保障嫦娥-4号任务的顺利实施。

嫦娥-4号项目中包括3个低频射电项目,分别

是(1)在嫦娥-4号着陆器上有由中科院电子所和国家天文台联合研制的低频射电载荷,包括三对相互垂直的偶极子天线和一个短抗干扰天线及接收机^⑤; (2)在鹊桥中继星上,搭载了中荷联合低频探测器,包括三对相互垂直的偶极子天线及接收机^⑤; (3)在发射鹊桥中继星的火箭上,搭载了由哈尔滨工业大学和中科院空间中心联合研制的龙江1号和2号小卫星,这两个小卫星在进入地球轨道后即分离出来,自行飞到绕月轨道,开展空间干涉实验^⑥。

2018年5月21日,鹊桥中继星由西昌卫星发射中心发射,并成功进入光晕轨道。2018年12月8日,嫦娥-4号着陆器由西昌卫星发射中心发射,于2019年1月3日在月球南极-艾特肯盆地冯·卡门撞击坑着陆,随后月球车玉兔-2号开始月面巡视探测。遗憾的是,龙江-1号卫星因故障失控,只有龙江-2号卫星成功进入了绕月轨道。目前,嫦娥-4号着陆器、鹊桥中继星和龙江-2号上的低频射电探测实验均已开机运行,已收集了一些观测数据,研究人员正在对这些数据进行分析,预计不久的将来将发表观测结果。

嫦娥-4号重启了人类利用月球背面进行低频射电的征程。不过,嫦娥-4号低频探测的局限性比

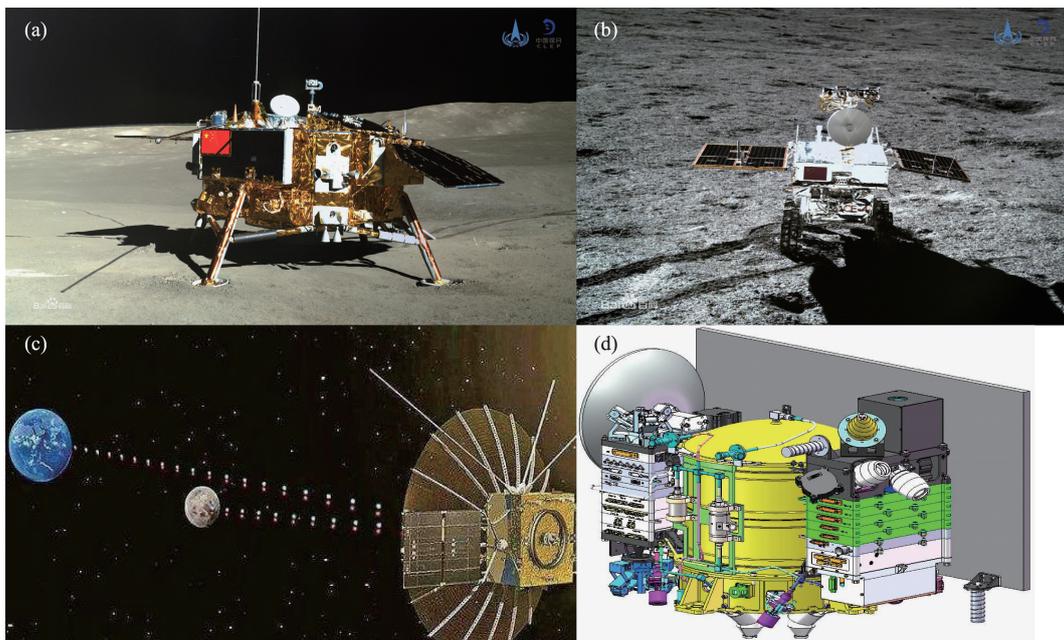


图9 (a)嫦娥4号着陆器;(b)玉兔2号巡视器;(c)鹊桥号中继星;(d)龙江小卫星

较大。嫦娥-4号着陆器、鹊桥中继星以及龙江微卫星都是基本利用原有的卫星平台设计和部件,而当初的设计方案没有考虑低频射电探测的需求,因此自身电磁干扰比较严重。限于时间和经费,也不可能对其进行较大改进。这些自身干扰对系统的探测灵敏度有很大影响。因此,嫦娥-4号的几项低频探测主要还是试验性的。真正的超长波天文观测还有待未来。

4. 未来的空间低频射电

自20世纪80年代以来,人们提出了多种开展超长波空间观测的概念方案设想,主要包括地球轨道阵列、日地系统轨道(比如第二拉格朗日点L2)的阵列、环绕月球的单星或多星阵列,在月球背面或月球极地的射电阵列等。这里简单介绍一下其中比较典型的几个方案。

4.1 地球轨道

地球轨道实现最为简单,就是在地球轨道上部署多颗卫星构成干涉阵进行观测,发射费用比较低廉。RAE-1已经表明,地球轨道将受到较多的地球射电干扰,不过针对太阳爆发这样较强的辐射,观测还是可行的。因此地球轨道方案主要是低成本方案。一个典型是美国的SUNRISE计划^①,由6个低成本的立方微卫星组成,利用发射其他地球同步轨道卫星的火箭搭载发射,计划部署在略高于地球同步轨道、半径10 km的范围内。每颗星上装有GPS接收机,通过接收GPS信号定位,将数据传回地面,由地面进行干涉阵数据处理。

4.2 日地系统阵列

日地系统轨道的阵列距离地球较远,可以选择日地系统L2点,也可以选择其他离地球较远、与地球一起环绕太阳运转的位置。这些点暴露在地球辐射下,但因离地球已经比较远,因此干扰的幅度已不太高,可以通过数据处理去除其中的一大部分。欧空局曾先后讨论过ALFA[®]、SURO[®]等方

案。以ALFA为例,它由分布在直径100 km的球面上的16个小卫星组成阵列。这种阵列的优势是具有全天视野,特别适合对瞬变源、爆发源的监测,但缺点是易受地球和太阳的干扰;所需的发射费用较高,又因为距离远,数据下行所需的资源(地面站)也比较多。另外一个技术难题是射电干涉阵观测需要知道每对卫星之间形成的的基线矢量,与地球轨道不同,这里离地球较远,难以使用GPS定位。卫星分布在四面八方,无论是采用光学还是无线电定位,都需要较多星上资源,对微卫星来说实现难度较大。

4.3 绕月轨道

绕月轨道方案是发射卫星环绕月球飞行,在月球背面轨道部分观测,在正面(面向地球的一面)传回数据。由于无需着陆,因此可以省去着陆系统所需的推进剂和减震系统重量,同时由于月球轨道周期一般只有两个多小时,可以用太阳能电池而无需担心能源问题。另外,月球对地球遮蔽效果好,有时还能同时遮蔽地球和太阳甚至行星,有助于微弱信号探测。如果使用单星,可以精确地测定全天平均频谱。典型的项目如美国探索宇宙黎明的DARE[®](经过多年研发,但未能立项)和更低频率的DAPPER。

除了单星外,也可以通过绕月轨道组阵方式进行成像观测^②。一种工程上特别便于实现的方案是由一颗母星和若干子星沿同一轨道运行,排成线阵,基于这一方案2014年中国-波兰-荷兰联合提出了DSL项目概念^{②③}。这一方案可以利用微波通

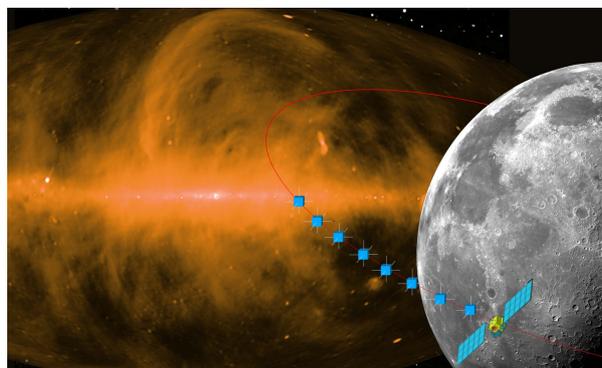


图10 绕月线性编队卫星

讯实现子星到母星的数据传输,并用微波载波实现距离测定。在母星上设置发光装置,子星用星空相机拍摄,通过星图识别确定与母星连线相对于恒星的位置,从而精确测定基线。阵列数据统一由母星传回地球,从而省去了每个子星上的对地数据传输系统。绕月线阵的主要缺点是任一时刻其各基线的方向基本是相同的,需要经过轨道运转才能实现不同方向的基线。而且,轨道面的两侧又存在镜像对称,只有经过一段时间,轨道面发生进动,形成三维的基线分布,才能实现全天成像^④。因此,线阵对瞬变源、爆发源的观测能力较差。如果让各星的轨道高度、倾角等略有差别,则各星瞬时形成的基线可以展开成二维或三维分布,但这些基线将随时变化,给定位和操控带来更大的难度。此外,轨道部署几个到十几个单元的阵列比较简单,但阵列单元数量再大的话,相互的定位、数据传递、甚至阵列运行的技术就比较复杂了^⑤。目前,我国已在中科院先导专项背景型号项目中设立了超长波天文观测阵列课题,开展进一步的研究。

4.4 月面阵列

在月球表面特别是其背面部署超长波射电阵列的设想已有很多年^⑥,此外也有考虑利用月球极地建立阵列的设想^⑦。需要解决一系列技术问题,包括如何安装、部署,如何解决月夜期间的供电问题,如何传输、处理数据,并将数据传回地球。不过总的来说,月球表面提供了一个稳定的平台,与月球轨道阵列相比,阵列单元的位置和姿态是稳定

的,在阵列规模较大时显然更便于运行。不过,月球在太阳照射下会形成一个暂时性的、变动的电离层,对观测有一定影响。另外,月球表面覆盖着月壤,这基本是一种电介质,月壤本身的介电常数、月壤下方导电岩层的深度等都有可能随地点而变,这对阵列观测也会有影响。

月面阵列可以采用导电材料(金属或碳纤维等)制成的振子天线。此外,在聚酰亚胺薄膜上用印制金属导电线路构成阵列天线也是一种低成本、大规模部署射电阵列的新思路^⑧。类似LOFAR, MWA, LWA, SKA-low等地面低频阵列,月面阵可以由几十到几百个甚至更多振子组成基站,再由多个基站构成阵列,获得巨大的接收面积,最终实现宇宙黑暗时代的成像观测。

5. 结语

哥伦布在横渡大西洋时,所想的只是找寻通往亚洲的航线,以获取香料等贸易产品,发现美洲大陆是完全意料之外的事情。同样,当人们开始对新的波段进行观测时,也往往会有完全出乎预料的发现。早期天文学家们并未期待在无线电波段能观测到什么天体,因为根据热辐射理论,普通恒星产生的无线电辐射并不强。当卡尔·央斯基意外发现银河系的射电辐射时,一度没有理论能够很好地解释这一辐射的来源,直到后来同步辐射被发现,再结合宇宙线的观测,人们才认识到这些低频射电辐射来自银河系内宇宙线电子的同步辐射。射电天

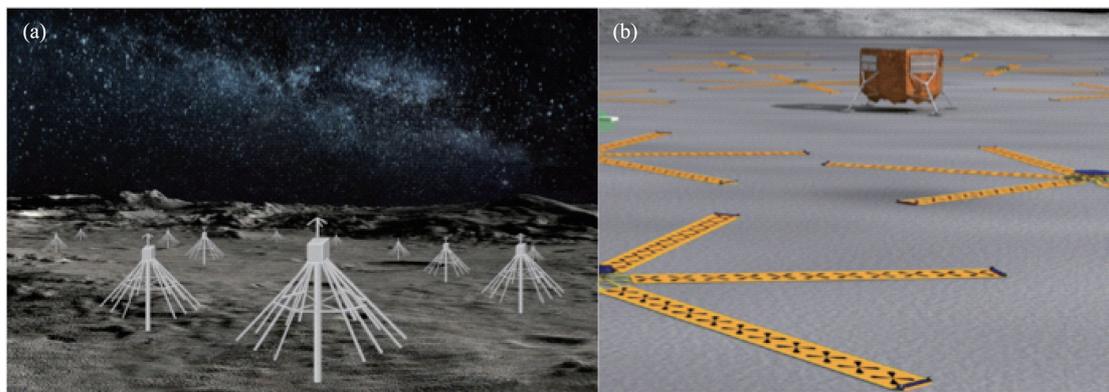


图 11 (a)由振子天线组成的月面阵列;(b)聚酰亚胺薄膜印制电路组成的阵列

文观测进而又发现了类星体、射电星系、脉冲星、宇宙微波背景辐射等。同样,当人们刚开始尝试X射线天文观测的时候,曾以为也只有离我们很近的太阳和月球能被观测到,却意外地发现了密近双星吸积盘产生的X射线源。现在,我们还并不能够很有把握地预测究竟在超长波观测中会发现些什么,但无疑,这是一个令人充满了期待的领域。我国通过嫦娥-4号任务,已经迈出了探索超长波探测的第一步,引起了国际上的广泛关注。但是,要真正实现超长波天文学的突破,今后还需要持续的努力。

致谢:本文的研究工作得到了中国科学院“空间科学(二期)”战略先导科技专项背景型号项目(XDA15020200),中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-SLH017)、国家自然科学基金重点项目(11633004)、国家自然科学基金委员会中以合作项目11761141012的资助,谨就此表示感谢。

参考文献

- ① K.G. Jansky, “Radio Waves from Outside the Solar System”, *Nature*, 132, 66 (1933)
- ② G. Reber, “Hectometer Radio Astronomy”. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 88, 297 (1994)
- ③ H. V. Cane, W.C. Ericson, “A 10MHz Map of the Galaxy”. *Radio Science*, 36, 1765 (2001)
- ④ J. A. Alexander, M. L. Kaiser, J. C. Novaco, F. R. Grena, R. R. Weber, “Scientific Instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 Satellite”, *Astronomy & Astrophysics*, 40, 365 (1975)
- ⑤ J. C. Novaco, L. W. Brown, “Nonthermal Galactic Emission Below 10 MegaHertz”, *Astrophysical Journal*, 221, 114(1978)
- ⑥ U. Keshet, E. Waxman, A. Loeb, “Imprint of Intergalactic Shocks on the Radio Sky”. *Astrophysical Journal*, 617, 281(2004)
- ⑦ 陈学雷、徐怡冬、岳斌等:《10000个科学难题·天文学卷》,“宇宙的黑暗时期”(p.500-503),“宇宙再电离”(p.504-509),“第一代恒星的形成与性质”(p.510-515),科学出版社(2010)
- ⑧ A. Loeb, M. Zaldarriaga, “Measuring the Small-Scale Power Spectrum of Cosmic Density Fluctuations Through 21 cm Tomography Prior to the Epoch of Structure Formation”, *Physical Review Letters* 92, 211301 (2004)
- ⑨ X. Chen, J. Miralda-Escude, “The Spin-Kinetic Temperature Coupling and the Heating Rate due to Lyman Alpha Scattering before Reionization: Predictions for 21cm Emission and Absorption”, *Astrophysical Journal* 602, 1 (2003)
- ⑩ Jester, S., Falcke, H., Science with a lunar low-frequency array: from the dark ages to nearby exoplanets, *New Astronomy Reviews* 53, 1(2009)
- ⑪ J. D. Bowman, A.E.E. Rogers, R.A. Monsalve, T.J. Mozdzen, N. Mahesh, “An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum”, *Nature*, 555, 67 (2018)
- ⑫ Y. Xu, B. Yue, X. Chen, “The Global 21 cm Absorption from Cosmic Dawn with Inhomogeneous Gas Distribution”, *Astrophysical Journal* 869,42(2018)
- ⑬ R. Barkana, “Possible interaction between baryons and dark-matter particles revealed by the first stars”, *Nature*, 555, 71(2018)
- ⑭ 贾瑛卓,邹永廖,薛长斌,平劲松,严俊,宁远明,“嫦娥四号任务科学目标和有效载荷配置”,*空间科学学报*,38(01),118(2018)
- ⑮ L. Chen, H. Falcke, J. Ping, M. Klein-Wolt, “Development of the Netherlands - China Low Frequency Explorer (NCLE)”, *COSPAR* 42, B3.1-26-18 (2018)
- ⑯ 曹喜滨,张锦绣,陈学雷,安军社,“月球轨道编队超长波天文观测微卫星任务”,*深空探测学报*,4(2),158(2017)
- ⑰ J. Lazio, J. Kasper, F. Alibay, J. Lux, A. Hegedus, A. Romero-Wolf, “Sun Radio Interferometer Space Experiment (SunRISE) Mission Concept: Development Status”, *COSPAR* 42, E1.8-20-1(2018)
- ⑱ D.L. Jones, R. J. Allen, J. P. Basart et al. “The ALFA medium explorer mission”, *Advances in Space Research*, 26(4),743(2000)
- ⑲ R.J. Blott et al., “Space-based ultra-long wavelength radio observatory (low cost) - SURO- LC”, *European Planetary Science Congress*, 8, 279(2013)
- ⑳ J. O. Burns et al., “A Space-Based Observational Strategy for Characterizing the First Stars and Galaxies Using the Redshifted 21-cm Global Spectrum”, arxiv:1704.02651
- ㉑ 陈学雷,“关于发展我国空间低频射电天文学的一些设想”,中国宇航学会深空探测技术专业委员会第2届学术年会会议文集 p.49,中国宇航学会(2005)
- ㉒ A-J. Boonstra, M. Garret, M. Wise, G. Kruitthoof, A. v. Ardenne, X. Hong, T. An, H. Rothkaehl, J. Yan, J. Wu, J. Zheng, H. Falcke, M. Klein-Wolt, X. Chen, M. Huang, L. Chen, E.K.A. Gill, J. Guo, L. Gurvits, M. Bentum, L. Koopmans, P. Zarka, J. N. Girard, H. d. Haan, “Discovering the Sky at the Longest Wavelengths (DSL)”, IEEE Aerospace conference, 2015
- ㉓ 吴季,洪晓瑜,阎敬业,黄茂海,陈学雷,安涛,武林,“超长波射电天文望远镜”,第二十八届全国空间探测学术研讨会,兰州,2015年
- ㉔ Q. Huang, S. Sun, S. Zuo, F. Wu, Y. Xu, B. Yue, R. Ansari, X. Chen, “An imaging algorithm for a lunar orbit interferometer array”, *Astronomical Journal* 156, 43(2018)
- ㉕ B. Cecconi et al., “NOIRE Study Report: Towards a Low Frequency Radio Interferometer in Space”, arxiv:1710.10245
- ㉖ Y. Takahashi, “New Astronomy from the Moon: A Lunar Based Very Low Frequency Radio Array”, M.Sc thesis, University of Glasgow(2003)
- ㉗ R. J. McDowall, F. A. Minetto, T. W. Lazio, D. L. Jones, J.C. Kasper, J. O. Burns, K.P. Stewart, K. W. Weiler, “Antenna Deployment for a Pathfinder Lunar Radio Observatory”, *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 220, 304.06(2012)