

千眼天珠：直径千米的超级射电望远镜

阎敬业

(中国科学院国家空间科学中心 100190)

稻城太阳射电成像望远镜(千眼天珠)是“十三五”国家重大科技基础设施子午工程(二期)的标志性设备,位于四川稻城。2023年9月27日,千眼天珠正式通过工艺验收。试运行以来,已积累了大量独特、独有的射电观测数据,正在并行开展多项研究,涵盖太阳物理、空间天气、射电天文和行星防御等学科方向。由于其巨大的规模和先进的技术,这部超级射电相机产生了很大的学术影响,受到国内外学者和公众广泛关注。

充满现代科技感的千眼天珠其实并不神秘,本文简要介绍千眼天珠的研究背景、科学目标、观测原理等基础知识,推动大科学装置服务科普等社会公益事业发展。

一、进入太空,需要关注空间天气预报

1957年10月4日,前苏联发射了第一颗地球人造卫星“斯普特尼克1号(sputnik-1)”,迈出了人类进入太空的第一步。

为了直接测量来自星空深处的宇宙线粒子,前苏联科学家谢尔盖·韦尔诺夫领导团队研制了一根盖革-缪勒管,以测量卫星遭受的辐射强度。斯普特尼克2号卫星发射升空后不到3个月,刚刚组建的美国国家航空和航天局(NASA)发射了探险者1号卫星,携带了詹姆斯·范艾伦团队研制的盖革计数器。两个团队都发现了计数率异常,但范艾伦团队意识到这是一种存在于地球空间的自然现象,在此之前没有人预测过地球磁场捕获高能粒子会形成辐射带,因此地球空间辐射带也被称为范艾伦辐射带。斯普特尼克2号虽然首先探测到辐射带粒

子,但苏联科学家错误地认为计数值波动是受太阳耀斑的影响,错失了首先发现辐射带的机会。这也标志着人类早期航天活动就开启了一门新的学科——空间物理学。

空间物理学主要利用空间飞行器来直接探测和研究地球空间、日地空间和行星际空间中的物理过程,是空间科学中发展最早的一个分支。空间物理包罗万象,主要研究等离子体、电离层、磁层、辐射带、太阳风等自然现象。

空间天气相对而言就更贴近实用。美国在1994年11月将“空间天气”定义为:空间天气系指太阳上和太阳风、磁层、电离层和热层中影响空间和地面技术系统的可靠运行及危害人类健康和生命的空间环境扰动事件。同时,空间天气学还研究各种空间天气效应,以及规避和减轻空间天气灾害的方法和途径。一般认为,空间天气学是一门应用科学,但更确切地说,它是由基础科学和应用科学交叉而形成的一门科学。

太阳剧烈的爆发活动可能会引起灾害性空间天气事件,不但会危害卫星、飞船等太空平台的安全运行,也可能危害电网和高铁运行、短波通信、导航定位、雷达预警等地面高技术系统。据统计,在轨卫星故障有一半左右是受到空间天气事件的影响。1989年加拿大魁北克省的电网遭到空间天气事件的破坏,损失达10亿美元。2022年2月3日,一次不大的地磁暴事件导致太空探索(SpaceX)公司的近40颗星链卫星陨落。随着高技术的发展,人类的生产生活和太空探索都越来越依赖于空间天气环境,这也意味着空间天气的探测-研究-预报-应用链条将发挥越来越大的作用。

太阳活动是地球空间天气扰动的源头,谈到空间天气,就避不开太阳风暴。太阳最剧烈的爆发活动包括耀斑和日冕物质抛射(CME)等。

二、子午工程,监测空间天气因果过程

太阳活动是地球灾害性空间天气之“因”,地磁暴等近地空间环境响应是太阳风暴与地球空间环境相互作用之“果”。为了研究日地空间天气因果链,国家重大科技基础设施子午工程(二期)专门建设了一链、三网、四聚焦的整体监测体系(图1)。太阳行星际监测链(一链),用来监测太阳风暴-日冕活动、日地行星际传播这一关键链条;电离层监测网、中高层大气监测网、地磁监测网(三网)用来监视地球空间环境的扰动;北方中纬、青藏高原、海南低纬、极区高纬这四个区域(四聚焦)实现对一些具备特殊空间天气现象以及对中国区域影响较大的重点地区的监测。

其中,太阳行星际监测链关注的是太阳爆发活动及其行星际传播规律。由于太阳风暴从爆发到进入行星际,以及向地球传播的过程中,伴随着复杂的物理过程,不同物理过程往往都会辐射出不同频率的电磁波。因此,子午工程二期的“一链”利用不同频率的光学望远镜和射电望远镜可以监测不同日面距离的爆发和演化过程。

稻城圆环阵太阳射电成像望远镜是子午工程二期的标志性监测设备,专门用于监测亮度、时间和空间三个维度都高度动态变化的高日冕活动。

三、千眼天珠,监视太阳风暴的利器

太阳剧烈的爆发活动往往会伴随有射电辐射,探测射电辐射的强度、频率、极化和空间位置,对于理解爆发过程、物理机制和传播演化规律具有不可替代的作用。CME的传播和演化过程中,等离子体团会压缩前方的粒子形成激波,激波会加速日冕和太阳风中的自由电子产生射电辐射,辐射频率随背

景自由电子的密度减小而降低。

因此,与CME传播和演化密切相关的II型射电暴具有独特的频谱漂移特征。在已知背景自由电子密度的情况下,测量II型射电暴源区的位置、频率和频率漂移率,就可以计算CME的日心距、传播方向和运动速度,进而预测CME在行星际空间的三维传播和扩张过程,提高CME对地影响有效性的预报精度。

圆环阵太阳射电成像望远镜(DAocheng Radio Telescope, DART)部署在四川省甘孜州稻城县(图2)。

DART由313个直径6米的抛物面天线和100米高的中心定标塔构成,天线均匀分布在直径为1千米的圆环上。密集基线可以高质量地对太阳进行干涉成像,千眼天珠拥有约5万条瞬时干涉基线,是目前全球规模最大的综合孔径射电望远镜。

一般而言,射电爆发的频率是局地等离子密度的函数,密度越低,辐射频率也就越低。DART重点监测CME进入行星际的过程,因此选在150~450 MHz频段(对应0.1~1 Rs的日面距离)监视高日冕的射电爆发活动,对于预测CME在行星际的传播及其对地球空间天气的影响具有重要意义。DART采用了独特的圆环阵列构型和原创的单通道多环绝对相位定标技术,幅度/相位的实时定标精度达到国际领先水平,是国际上同频段成像质量最高的射电望远镜。

日出而作,日落而息,DART从日升开始工作,到日落结束观测。为了充分发挥设备能力,除了白天8小时观测太阳,DART作为一台高性能通用型射电成像望远镜,还在夜间加班,开展了一系列新观测,获取了一批独特的观测数据,推动了太阳物理、空间天气、射电天文、行星防御等多学科交叉研究。

四、综合孔径,超越单天线分辨极限

手机拍照,只需要一个小摄像头。要想在射电频段拍照,就要用到极具科技感的天线阵列。看起来没有任何相似之处的两种“相机”,之所以能够成像,

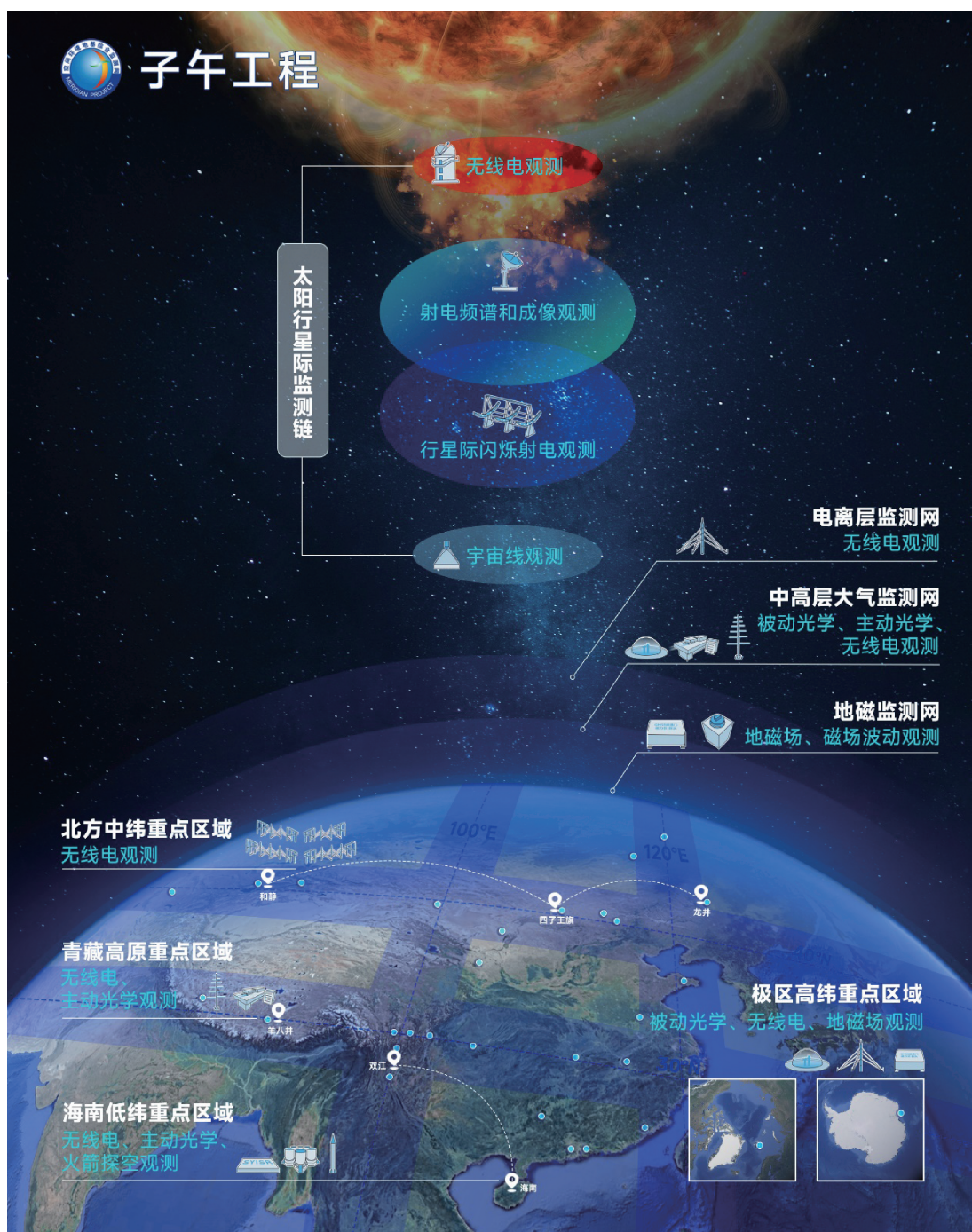


图1 子午工程二期“一链、三网、四聚焦”整体监测框架(国家空间科学中心供图)

是因为二者在本质上都具有对电磁波的聚焦能力。

4.1 光学成像原理

人眼就是一种光学相机(图3)。外界的每个“点光源”，都会向一定角度范围内发射光线。这些光线通过人眼中的晶状体，就聚焦到视网膜上的某个

点，人就看到了点光源的“像”。成像过程中，具有一定“口径”的晶状体发挥了“聚焦”的作用，将照射到晶状体表面上的光线聚集到像平面上的一个点，这样眼睛就看到了这个点光源的位置、亮度和颜色(波长)。

光学相机的角度分辨率主要受瑞利判据限制，由波长归一化(口径/波长)的镜头口径，即电尺寸决



图2 建设中的“千眼天珠”(国家空间科学中心供图)

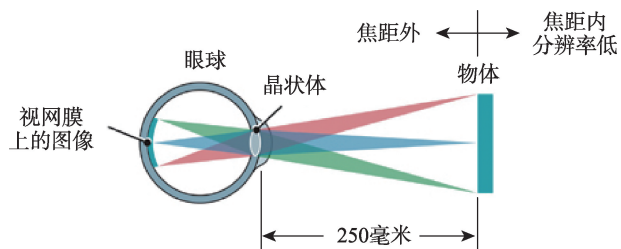


图3 人眼成像原理图

定。例如,人眼的理论角分辨率约为20角秒,而2.4米口径的哈勃卫星的角度分辨率约为0.05角秒。

增加口径不仅能提高角度分辨率,而且能搜集更多的光子,也就具有更高的灵敏度,能看到更暗

弱的光源。

4.2 单口径射电望远镜

射电望远镜的成像原理跟光学成像没有本质的区别,也需要利用更大的口径实现更高的角分辨率,看到更暗弱的目标。

刘慈欣著名的科幻小说《三体》就想象有一部巨大的“红岸基地”雷达,能够接收几光年以外三体人发射电磁波。

目前国际上最大口径的单天线是中国天眼(图4),大锅的口径为500米,有效接收口径约300



图4 左图:中国天眼(FAST);右图:千眼天珠(DART)(国家空间科学中心供图)

米,灵敏度全球最高,相同频率下的单天线角度分辨率在国际上遥遥领先,发现了一大批脉冲星和快速射电暴,取得了一大批重大科学发现。

然而,对于太阳这样高度动态的射电源,单口径天线逐点扫描的观测方式不再适用,需要一种大视场、高分辨率、同时监视全日面的高帧频拍照观测机制。

4.3 综合孔径射电望远镜

望远镜的口径和角分辨率成比例,口径越大,角分辨率越高。南仁东老师带领团队找了十几年,才找到一个合适的灶台,安放FAST这口500米的大锅。

要想找到更大口径的天然灶台,难度是非常大的。要想在平地上挖个500米的灶台,据估算投资需要数十亿。因此,天文专家认为FAST的500米口径差不多就到极限了,很难做出更大口径的单天线望远镜。

如何才能突破单天线望远镜的口径限制,是实现高分辨率探测的核心问题。

受杨氏双缝干涉实验的启发,迈克耳孙和皮斯首先在光学领域采用了干涉技术提高角分辨率。他们使用两组镜片,将入射的星光通过两条独立的路径($m_1 \rightarrow m_2$, $m_3 \rightarrow m_4$)折射到像平面,被称为二元干涉仪(图5)。

当两个光路的光程差等于波长的整数倍,光波就同相叠加,形成光强度极大值;当光程差等于半波长,光波就反相对消,形成光强度的极小值。这样在像平面上就形成了明暗交替的条纹,被称为干涉条纹。

如果光源是理想点源且辐射单频信号,两路光波就能完美地同相叠加和反相对消,此时条纹的光强极大值等于两倍光波强度,极小值等于零;如果光源有一定空间结构(扩展源),或者接收带宽较大,光波不能理想对消,极小值就不等于零。

为了表征条纹的相对幅度,迈克耳孙定义了条纹可见度函数:

可见度函数=(极大值-极小值)/(极大值+极小值)。

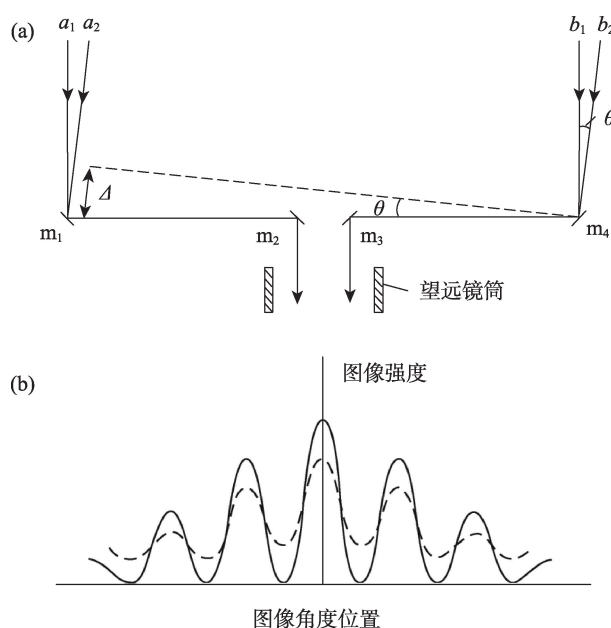


图5 (a)迈克耳孙-皮斯恒星干涉仪原理图;
(b)双反射镜干涉条纹

根据这一定义,当极小值等于0,则可见度等于1,也就意味着恒星角直径远小于条纹宽度,根据条纹宽度就可以限制恒星直径的上限。

基于这样的认识,他们用干涉技术测量了大角星和参宿四等距离较近的恒星,能够获得非常高的角分辨率。

射电天文学家首先意识到射电辐射场和光学辐射场的本质是相同,光学干涉测量的实践为射电干涉测量理论的发展提供了宝贵经验。

干涉条纹在像平面上呈现周期震荡特征,震荡的频率表征空间域的明暗分布特征。用一个二元干涉仪,可以测量空间域图像的一个明暗起伏的频率。二元干涉仪两个镜片的距离(基线)越大,测量的条纹频率就越高。因此,基线越长,可以测量的空间频率越高,也就可以反映空间域亮度分布的小尺度结构特征;基线越短,测量的空间频率越低,反映的是空间域亮度分布的较大尺度结构特征。因此,一条基线测量的可见度幅度和相位对应于空间频率域一个采样点。如果能在空间频率域采集到很多采样点,就可以通过傅里叶变换反演空间域的图像。

受光学二元干涉仪启发,剑桥大学射电天文学教授马丁·赖尔(Martin Ryle)在20世纪40年代中期

发明了射电波段的二元干涉仪,从而大大提高了测量射电源位置的精度。此后,他又提出了综合孔径射电望远镜的设计思想,用若干单元天线构成阵列,单元天线两两进行干涉,测量不同频率的可见度数据,再通过反演算法进行处理,成功获取了射电源图像。

综合孔径射电望远镜的诞生开辟了射电天文学的新纪元,马丁·赖尔也因为这一重大贡献,荣获了1974年诺贝尔物理学奖。

此后,世界各地建设了多台套综合孔径成像望远镜。阵列规模从几个天线到二百余部天线(俄罗斯十字阵),观测频率从数十MHz到约1THz(ALMA),阵列尺寸从数米到几十万千米(俄罗斯Radio-Astron卫星),应用领域涵盖了射电天文、太阳物理、对地遥感等很多学科。经过近80年的发展,综合孔径射电望远镜以其复杂的系统工程、极致的技术要求、精密的分析方法,以及强大的观测能力,已成为空间科学和天文领域顶级的科研装备之一,正在发挥着不可替代的作用。

五、千眼天珠,稻城圆环阵太阳射电成像望远镜

千眼天珠部署于四川省甘孜州稻城县(东经100.246°,北纬29.011°)。针对高度动态的太阳观测需求,设计了313天线单元的巨型阵列,采用综合孔径成像技术,兼顾大视场、高分辨率、高动态范围等特殊需求,整个系统采用了独特的圆环阵列构型和中心定标总体方案。

5.1 为什么采用圆环阵列

光学望远镜通过纳米级精度的镜面加工工艺实现光线的聚焦,DART射电阵列要求的形面精度只需要达到毫米级。尽管如此,无论是天线加工、立柱安装,还是模拟信号处理、光链路传输,造成的误差都很难控制到分米级。野外设备随着环境温度变化还会导致相位漂移,长期运行时器件老化也会导致相位漂移。总而言之,即便每个天线都可以

加工得非常精确,运行过程中也存在各种误差。如果不进行修正,就会像光学镜头被污染一样,导致成像性能恶化,甚至无法成像。

射电阵列中,测量每个天线的链路幅度相位一致性和漂移的过程被称为定标;根据定标结果,修正幅度相位误差的过程称为标定。

如果有一个等幅同相的电磁波信号(定标信号)同时照射所有天线,理想望远镜输出的所有干涉可见度数据也应具有等幅同相的特征。非理想的望远镜系统的幅度相位误差都会体现为定标信号的可见度数据的幅度相位差异,修正这些差异,就实现了阵列天线的标定。

稻城望远镜采用圆环阵列构型,就可以在中心定标塔顶部架设一部定标天线,从定标天线发出的射电信号,经历大致相同的空间距离到达每个天线,并且所有天线都可以不受遮挡地接收定标信号。如果进一步精确测量每个天线的坐标,并且修正空间传播距离的微小差异,就可以保证每个天线接收到定标信号的一致性。

因此,圆环阵列构型和中心定标总体方案,可以提供一种可控的高精度定标手段,可以随时根据需要“擦拭镜头”,为高质量成像观测提供了关键保证。

5.2 为什么选在稻城

(1) 宁静电磁环境

阵列望远镜占地面积大,射电探测灵敏度极高,容易受到电磁干扰的影响。因此,DART选址的要求包括地势平坦开阔,电磁环境干净。

中国东部平坦开阔之地甚多,但一方面寸土寸金,低成本的科研仪器很难负担天价的土地成本;另一方面,东部城市密集,电磁环境复杂,也难以满足高灵敏度观测的需求。

也正是因此,FAST选址工作聚焦在喀斯特地貌,潜在的“灶台”比较多,电磁环境也比较干净。

千眼天珠选址也类似,需要找寻群山中的开阔盆地,既便于阵列天线的安装调试,又能靠群山遮挡,提高比较好的电磁环境(图6)。



图6 较为理想的“盆”型地貌(国家空间科学中心供图)

稻城地处青藏高原过渡带,金珠镇所在地附近多山,又恰好有一片较为开阔的平地,地理结构恰好像个“盆”,完全能够满足天线阵列架设和电磁环境的要求。

(2) 较低的纬度

DART的主要科学目标是观测太阳,站址的纬度越低,观测的效果越好。这就像人眼在正视目标的时候,看得最清楚。如果纬度较高,就像用余光观测,仍然能看,但是成像效果会变差。这个比喻并不准确,但大致效果类似。

虽然新疆、青海等地也有不少地势平坦,电磁环境也不错的地方,但纬度偏高,会影响成像观测的效果。

六、科学目标

6.1 太阳射电观测

白天8小时,DART将持续监测太阳。

从频谱结构划分,太阳射电爆发结构包括5种类型,表征太阳大气中的不同物理过程。一般认为Ⅱ型射电暴是由太阳爆发所驱动激波处加速的高能电子辐射产生,辐射频率由当地的等离子体振荡频率决定。根据日冕电子密度模型,DART观测频段150~450 MHz所对应的日面高度约0.1~1 R_s (太阳半径)。

然而,2024年5月27日观测到的一例射电爆发事件,射电源的传播距离达到5个太阳半径,挑战了Ⅱ型暴的传统解释机制。

自2021年底,DART实验阵列(16单元)建成以来,已积累了大量观测数据,并为科学研究用户提供了数十例独特、独有的观测数据。

DART的密集阵列和高精度定标能力,使得DART成为高日冕监测的利器,将在太阳物理和空间天气研究领域发挥越来越重大的作用。

6.2 低频射电巡天

为了实现中心定标,DART的单元天线采用了

三轴(赤经、赤纬和水平)转动机构,虽然最优的成像指向是天顶,但仰角大于15度都可以成像;313部6米口径天线的总接收面积与一部100米口径的单天线相当,具有强大的集光能力,因此灵敏度很高;阵列口径1000米使得成像的角分辨率很高,约为1.6角分;先进的实时处理系统使得成像积分时间在5毫秒至数十秒范围内可调。

这些特点使得DART在低频高质量巡天方面

具有独特的优势。

DART的大视场成像探测能力在搜索长周期脉冲星方面具有独特的优势,最大瞬时视场可达200平方度(图7)。自2024年2月开启低频射电巡天观测以来,已发现一例长周期脉冲星,并发现一例已熄灭、后又重新闪烁的长周期脉冲星。这些发现表明,DART有望在长周期脉冲星搜索这一新兴前沿领域发挥主力装备的作用。

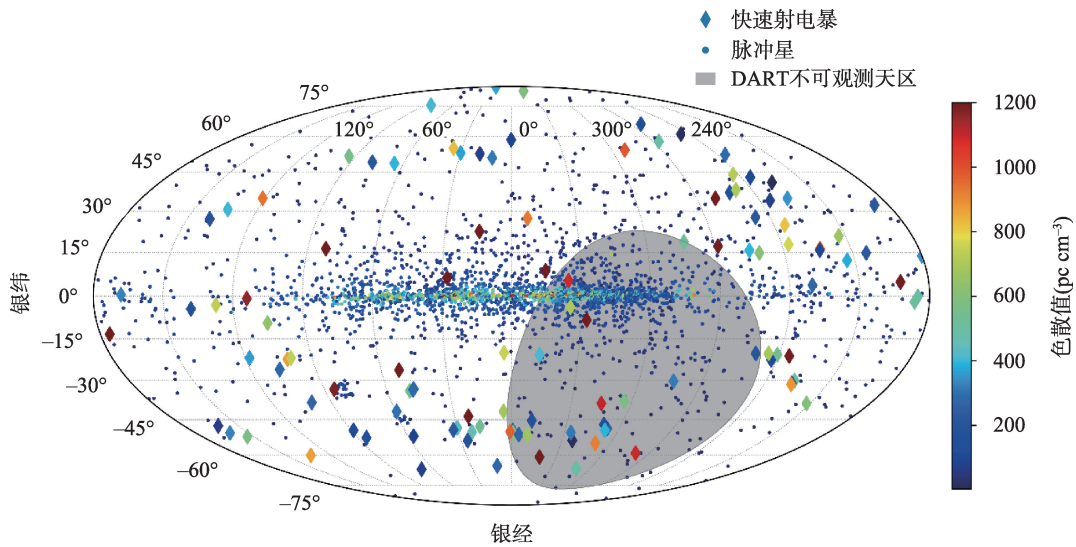


图7 DART的可观测天区范围(国家空间科学中心供图)

七、回顾和展望

历经3年的建设,DART从图纸变为现实。

从方案设计到运行调试,先后有约300名科研人员为DART研制直接贡献了力量。骨干团队来自国家空间科学中心、中国电科39所和16所、北京耐数电子有限公司(普源精测)、石家庄新元电子有限公司、广州高科中实通讯技术有限公司、西安开容电子有限公司等单位。

中国科学院成都分院和四川省各级政府部门为项目选址和建设提供了有力支持。

回顾过去,科学-技术-工程全链路融合,科研-管

理互为支撑,使得DART在建设速度(1年设计、1年验证、1年建设)、投资效率(设备投资仅1亿元)、数据质量(同频段成像质量最高)几个方面都实现了重大突破。经过半年多的试运行,在太阳观测、射电天文等领域正在陆续产出重大成果,已经成为国之科研重器。

展望未来,DART还计划增加射电天文后端、拓展观测频率、增建若干30米口径的大天线,以圆环阵为中心扩展为百千米级地面阵列,将角度分辨率提高两个数量级、灵敏度提高一倍、时间分辨率提高到亚毫秒级,可以看到太阳射电活动区的内部演化细节,可以找到射电暂现源的多波段对应体,必将成为射电研究领域非常重要的科研装备。