# 太阳风中的射电浮标：行星际闪烁

熊　明　冯学尚　王　威　颜毅华

(中国科学院国家空间科学中心，太阳活动和空间天气重点实验室　100190)

## 1. 行星际闪烁的神秘天象

Twinkle, twinkle, little star,
How I wonder what you are.
Up above the world so high,
Like a diamond in the sky!

这是西方英语国家的脍炙人口的经典童谣，形象而生动地描述夜空星星闪烁现象。该英文童谣有不同的中译本，比如："一闪一闪小星星，好奇何物现此景。遥悬尘世烟云外，判若钻石夜空明"。夜空中的星星，间歇闪烁，像是在眨眼睛。该星星一闪一闪的现象是由于地球的大气层的折射和散射效应导致的。特别地，当存在较强的大气湍流时，肉眼可见闪烁明显增强。以小星星为点光源，人眼类比为探测器，湍流大气表现为链接星星和人眼的光线传播介质。大气湍流是大气极其重要的运动形式，导致平均风速和风向以及压强、温度、湿度等气象要素在准稳态的大气背景场中叠加多时空尺度的无规则涨落，使得光线折射指数等大气光学特性发生随机起伏。该大气湍流运动导致的光学相位瞬变是夜空星星闪烁的物理本质原因。

类似古人已知晓的星星光学闪烁现象，一些射电天文源在几百兆赫兹频段的辐射流量也于上世纪中叶被发现存在神秘闪烁的时序特征，被命名为行星际闪烁(interplanetary scintillation, IPS)专有科学名词。如图1所示，3C48、3C119、3C188、3C147射电源的流量时序轮廓表现为贝塞尔函数形状，类似点光源衍射扩展。对于同一个致密射电源，该贝塞尔形状的流量轮廓在不同的观测时间段基本保持不变。根据英国剑桥大学安东尼·休伊什(Antony Hewish)的地基射电观测：当致密射电天文源过境当地台站上空时，其"时间–流量"观测曲线在大尺度表现为贝塞尔函数的形状；该贝塞尔形状的包络上叠加有锯齿状的随机抖动信号，其特征时间尺度是0.1至10秒。如果把射电望远镜的观测频段比喻为通讯信道，那么射电源自身辐射的大尺度时序

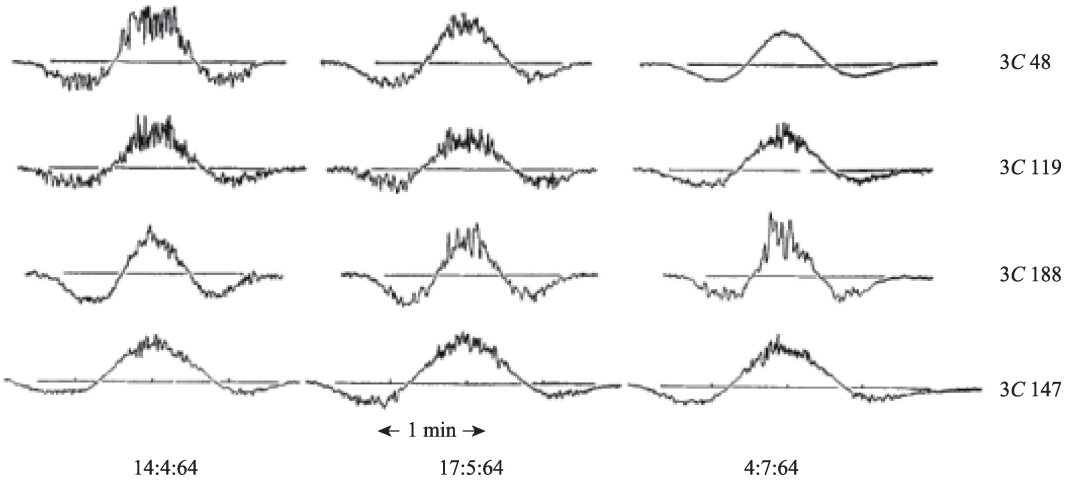


图1　射电天文源过上中天时，其射电幅度被太阳风湍流调制所形成的行星际闪烁观测现象(Hewish, et al., *Nature* 1964)

流量如同载波，而小尺度的抖动则如同传输途中外界施加的调制信号。该闪烁信号仅出现在太阳附近的天区，其调制区域主要发生在日地之间的行星际空间，因而被休伊什命名为“行星际闪烁”。

行星际闪烁的神秘天象归因于日地空间无处不在的湍流，受制于太阳持续外流的太阳风。太阳风是由太阳大气向行星际空间发出的超音速磁化等离子体流，充满行星际空间，包裹地球磁层，影响日地空间环境变化。太阳风湍流谱呈现为多段幂律谱特征：低频段的含能区、中间频段的磁流体尺度的串级区、高频段的离子尺度的第二串级区和耗散区、更高频段的电子尺度的第三串级区和耗散区。不同于人类日常生活所熟悉的流体湍流，随着太阳风湍流能量向离子和电子的动理学尺度的串级输运，粒子的微观行为与粒子和电磁场的宏观扰动耦合在一起，表现为湍动能量向粒子热能的转换、微观电子密度不规则体的可压缩性等动理学特征。行星际闪烁的严谨科学定义可表述为：遥远致密射电源辐射在行星际空间传播时，被太阳风等离子体密度的湍流不规则结构所散射，最终形成射电流量的随机起伏现象。

行星际闪烁的观测原理如图2所示。太阳风媒介沿射电源的视线方向可分解为一系列的薄层。射电波在穿越每层薄层时，其相位都会被湍流微观结构所调制。太阳风媒介对射电波传播的调制作用可等效为其传播路径的一系列“相位屏”叠加效应。从地球的视角来看，来自遥远射电天文源的平行入射波被太阳风湍流的多层“相位屏”结构所连续散射，其出射波的振幅最终形成衍射式的空间不均匀性分布。行星际闪烁的二维空间斑纹结构可比喻为波光粼粼的清澈河流，其亮暗相间的斑纹会随着太阳风流动而平移，从而表现为太阳风流动的“浮标”示踪物。调制行星际闪烁现象的太阳风湍流特征尺度通常是几十至几百千米。行星际闪烁的干涉斑纹结构被太阳风向远日输运，依次横越多个地基射电望远镜的观测视线，并被记录为射电信号强弱起伏的一维时间序列。

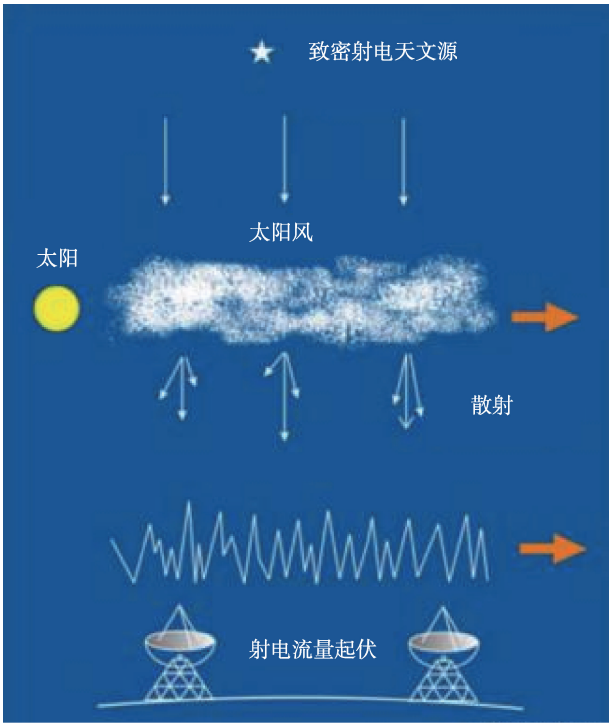


图2　使用行星际闪烁手段探测太阳风的示意图
(来源：日本名古屋大学网页)

行星际闪烁现象的先决条件是射电天文源必须足够亮且致密。类似地，在肉眼可见的光学波段，夜空不是所有的星星都会光学闪烁，例如月亮、金星、火星等行星由于距离地球很近，视觉张角比较大，不能像遥远恒星那样近似为点光源，因而表现为一盏盏稳定的明灯挂在天穹。发生行星际闪烁的射电源角径通常都是几百毫角秒，其与地球的距离通常都在银河系之外。例如，图1给出的3C48射电源是第一颗被发现的类星体，处于星系中心吸积的活跃星系核，距离地球高达40亿光年。尽管行星际闪烁的射电源通常都是宇宙中最明亮的天体，但它们距离地球太遥远，以至于地面接收其辐射流量通常都在央斯基(Jansky)甚至毫央斯基的量级。央斯基是国际通用的天体射电流量密度的单位，被定义为1央斯基等于$10^{-26}$瓦特每平方米每赫兹。如果月球上的宇航员随身携带普通手机，那么地面射电望远镜就可以检测到它，其强度相当于天空中最亮的天文射电源。为了捕捉行星际闪烁的微弱射电信号，地面射电望远镜必须具有巨大的天线接收

面积，并被形象地比喻为“观天巨眼”。

## 2. 行星际闪烁观测史和脉冲星科学发现

行星际闪烁现象归因于太阳风湍流的密度不规则体对射电波的相位调制，其地基观测可用于遥测太阳风的微观湍流谱和宏观流速，其观测史可上溯至诺贝尔奖获得者英国剑桥大学休伊什的先驱工作(Xiong et al, 2023)。休伊什始于1948年研究射电波在不均匀透明介质中传播过程的强度起伏，提出“相位屏衍射”理论，并于1962年预言：一个角径足够小的射电天文源，其辐射通过太阳日冕及其行星际空间时将产生明显的闪烁，其闪烁的时间尺度在0.1至10秒。基于当时的射电技术水平，行星际闪烁的信号捕捉需要射电望远镜具有极高的时间分辨率。为了测量行星际闪烁，休伊什设计国际首台行星际闪烁射电望远镜，其建设期从1965年至1967年7月，其观测频率为81.5兆赫兹(对应波长3.7米)。如图3所示，该望远镜由2048个偶极振子组成，挂在1000多根约3米高的木杆上，总接收面积超过21000平方米。剑桥行星际闪烁望远镜具有当时世界上极为灵敏的射电天线，不仅能接收遥远天体的射电辐射，也容易接收台站附近的无线电干扰。为了区分闪烁源和干扰源，为了测定行星际闪烁对日角距的关系，都要求对每个射电源每天重复地进行测量，记录射电源每次过境台站的几分钟流量变化，认证行星际闪烁的信号。剑桥行星际闪烁的测量技术能够在81.5兆赫兹的米波段提供0.5至1角秒的分辨率，而在当时剑桥射电干涉仪在159兆赫兹频率观测的全球最享盛名3C星表也只有角分量级的空间分辨率。

令人意想不到的惊喜是，研制“行星际闪烁”专用设备竟然为发现脉冲星铺平道路，安东尼·休伊什因而荣获1974年诺贝尔物理学奖。休伊什设计的行星际闪烁望远镜也特别适合观测脉冲星：其巨大接收面积解决脉冲星的辐射特别微弱的问题；其0.1秒的接收机时间分辨率恰好比大多数脉冲星的周期短；脉冲星辐射是幂律谱，恰好在3.7米的波段比较强；行星际闪烁的观测要求重复测量则是发现这种与“人工干扰”很像的脉冲星信号所必不可少的步骤。随着1967年8月剑桥大学行星际闪烁望远镜的建成和启用，当年在剑桥大学跟随休伊什攻读博士学位的乔瑟琳· 贝尔(Jocelyn Bell)对全天所有可能测得着的射电天体系统地进行观测，每天检

图3　国际首台行星际闪烁射电望远镜，其构成是偶极天线阵列(来源：英国剑桥大学网页)

查大约30米长的纸带观测数据。当时望远镜观测到的数据是记录到纸带上，只能由人眼识别来判断射电天文信号。作为脉冲星的最先发现者，贝尔功绩是不可磨灭的，她的博士论文研究方向是类星体的行星际闪烁观测研究(Bell, 1968)。她对观测资料的分析一丝不苟，不放过任何一个疑点，终于发现了脉冲星。首颗脉冲星的原始纸带记录如图4所示，贝尔回忆当年的情形“记录纸带在笔尖下徐徐移动，我看得出这种信号是由一系列脉冲所组成；我又觉得这些脉冲好像是等时间间隔的，当我从观测仪器中把纸带一取出来，这种猜测马上就得到证实。相邻脉冲的时间间隔是1.333秒。我马上告诉了在剑桥的安东尼·休伊什，他当时认为这种脉冲只能是人为的现象。这在当时的具体条件下还有相当道理。不过，我不知怎么的，总有点不明白，何以见得这不是来自某一星体呢？由于这件事毕竟吸引住了他。第二天，正当该射电源通过望远镜视场的时候，他来到现场并幸运地目睹了那些脉冲。”该不可思议的神秘脉冲信号在观测记录纸带上被贝尔标记为“小绿人一号(Little Green Man 1，LGM-1)”的昵称，当时被怀疑是外星文明发出的信号。这类极其规律的时变辐射显然不是来源于当时已知的任何天体，远超出当时的学术界认知前沿。该遥远的神秘天体被命名为脉冲星(pulsar)，就像天空中如霓虹灯般周期性闪烁，被赞誉为“宇宙灯塔”。后续科学研究认定脉冲星其实就是旋转的中子星，虽然Walter Baade和Fritz Zwicky早于1934年就提出大质量恒星死亡后形成的致密残骸“中子星”的概念。

## 3. 日地空间天气的行星际闪烁监测手段

日地空间包括太阳大气、行星际空间、磁层、电离层等多个关键空间区域，这些区域的状态显著受控于太阳活动，表现出非常复杂的时空变化特征。太阳风暴泛指太阳大气中发生的持续时间短暂、规模巨大的能量释放过程，常表现为太阳耀斑、日冕物质抛射等现象，向行星际空间输出增强的电磁辐射、高能带电粒子流、等离子体云，从而剧烈扰动日

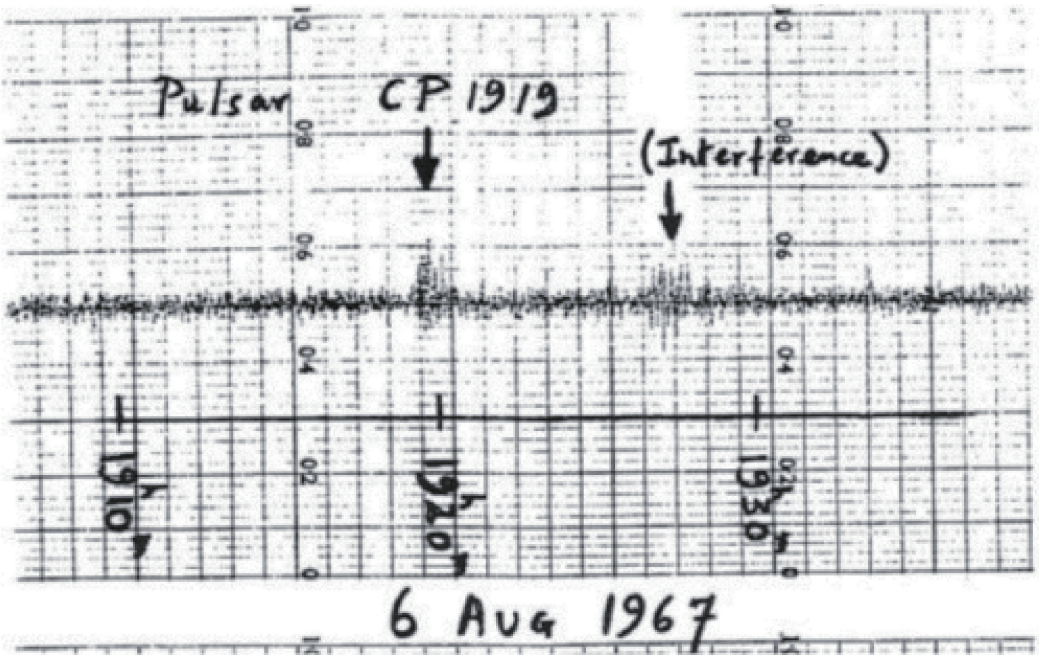


图4 发现脉冲星PSR B1919+21 (CP1919)的原始记录(脉冲星名的含义：PSR是pulsar的缩写；B是1950年建立的标准历元贝塞尔纪元B1950.0的首字母；1919+21代表了脉冲星的赤道坐标位置赤经19时19分与赤纬+21度。)

地空间甚至整个日球层，表现为灾害性的空间天气事件。空间天气的科学研究和业务预报必须从日地系统的耦合角度来剖析“太阳大气爆发—行星际空间传播—地球空间响应”的因果时序完整链。行星际空间扮演衔接太阳和地球的关键纽带作用，是日地系统的非线性传输通道。广袤的行星际空间是空间天气因果链中最长的一条链，也是目前最缺乏空间连续性监测的区域。

地基射电望远镜通过探测天文致密源的射电辐射，感知太阳风湍流引起的流量闪烁信号，遥测行星际太阳风的径向速度和密度变化，因而是行星际空间天气常规监测的有效地基设备。行星际闪烁研究大致分为三个阶段：(1) 1970年之前，主要研究太阳风的电子密度不规则体结构、太阳风速度、致密射电源角径大小；(2) 20世纪70年代末至90年代初，主要研究日地空间射电源瞬变现象，开展短期日地扰动预报；(3) 20世纪90年代初至今，研究太阳风与日球层观测的对比、行星际扰动与地磁活动预报等。

地基行星际闪烁观测不但能测量很宽日心距和高日球纬度的太阳风速度，而且能长期监测行星际空间和跟踪行星际激波传播。以行星际闪烁观测数据为基础，从长期可预报太阳活动周尺度上的背景太阳风演化，从短期可预报行星际激波到达地球的时间和速度。行星际闪烁研究是空间物理学和空间天气学领域的重要分支。基于行星际闪烁观测的重要科学贡献可归纳为：太阳风湍流谱的形状和振幅、太阳风高速流的径向加速剖面、行星际大尺度扰动的三维层析反演(如图5)、行星际激波扰动和地磁活动预报(Wei et al 1991)等。如图6所示，基于行星际闪烁观测数据的大样本统计分析，发现：(1) 行星际激波传播向日球电流片方向偏转和会聚；(2) 电流片将阻碍激波的跨越传播，并产生近地空间环境变化的电流片同、异侧效应。

地基行星际闪烁射电望远镜可与天基卫星观测手段形成优势互补，从而极大增强对太阳风暴扰动传播的探测能力。卫星就位测量受限于卫星轨道，只能对行星际空间作有限零星点的采样，无法给出行星际三维大尺度结构全貌。天基白光成像受限于低时空分辨率，无法诊断行星际局域空间的微观等离子体状态。地基行星际闪烁观测能弥补卫星就位测量和天基白光成像的相对不足，通过每日监测太阳周围广袤天区的致密射电天文源的闪烁幅度，从而遥测行星际大尺度扰动传播的锋面结构。当前仍在每日常规观测的行星际闪烁专用射电望远镜有日本名古屋SWIFT双抛物柱面天线、印度Ooty巨型抛物柱面天线、墨西哥MEXART偶极振子天线阵。尽管我国在行星际闪烁观测数据的分析和建模方面起步较早且有所建树，但我国在行星际闪烁设备硬件方面与国际同行有历史上的显著差距，在国家子午工程二期实施之前一直没有行星际闪烁观测专用的射电天线。

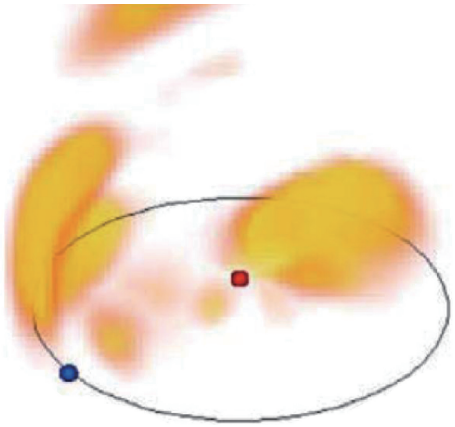

图5　借助计算机层析成像的先进反演算法，行星际闪烁的多视线探测能反演行星际扰动传播的三维空间分布 [来源于美国加州大学圣地亚哥分校的网页 https://ips.ucsd.edu/ ]。其中，红点和蓝点分别表示太阳和地球。

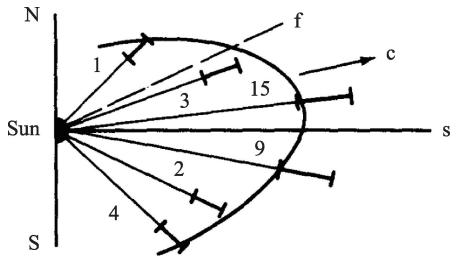


图6　基于行星际闪烁观测，揭示子午面内行星际激波各向异性的传播(Wei & Murray, 1991)。其中，N、S、s、f、c分别表示太阳北极、太阳南极、太阳赤道面、耀斑在日面的法向、日球层电流片位置。

## 4. 我国子午工程二期的行星际闪烁监测仪

子午工程的行星际闪烁监测望远镜是我国首台专门用于行星际闪烁观测的射电望远镜，采用一主站两辅站的协同联测方式，分别部署于内蒙古锡林郭勒盟的明安图主站、伊和高勒辅站、乌日根塔拉辅站。主站采用抛物柱面天线(327和654兆赫兹)，辅站采用抛物面天线(327、654、1400兆赫兹)，实现对3个频点的观测。三台站之间的两两连线近似组成等边三角形，站间距约200千米。针对行星际闪烁的辐射强源，三站点的协同观测能够记录行星际闪烁瞬变信号的时空变化特征，通过行星际闪烁的多时序数据的互相关分析，测量行星际太阳风流速。

如图7和图8所示，主站天线面型是三排平行放置的140米×40米口径的抛物柱面，两辅站的天线面型均是30米口径的抛物面。其中，每排柱面天线重达330吨，其轴向沿南北方向，其机械结构是分体式、运动部分隔离的设计方案。在东西方向的不同天线俯仰角度，140米整轴长的机械结构件都能保持俯仰转动同步和天线几何面型，并同时能匹配馈源的照明角度。每排柱面天线采用馈源支撑桁架的轻体设计，沿轴向放置592个馈源而构成超长馈线，消除馈源之间的互耦效应，保证馈线的幅度和相位一致性，构成高稳定且低噪声的数字波束合成信号链路。所有柱面天线受控于铷钟计时基准，

(a)

(b)

图7　子午工程明安图主站的巨型抛物柱面天线的外观图((a) 偏离轴向的侧面视角；(b) 沿轴的纵向视角)

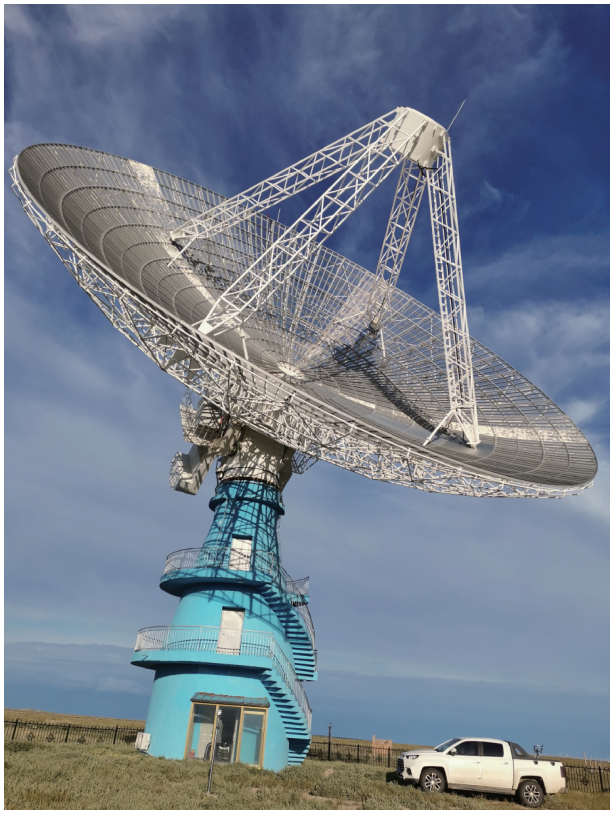

图8　子午工程伊和高勒辅站的30米口径抛物面天线的外观图

在南北方向上实施一维相控阵的电扫描，快速指向天区的16个方向，实时记录双频双极化的射电天文信号。

作为“十三五”国家子午工程二期的重大设备，行星际闪烁射电设备的科学目标定位于：揭示行星际背景太阳风的三维时空分布及其在太阳卡灵顿周和太阳活动周尺度的长期演化规律；理解日冕物质抛射和共转流相互作用区在行星际空间的传播过程，建立太阳风暴与地球空间响应的因果关联；解密近日太阳风在不同源区的湍流差异及其对不同类型太阳风形成的动理学效应。子午工程的行星际闪烁射电望远镜突破超大型可动抛物柱面天线的高精度同步控制、超长馈线互耦效应的测量与校正、数字波束合成链路中的幅度和相位的高稳定接收、观测数据驱动的行星际三维磁流体数值层析重构等核心关键技术。特别地，主站射电望远镜天线的总反射面积相当于2.5个标准足球场，朝天时最大高度为29米，壮观地屹立在内蒙古大草原，被赞誉为“草原天眼”的地标性建筑。

## 5. 总结和展望

发源于英国剑桥大学的行星际闪烁射电望远镜是世界科技史上贡献出1974年诺贝尔物理学奖的里程碑设备，迅速激励美国、前苏联、日本、印度等国竞相建立同类专用设备，在历史上极大推动了无线电波的衍射传播、类星体星表的精密测量、太阳风湍流和加速、行星际激波传播等科学前沿。等到20世纪80年代的改革开放初期，我国的行星际闪烁研究已经二十年滞后于国际潮流，开始奋起追赶国际前沿。我国射电天文学的先驱王绶琯院士于1985年建成由28个9米抛物面天线组成的我国首台大型射电天文设备“密云米波综合孔径射电望远镜 MSRT”，于1990年提出利用MSRT开展行星际闪烁观测研究的指导意见，实时将MSRT所有天线的信号同相相加，得到等效口径47米的望远镜，开展行星际闪烁的试观测实验(王绶琯 1990)。我国子午工程科学构想的提出者魏奉思院士以行星际闪烁观测数据为基础，综合行星际扰动过程的物理模型并运用模糊数学概念，提出一种预报由太阳风暴吹向地球而引起的地磁扰动的“ISF”方法，改善空间天气事件中的地磁扰动预报(魏奉思等 2003)。

随着“十三五”子午工程二期项目的建设实施，行星际闪烁射电监测仪被列为“太阳—行星际”分系统的重大设备，我国行星际空间天气的研究和预报领域迎来前所未有的机遇期。子午工程行星际闪烁监测仪拥有我国最大口径的抛物柱面天线，是我国首台且全球最大的专门用于行星际闪烁观测的射电望远镜，其天线口径、噪声温度、探测灵敏度均处于国际领先水平。该设备正填补我国行星际日常监测的盲区，遥测行星际太阳风速度，追踪太阳风暴在行星际空间的动态传播过程，从而为我国行星际空间天气预报提供自主的原始观测数据和定量数值预报产品。

**致谢：**国家自然科学基金面上项目资助(42074208)

## 参考文献

[1] 王绶琯 (1990)，关于利用密云米波射电天文设备开展行星际闪烁 (IPS) 观测研究的意见，内部技术报告.

[2] 魏奉思、徐亚、冯学尚、范全林 (2003)，利用“ISF”方法于地磁扰动事件的预报试验，中国科学E辑: 技术科学 33卷, 5期: 447 - 451.

[3] Hewish A., Scott P. F., and Wills D. (1964). Interplanetary scintillation of small diameter radio sources. Nature 203, 1214-1217.

[4] Hewish A., Bell S. J., Pilkington J. D. H., Scott P. F., and Collins R. A. (1968). Observation of a rapidly pulsating radio source. Nature 217, 709-713.

[5] Bell S. J. (1968), The measurement of radio source diameters using a diffraction method. PhD Dissertation. Cambridge University, UK.

[6] Wei, F., and Dryer, M. (1991). Propagation of solar flare-associated interplanetary shock waves in the heliospheric meridional plane. Sol. Phys. 132, 373-394.

[7] Xiong M, Feng X, Li B, et al (2023), Interplanetary scintillation observation and space weather modelling. Front. Astron. Space Sci. 10:1159166. doi: 10.3389/fspas.2023.1159166.

**她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；**
**她用知识的力量，助我们奋起攀登！**

## 欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

科技创新、科学普及是实现创新发展的两翼。《现代物理知识》旨在普及科学知识、弘扬科学精神，设有物理知识、物理前沿、科技经纬、科学源流、教学参考、中学园地、科学书屋、科学正听和科苑快讯等栏目。诚邀在物理学及相关领域工作的科技、教育和科普等方面的专家学者，以公众喜闻乐见的文字，深入浅出、图文并茂地与读者分享现代物理知识、科学前沿成果和大科学装置进展等精彩故事，共襄“两翼齐飞”之盛举。投稿时请将稿件的Word文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并请将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

2024年《现代物理知识》每期定价15元，全年6期90元，欢迎新老读者订阅。

需要往期杂志的读者，请按下列价格付款：

2010～2021年单行本每期10元；2022～2023年单行本每期15元；2010～2019年合订本每本60元。

**订阅方式**

(1) 邮局订阅 邮发代号：2-824。

(2) 编辑部订阅（请通过银行转账到以下账号，并在附言中说明“现代物理知识**年**期”）

名称：中国科学院高能物理研究所

开户行：工商银行北京永定路支行

账号：0200004909014451557

(3) 科学出版社期刊发行部：联系电话 010-64017032 64017539；

(4) 网上购买：搜淘宝店、微店店铺名称：中科期刊；

淘宝购买链接：

淘宝网购刊　　微信购刊