

# 太阳风的电波传播观测研究<sup>\*</sup>

马 冠 一      王 家 龙  
(中国科学院北京天文台 北京 100080)

## 摘 要

本文以行星际闪烁为主,综述了通过电波传播的观测来研究太阳风的方法及近 30 年的观测结果。概述了这种方法的优缺点、基本假设和基础理论,讨论了这种方法所得到的太阳风电子密度谱、太阳风三维结构以及与太阳活动周的关系,特别是肯定了闪烁测量在研究太阳风加速区问题中的作用。并且结合当前的国际日地物理计划 (ISTP) 指出了 90 年代的研究重点。最后,简述了北京天文台密云站射电天文设备用于行星际闪烁观测的可能性及特点。

## 1 引 言

太阳风是由于日冕膨胀而形成的由太阳向外发出的充满行星际空间的等离子体流。在太阳风被直接探测到以前,它的存在就被理论所预言<sup>[1]</sup>,但是并不被人们普遍接受,直到 1962 年才被美国的“水手 2 号”飞船进行的等离子体实验直接证实<sup>[2]</sup>。

太阳风在现代空间研究中起着重要的纽带作用。太阳风来自太阳,流经日地空间,是日地间的主要物质来源,以物质的形式把日地联系起来,统一了有关的太阳和地球物理现象。因此,太阳风的观测在太阳演化、太阳外层大气、日地空间及地球物理的研究中是很有意义的<sup>[3,4]</sup>。同时,太阳风也是研究天体物理等离子体现象的较近而相对方便的实验室<sup>[5,6]</sup>,它对天体物理研究的意义是显然的。

表 1      1AU 处重要的太阳风参数

速 度	$400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
密 度	$5 \text{ 个质子}\cdot\text{cm}^{-3}$
磁 场	$6\times 10^{-5}\text{G}$
电子温度	$1.5\times 10^5\text{K}$
德拜长度	$10^3\text{cm}$
等离子体频率	$10^5\text{Hz}$
热质子回旋半径	$5\times 10^6\text{cm}$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目  
1993 年 6 月 5 日收到

自从宇宙飞船对行星际空间等离子体直接探测之后，进一步直接探测得到了太阳风的空间变化、时间变化以及太阳风的平均特性，表 1 给出了在地球附近观测到的太阳风的一些重要参数。

电波传播观测研究太阳风始于 1964 年。当时 Hewish 等人<sup>[7]</sup>利用工作频率为 178MHz 的干涉仪测量射电源的精确位置，在对几个射电源信号的观测记录中发现有不规则的强度起伏，类似于电离层闪烁，起伏的时间尺度是 1—10s。通过对观测结果的详细分析，他们指出，行星际介质中的不规则结构为闪烁的起因，并称由此引起的现象为行星际闪烁 (IPS)。对于探测小角径的射电源以及观测研究太阳风而言，行星际闪烁为人们提供了一种既经济又灵敏的手段。

1969 年，Erickson 利用干涉仪测量到蟹状星云的角变宽，并得到了离太阳  $6 R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  为太阳半径) 处太阳风电子密度结构的信息<sup>[8]</sup>。随后，1972 年 Cronyn<sup>[9]</sup>指出利用甚长基线干涉仪 (VLBI) 测量到的射电源辐射的相位闪烁也可以估测密度不均匀结构。Woo 和 Armstrong<sup>[10]</sup>发展了利用宇宙飞船信标的闪烁测量研究太阳风。

与宇宙飞船直接探测相比，电波传播观测的一个重要优点是它们可用于研究任何日心距和任何日球纬度上的太阳风，尤其是射电源的行星际闪烁测量可作为常规观测手段对太阳风进行长期监测。

本文将行星际闪烁测量为主，对用电波传播观测来研究太阳风的方法及结果作一综述。

## 2 传播理论和观测方法

用于探测太阳风的电波传播观测方法主要有：(1) 射电源的强度闪烁即行星际闪烁测量；(2) 射电源的相位闪烁测量；(3) 射电源的角变宽测量；(4) 宇宙飞船信标的谱展宽测量和信标的相位、强度闪烁测量。

早期的传播观测大多是通过射电源信号的行星际闪烁测量来研究太阳风不均匀结构和速度。目前人们仍主要利用行星际闪烁来研究太阳风速度在日球经纬度上的分布等问题<sup>[11-14]</sup>，但用于研究近日电子密度不均匀结构方面有困难。因此，近来大都用相干探测技术如谱展宽、双频信号的相位闪烁等来研究近日太阳风中的密度不均匀结构<sup>[10,15]</sup>。谱展宽测量尤其具有吸引力，因为利用电场的互相干函数传播的简单理论便可以解释谱展宽。

### 2.1 行星际闪烁 (IPS)

一般用闪烁指数  $m$  描述闪烁强弱程度， $m$  定义为接收信号强度  $I$  的归一化方差：

$$m = \sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2} / \langle I \rangle$$

其中， $\langle \cdot \rangle$  表示数学期望的计算。如果用  $P$  表示射电源视线路径上离太阳最近的距离，则  $m$  随  $P$  的减小而增大直到在某一  $P_{\max}$  (米波段  $P_{\max} \approx 0.3 \text{ AU}$ ) 处达到饱和<sup>[16]</sup>。 $P > P_{\max}$ ，属于弱闪烁区域，此时应用薄相屏理论<sup>[17,18]</sup>，假设太阳风集中在一块薄的屏

幕内, 薄屏垂直于视线路径, 与视线路径的交点为离太阳最近点, 则地面接收到的信号强度谱  $\Phi_{\Delta I}(\mathbf{k}_{\perp})$  与太阳风电子密度起伏谱  $\Phi_{\Delta N}(\mathbf{k})$  有一一对应的线性关系:

$$\Phi_{\Delta I}(\mathbf{k}_{\perp}) = 8\pi L\lambda^2 r_e^2 \sin^2\left(\frac{\mathbf{k}_{\perp} z}{2k}\right) \Phi_{\Delta N}(\mathbf{k}_{\perp}, 0) \quad (1)$$

其中,  $k_{\perp} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  为二维空间波数,  $\lambda$  为波长,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $r_e$  是经典电子半径,  $L$  为薄屏厚度,  $z$  为薄屏的高度。  $\Phi_{\Delta I}(\mathbf{k}_{\perp})$  与强度起伏的二维空间自相关函数  $B_{\Delta I}(\vec{\rho})$  是一 Fourier 变换对:

$$\Phi_{\Delta I}(\mathbf{k}_{\perp}) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint B_{\Delta I}(\vec{\rho}) e^{i\mathbf{k}_{\perp} \cdot \vec{\rho}} d\vec{\rho} \quad (2)$$

其中  $\vec{\rho}$  为二维平面位置矢量, 于是, 如果由地面接收到的信号强度起伏得到其二维空间自相关函数, 便可由 (2) 式求出强度谱, 再由 (1) 式推出电子密度谱便可知不均匀结构。

由于太阳风的运动, 如果在一固定点接收信号, 其空间起伏可转换为时间起伏, 实际测量中往往得到的是强度随时间的变化。此时, 强度起伏自相关的 Fourier 变换即为闪烁频谱  $\Phi_{\Delta I}(f)$ ,  $f$  为时间频率。

$$\Phi_{\Delta I}(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_{\Delta I}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

假设在太阳风的运动过程中, 电子密度不均匀结构不发生改变, 象是冻结了一样 (Taylor 冻结假说<sup>[19]</sup>), 则闪烁频谱与电子密度谱的关系为:

$$\Phi_{\Delta I}(f) = \frac{8\pi L\lambda^2 r_e^2}{v} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\Delta N}\left(\frac{2\pi f}{v}, k_y, 0\right) \sin^2\left(\frac{q^2 z}{2k}\right) dk_y \quad (3)$$

其中,  $q^2 = (2\pi f/v)^2 + k_y^2$ ,  $v$  为太阳风的速度, 运动方向设为  $x$  方向。

对于  $P < P_{\max}$ , 属强闪烁区域, 强度谱与电子密度谱没有简单的对应关系。这就是行星际闪烁不宜于探测近日太阳风的原因。

利用 IPS 测量太阳风速度时, 一般都设置三个站同时进行闪烁测量。基本思想是: 太阳风中的电子密度不均匀结构对射电源辐射的平面波起调制作用, 使它在地面上形成衍射图形并以太阳风运动的速度通过天线系统, 利用天线对可以得到衍射图形通过它们的时间, 并且假设在此期间衍射图形在结构上近似保持不变 (即 Taylor 冻结假说), 联合三站天线系统组成的天线对便可以得到垂直于视线路径的太阳风速度的大小和方向, 已有的观测表明<sup>[12,14,20]</sup>, 冻结假说在  $R > 60R_{\odot}$  的区域成立。

图 1 为三站 IPS 测量系统,  $d_{12}$ 、 $d_{13}$ 、 $d_{23}$  为各站间的距离,  $\mathbf{v}$  为太阳风速度矢量,  $\hat{y}$  表示与  $\mathbf{v}$  垂直的单位矢量。根据各站间接收信号强度的互相关可以得到各站间的时间延迟  $t_{12}$ 、 $t_{13}$  和  $t_{23}$ , 则

$$v = d_{23} \sin \omega / t_{23} \quad (4)$$

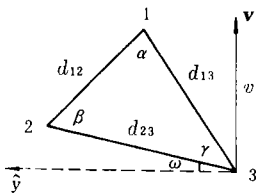


图 1 三站 IPS 测量系统

$\omega$  可由下式求出:

$$\operatorname{tg}\omega = \frac{\sin\beta}{t_{12}d_{23}/d_{12}t_{23} + \cos\beta} \quad (5)$$

这样由 (5) 式可确定太阳风运动方向, 由 (4) 式便求出速度大小。

在  $R < 60R_{\odot}$  区域, 太阳风变化很快, 假设太阳风速度由平均速度  $v$  和随机速度  $\sigma_v$  组成。如果用  $C_t(\vec{\rho} - \mathbf{v}t)$  表示  $\sigma_v = 0$  时相距为  $\vec{\rho}$  的两接收处信号强度的互相关函数, 并假设速度的概率分布为  $p(u)$ , 则强度互相关函数为<sup>[20]</sup>:

$$C(t) = \int C_t(\vec{\rho} - \mathbf{v}t)p(u)du \quad (6)$$

利用 (6) 式与实测的互相关函数进行拟合, 找到适当的  $p(u)$ , 便可求出平均速度和随机速度。

$$\begin{aligned} v &= \langle u \rangle \\ \sigma_v &= \langle (u - v)^2 \rangle^{1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

## 2. 2 互相干函数和波结构函数

射电源的角变宽和相位闪烁、宇宙飞船信标的谱展宽和相位闪烁测量是另几种探测太阳风的方法, 其基本量都是互相干函数  $\Gamma(\vec{\rho})$ ,

$$\Gamma(\vec{\rho}) = \langle E(\vec{\rho}_1)E^*(\vec{\rho}_1 + \vec{\rho}) \rangle / \langle |E|^2 \rangle$$

其中  $E$  为观测到的电场,  $\vec{\rho}$ 、 $\vec{\rho}_1$  为位置矢量,  $\Gamma(\vec{\rho})$  与波结构函数  $D(\vec{\rho})$  直接相关<sup>[15,8,21]</sup>:

$$\Gamma(\vec{\rho}) = \exp[-D(\vec{\rho})/2] \quad (8)$$

$$D(\vec{\rho}) = \langle [\phi(\vec{\rho}_1) - \phi(\vec{\rho}_1 + \vec{\rho})]^2 \rangle = 2[B_{\phi}(0) - B_{\phi}(\vec{\rho})] \quad (9)$$

其中  $\phi(\vec{\rho})$  为从射电源到接收处的视线路径上的相位延迟,  $B_{\phi}(\vec{\rho}) = \langle \phi(\vec{\rho}_1)\phi(\vec{\rho}_1 + \vec{\rho}) \rangle$  为其空间自相关函数。

(1) 用于测量角变宽的干涉仪实际测量的是电场的空间协变性,

$$C_T(\vec{\rho}) = \frac{1}{T} \int_0^T E(\vec{\rho}_1, t)E^*(\vec{\rho}_1 + \vec{\rho}, t)dt \quad (10)$$

其中积分时间  $T$  与场强  $E(\vec{\rho}, t)$  的时间起伏尺度相比要大得多, 假设电场具有遍历性, 则

$$\begin{aligned} C_T(\vec{\rho}) &= \Gamma(\vec{\rho}) \\ D(\vec{\rho}) &= -2\ln[C_T(\vec{\rho})/C_T(0)] \end{aligned} \quad (11)$$

在薄屏假设下, 波结构函数与电子密度谱之间的关系为:

$$D(\vec{\rho}) = 4\pi r_e^2 \lambda^2 L \int \int [1 - \cos(\mathbf{k}_{\perp} \cdot \vec{\rho})] \Phi_{\Delta N}(\mathbf{k}_{\perp}, 0) d\mathbf{k}_{\perp} \quad (12)$$

(2) 谱展宽测量是用一单天线观测散射介质(即太阳风)对时间相干(单色)探测波的影响。如果太阳风相对于观测者运动速度为  $v$ , 则接收信号的谱将变宽, 用  $P(f)$  表示, 其 Fourier 变换  $F[P(f)]$  即为场强自相关  $\Gamma(t)$ ,  $\Gamma(t)$  与  $\Gamma(\vec{\rho})$  的关系为:

$$\Gamma(t) = \langle E(t_1)E^*(t_1 + t) \rangle / \langle |E|^2 \rangle = \Gamma(\vec{\rho} = vt)$$

则  $D(\vec{\rho} = vt) = -2 \ln\{F[P(f)]\}$  (13)

但是在近太阳区域, 速度场有随机分量, 此时假设速度概率分布为  $p(\mathbf{v})$ , 则

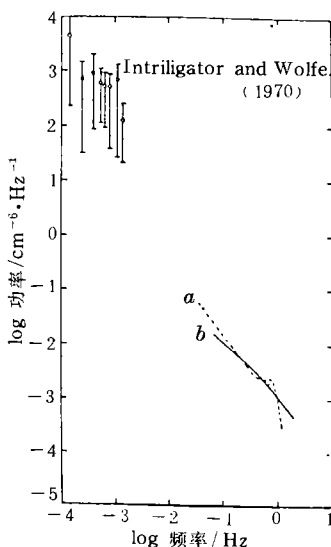
$$D(t) = \int \int D(\vec{\rho} = \mathbf{v}t)p(\mathbf{v})d\mathbf{v}$$
 (14)

谱展宽测量一般都是用宇宙飞船相干信标作为信号源, 也可利用行星雷达信号进行观测。

(3) 射电源信号的相位闪烁测量是利用长基线干涉仪测量基线长度上的差分相位起伏, 用  $\Delta\phi_0(\mathbf{s}) = \phi_0(\vec{\rho}_1) - \phi_0(\vec{\rho}_1 + \mathbf{s})$  表示差分相位, 其中  $\mathbf{s}$  为基线矢量, 角标用以与几何相位  $\phi$  相区别, 对于甚长基线干涉仪(VLBI), 测量的  $\Delta\phi_0$  接近几何相位差  $\phi(\vec{\rho}_1) - \phi(\vec{\rho}_1 + \mathbf{s})$ , 因此,

$$D(\mathbf{s}) \approx \langle [\Delta\phi_0(\mathbf{s})]^2 \rangle$$
 (15)

(4) 宇宙飞船信标相位闪烁测量是利用双频(S和X波段)相干信号相位差  $\Delta\phi_0(t)$  随时间的变化。尽管由  $\Delta\phi_0(t)$  可直接推出结构函数, 但是实际测量往往是根据相位起伏求出其时间频谱  $w_\phi(f)$ , 因为对于  $\Phi_{\Delta N} \propto k^{-\alpha}$ ,  $w_\phi(f) \propto f^{1-\alpha}$ , 可直接由  $w_\phi(f)$  得到幂指数  $\alpha$ , 从而得到不均匀结构的空谱。



### 3 太阳风电子密度起伏谱

在目前空间直接探测达不到的区域, 太阳风电子密度谱的研究最初依赖于 IPS 测量。由于强度起伏是由小于 Fresnel 尺度 ( $\sqrt{\lambda z}$ ) 的电子密度不均匀结构引起的, 所以 IPS 测量的波数范围是  $k > 10^{-3}\text{km}^{-1}$  (这里取  $\lambda = 1\text{m}, z = 1\text{AU}$ )。起初, 关于  $\Phi_{\Delta N}(k)$  是具有 Gauss 形式还是幂律形式, 有许多争论 [6,22]。直到 1975 年, 空间直接探测表明:  $\Phi_{\Delta N} \propto k^{-3.3}$ ,  $10^{-8}\text{km}^{-1} < k < 10^{-1}\text{km}^{-1}$ , 并且在热质子回旋半径的尺度处表现出谱增强, 如图 2 所示。

表 2 列出了 1975 年到 1991 年利用电波传播观测手段测得的太阳风电子密度起伏谱的一些结果。显然要从中得到确切定量的结论是困难的, 因为这是在不同时间里测量的不同区域的太阳风, 而且不同观测

图 2 太阳风电子密度起伏谱  
(a) 为 1975 年得到的直接测量结果,  
(b) 为 IPS 观测结果

手段测量的空间波数范围不同，在某些情况下还利用了太阳风速度值，以便把时间频率转换成空间波数。

表 2 电波传播观测得到的太阳风电子密度谱

观测手段	$f_0/\text{Hz}$	$R/R_\odot$	$k/\text{km}^{-1}$	$(\Phi_{\Delta N}^2 - k^{-\alpha})$	作者、年代
三站 IPS	74M	100-215	$2 \times 10^3 - 10^{-2}$ $10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$	2.7 3	Coles, Harmon <sup>[24]</sup> 1978
双站 IPS	81.5M 151.5M	100-215	$1 \times 10^{-4}$	11/3	Gapper, Hewish <sup>[25]</sup> 1981
单站三频 IPS	270M 340M 470M	50-100	$2 \times 10^{-3} - 1.6 \times 10^{-2}$ $1.6 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-2}$	$3.0 \pm 0.5$ 1983 $3.7 \pm 0.3$	Scott <i>et al.</i> <sup>[26]</sup> 1983
三站 IPS	74M	100-215	$2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$	3.2 4.1	Coles, Filice <sup>[27]</sup> 1985
VLBI 相位 闪烁	81.5M	70-210	$10^{-5} - 10^{-2}$	3.3	Rees, Duffett-Smith <sup>[28]</sup> 1985
LBI 角变宽		6-18	$10^{-1} - 10$	4	引自 Coles, Harmon <sup>[8]</sup> , 1989
Pioneer 6 谱变宽	2.3G	<14	$\geq 8.4 \times 10^{-3}$	11/3	Woo <i>et al.</i> <sup>[29]</sup> 1976
Mariner 10 双 频相位差闪烁	2.3G 8.4G	43-47	$2 \times 10^{-6} - 10^{-3}$	11/3	Woo <i>et al.</i> <sup>[30]</sup> 1976
Pioneer 10/11 Helios 1/2 谱展宽	2.3G	20-215	$10^{-6} - 5 \times 10^{-4}$	3.56	Woo, Arm- strong <sup>[10]</sup> 1979
Viking 谱展宽 和相位差闪烁	2.3G 8.4G	<20	$10^{-5} - 10^{-1}$	3.1	
Viking Mariner 10 相位差闪烁	2.3G 8.4G	6-44 6-24 其中 10-15	$1 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-1}$	3 $\alpha < 3$	Tyler <i>et al.</i> <sup>[31]</sup> 1981
星际雷达信 号谱展宽	430M 2.38G	14-25.5 5.4-15.3	$10^{-3} - 10$	$3.45 \pm 0.05$ $2.85 \pm 0.05$	Harmon, Coles <sup>[15]</sup> 1983
星际雷达信 号谱展宽	430M 2.38G	8.5-23.7 2.2-7.3	$10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$ $5 \times 10^{-2} - 5 \times 10^{-1}$ $5 \times 10^{-1} - 10$	$\alpha_1 = 11/3$ $\alpha_2 < 11/3$ $\alpha_3 > \alpha_2$	Coles, Harmon <sup>[8]</sup> 1989
Voyager 1/2	2.3G 8.4G	7-22	$10^{-6} - 10^{-3}$ $3 \times 10^{-2} - 10^{-2}$	11/3 $\alpha < 11/3$	Coles <i>et al.</i> <sup>[21]</sup> 1991

注： $f_0$ — 观测频率， $R$ — 日心距， $R_\odot$ — 太阳半径， $k$ — 空间波数， $\alpha$ — 幂指数

由表 2 可知，在  $R > 50R_\odot$ ， $k < 2 \times 10^{-3} \text{km}^{-1}$ ， $\Phi_{\Delta N} \propto k^{-11/3}$  即为 Kolmogorov 谱； $2 \times 10^{-3} < k < 10^{-2} \text{km}^{-1}$ ， $\alpha < 11/3$ ，谱变平； $10^{-2} < k < 5 \times 10^{-2} \text{km}^{-1}$ ， $\alpha > 11/3$ ，谱变陡，其间的缓变部分与 Hewish<sup>[32]</sup> 的结论“在接近质子回旋半径对应的波数处谱变平”是一致的。与图 2 相比，可见电波传播观测与地球附近直接测量结果相吻合。而在  $R < 50R_\odot$ ， $k < 10^{-2} \text{km}^{-1}$ ， $\alpha = 11/3$ ； $10^{-2} < k < 10^{-1} \text{km}^{-1}$ ， $\alpha < 11/3$ ，谱变平；

$k > 10^{-1} \text{km}^{-1}$ , 又一次变陡。显然, 太阳风的电子密度谱可分为三段具有不同幂指数的负幂律谱表示, 并且在近太阳区域和在远离太阳的区域, 谱的变化趋势相同, 只是对应的波数不同。由于负幂律谱形式说明太阳风为湍流介质, 湍流具有内尺度和外尺度。因此如果用 Gauss 分布拟合  $\alpha \neq 11/3$  的两段谱, 便可得湍流的内尺度。同时从表 2 还可发现, 幂指数  $\alpha$  在日心距为  $10-25R_{\odot}$  处有突变, 大于  $25R_{\odot}$ ,  $\alpha$  大, 小于此区域,  $\alpha$  较小, 这说明在  $R < 25R_{\odot}$ , 湍流谱变平。由于闪烁指数  $m$  与  $\alpha$  的关系为  $m \propto f_0^{-\frac{2+\alpha}{4}}$ , 所以  $\alpha$  变小,  $m$  增大, 意味着散射增强。

## 4 太阳风速度的观测进展

太阳风速度的观测研究主要依赖于三站 IPS 测量。这项工作首先是在英国<sup>[33]</sup> 和苏联<sup>[34]</sup> 开展的。常规观测是在美国圣地亚哥加利福尼亚大学 (UCSD)<sup>[14]</sup> 和日本名古屋大学大气研究所 (RIA)<sup>[13]</sup> 进行的, 每天通过对若干个射电源的 IPS 测量, 求出散射区域的太阳风速度。表 3 列出了这两个常规观测站的具体情况。

表 3 太阳风速度常规观测

观测站	$f_0/\text{Hz}$	天线面积 / $\text{m}^2$	$R/\text{AU}$	纬度 / $^{\circ}$	观测期
UCSD	73.8M	3 000	0.5—1.1	-60—60	1972.4—1989.9
					1984.3—1987.12
RIA	69M	2 500	0.6—1.0	-60—60	1974—1981
	327M	2 000	0.2—1.0	-70—70	1983—目前

可见, 利用 IPS 对太阳风速度的常规观测已达近 20 年之久。早期最重要的发现是太阳风速度随日球纬度的增高有增加的趋势<sup>[35]</sup>, 并建立了速度与到电流片 (中性片) 距离的关系<sup>[4]</sup>。与冕洞观测比较, 证明日冕低密度区与高速太阳风相关, 冕洞为重现性高速流的源; 高密度区与低速太阳风相关。在黑子数为极小值期间, 太阳极区的风速大约是黄道面上风速的两倍<sup>[36]</sup>。在太阳活动高年, 极区冕洞缩小, 相比之下纬度变化的影响不那么重要<sup>[32]</sup>。

最近几年, 人们利用十几年的 IPS 观测数据反演太阳风速在日球经纬度上的二维结构<sup>[13,14]</sup>, 研究结果表明, 在  $0.4-1.1\text{AU}$ , 太阳风速与日心距没有明显的依赖关系。在太阳活动低年, 低速区沿太阳赤道分布在波状的电流片上, 与电流相距纬度越大, 速度越大。在太阳活动高年, 尽管低速区仍沿电流片分布, 但电流片有较大的纬度变化。黄道面上的太阳风速在整个太阳活动周是明显的常数。

目前, 常规观测的区域属远离太阳的区域。对于近日区 ( $R < 60R_{\odot}$ ), 太阳风变化很快, IPS 测量必须在厘米波段进行, 接收仪器的积分时间也受到限制, 因此, 对此区域的太阳风观测不多。

Ekers 和 Little<sup>[20]</sup> 利用 IPS 首次观测到在近日区域 ( $10-20R_{\odot}$ ), 闪烁频谱有一个高频尾巴, 这说明太阳风除有一系统的平均速度外, 还具有随机速度。Armstrong 和 Woo<sup>[11]</sup> 利用宇宙飞船 2.3GHz 信标的强度闪烁进行多站太阳风速度的测量, 结果是:  $R \leq 20R_{\odot}$ , 太阳风随机速度与平均速度同量级, 这与 Ekers 和 Little 的观测结果一致, 并且发现随机速度较大的区域与太阳风密度谱变平的区域一致。

Scott 等人<sup>[12]</sup> 利用多站多频率 IPS 测量太阳风速度也得到了类似的结果, 随机速度  $\sigma_v$  与平均速度  $v$  的关系是:  $15R_{\odot} < R < 30R_{\odot}$ ,  $\sigma_v/v > 0.3$ , 其中在  $20R_{\odot}$  处,  $\sigma_v \approx v$ 。他们认为在  $R < 30R_{\odot}$  区域, 太阳风中的不均匀结构是由具有不同速度的波组成的, 波的运动导致随机速度的增强。

1988 年 Lotova 和 Nagelys<sup>[37]</sup> 利用一种新的致密源水蒸汽脉泽的 IPS 对  $R < 40R_{\odot}$  区域的太阳风进行了观测研究, 并综合以前的各种观测, Lotova<sup>[38]</sup> 指出太阳风由亚声速向超声速加速的区域为  $8-25R_{\odot}$ , 如图 3 所示。在跨声区, 太阳风对电波的散射增强, 利用 IPS 便可以划分出太阳风的跨声速区。同时, Lotova 指出, Scott 等人的波理论不能解释发生在跨声速区域的一些现象, 例如波理论不能解释平均电子密度增大以及太阳风为什么突然加速等。对此, Lotova 认为, 在  $10-25R_{\odot}$  区域, 太阳风为亚声速流和超声速流共同存在并相互作用的混合流结构。

近年, Coles 等人<sup>[39]</sup> 利用欧洲非相干散射雷达 (EISCAT) 进行的 IPS 测量得到了  $11-90R_{\odot}$  范围的太阳风速度, 并首次与加速模型理论计算进行了比较。在加速模型中, 假设在超声速区由热压和 Alfvén 波为太阳风提供能量使其加速。在比对的 16 组数据中有一半表明理论与观测一致, 有 4 组观测数据表明在  $R < 20R_{\odot}$  时, 太阳风速度较低, 然后很快加速。目前他们还提不出更好的模型。

## 5 行星际瞬变事件

对由太阳活动引起的行星际瞬变事件<sup>[40]</sup> 的研究在空间物理和地球物理的研究中是一种普遍受到重视的现象。英国剑桥用面积为  $36\ 000\text{m}^2$  的中星仪天线, 在  $81.7\text{MHz}$  频率每天观测 900—2500 个射电源的闪烁指数, 从中得到全天区的三维太阳风电子密度分布图, 径向范围是  $0.6-1.5\text{AU}$ , 从而行星际瞬变事件便可分辨出来, 并可进行研究和短

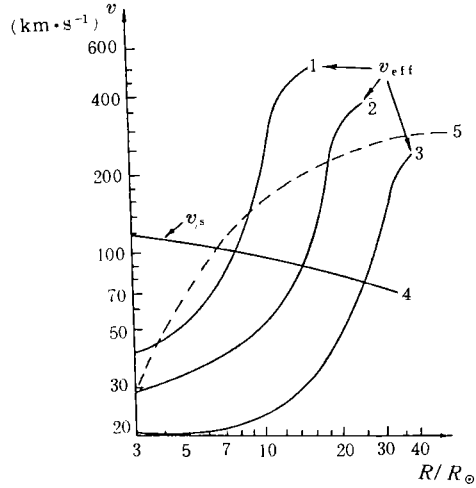


图 3 太阳风速度的径向变化

1、2、3 分别为 1977 年、1975 年和 1976 年的观测结果, 4 为声速, 5 为 Parker 模型<sup>[38]</sup>



期日地扰动预报<sup>[41-43]</sup>。在 1978—1981 年对 IPS 的系统观测研究得到了大量信息<sup>[32]</sup>。在此期间的太阳活动高年,瞬变事件大都是球壳状电子密度增强区,它们常常与激波前沿相联系,激波前沿是指由突然喷发的快速太阳风驱动的压缩区;另外还观测到共转作用区,它是由起源于冕洞的较稳定的高速流引起的。

我国魏奉思等人利用 IPS 速度观测数据,在考虑激波传播的动力学效应的基础上,首先比较成功地研究了耀斑-激波的三维传播特征,发现耀斑-激波相对耀斑法线常表现为非对称传播<sup>[44]</sup>,电流片对激波传播有偏转、会聚和阻隔作用<sup>[45,46]</sup>。最近利用 IPS 速度数据研究了太阳风等离子体和磁场输出的全球结构,发现太阳风等离子体质量流量与太阳光球磁场结构有密切关系<sup>[47]</sup>。

此外,宇宙飞船信标的闪烁也可用来研究瞬变现象,其优点是可用于观测近太阳区域的瞬变事件。Woo 等人<sup>[48]</sup>利用 Solwind 和 Helios 1 进行的闪烁测量结果发现高速激波(速度大于  $1000\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )的减速发生在近太阳区域,随着速度的增加减速增大,这与地球附近空间直接探测到的结果一致。与 IPS 方法相比,宇宙飞船信标闪烁观测的缺点在于飞船和太阳的相对位置时时在变,对瞬变事件的系统观测不能长时间进行。

## 6 结 语

前面几节对太阳风的电波传播观测研究进展作了概述,主要的结论可总结如下:

(1) 太阳风中的电子密度谱为幂律谱  $\phi_{\Delta N} \propto k^{-\alpha}$ , 幂指数  $\alpha$  在 11/3 左右。在近太阳区,太阳风对电波的散射增强,实测表明,当  $R \leq 25R_{\odot}$ , 电子密度谱变平。

(2) 在太阳活动低年,太阳极区的太阳风速大约是黄道面上的两倍,高速太阳风和低密度、开场区相关;低速太阳风和邻近电流片的高密度、闭场区相关。在太阳活动高年,电流片分布在较大的日球纬度范围,太阳风速都较低。

(3)  $R < 30R_{\odot}$  为太阳风的主要加速区,此区域中太阳风有较大的随机速度。 $10-25R_{\odot}$  为跨声速区,在此区域太阳风对电波的散射增强,电子密度谱变平,闪烁指数增大,这为人们划分跨声速区指出了一种判别方法。

(4) 产生于太阳中纬区域冕洞的大尺度瞬变事件通常与激波相联系,并由类似于一般高速流的喷发等离子体流驱动,这种喷发流的持续期较短。电流片对耀斑-激波的传播有偏转、会聚和阻隔作用。

显然,对远日区的太阳风的观测研究已有了一致的结论,对近日区太阳风电子密度谱的观测研究也有了定量的结果。对于太阳风加速区需要更多的观测,尤其是对加速区电子密度的不均匀结构,是由波导致的还是由亚声速流和超声速流的混合流导致的,还存在争论。而实测与理论计算又有一半的数据不吻合,这有待于人们对近日区域进行更多的观测和理论研究。

太阳更高纬度 ( $> 70^{\circ}$ ) 极区太阳风的观测也是重要的研究课题。目前飞行于太空的宇宙飞船 Ulysses 的任务之一就是探测太阳极区太阳风<sup>[14]</sup>。

对于行星际瞬变事件的监测研究正受到更多的关注,许多研究人员试图利用闪烁观

测来预测太阳质子事件和地磁活动。美国 Boulder 的空间环境实验室,正在建立类似于英国  $36\ 000\text{m}^2$  阵的设备,用以对更多的弱源做观测 [32]。

国际日地物理计划 (ISTP)<sup>[49]</sup> 明确指出,现阶段日地系统研究的科学目标是: (1) 探测太阳内部结构,研究太阳活动的起源; (2) 探测日冕的内部区域,研究日冕加热以及加速太阳风的过程; (3) 研究太阳风携带的质量、动量和能量向地球空间的输入; (4) 湍动等离子体研究; (5) 发展第一个全球日地模型。ISTP 计划中包括从 1992 年

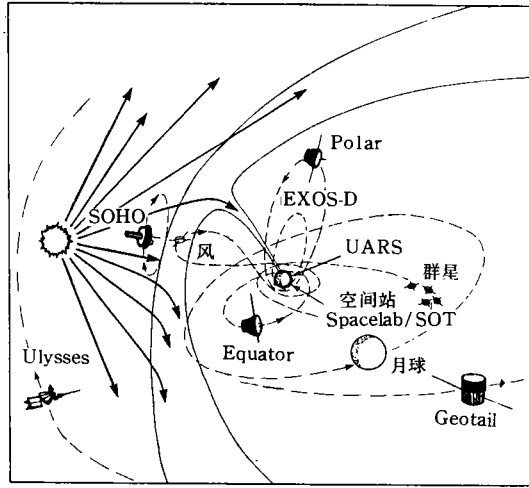


图 4 90 年代用于日地系统研究的宇宙飞船 [50]

开始发射 14 个宇宙飞船到地球的磁层和太阳风中,并有地面间接观测和理论研究的配合。图 4 描述了 90 年代用于日地关系研究的宇宙飞船。

我国北京天文台密云射电站的 28 面天线的复合干涉仪,工作频率为  $232\text{MHz}$ ,今后还将实现  $327\text{MHz}$ ,等效天线几何面积  $1800\text{m}^2$ ,用以开展行星际闪烁观测,适合于探测日心距较短处 ( $f=232\text{MHz}$ ,  $R > 60R_{\odot}$ )<sup>[51,52]</sup> 的行星际空间,并且具有跟踪观测的特点,能够长时间监测同一个空间位置,犹如流体力学实验中在固定位置设置探针。这种特点科学意义显著,目前尚无其他手段可以做到 [53]。该设备可望近期投入观测。

包含扰动成分的太阳风是行星际动力学的主要研究对象,是地球空间环境扰动的源,因而受到近年兴起的边缘科学——“空间天气与空间气候”学以及“空间天气”预报的极大重视。电波传播观测作为太阳风观测的主要方法之一,随着相关理论与技术的进步也必将有一个较大的发展。

## 参 考 文 献

- [1] Parker E N. Ap. J., 1958, 128: 664
- [2] 王家龙. 物理, 1979, 8: 519
- [3] Hunderhasen A J. Coronal expansion and solar wind. Berlin: Springer-Verlag, 1972. 日冕膨胀和太阳风. 魏奉思译. 科学出版社, 1985
- [4] 涂传诒等编著. 日地空间物理学: 行星际与磁层, 上册. 北京: 科学出版社, 1988
- [5] 夏晓阳. 物理, 1990, 21: 158
- [6] Jokipii J R. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1973, 11: 1
- [7] Hewish A, Scott P F, Wills D. Nature, 1964, 11: 1214
- [8] Coles W A, Harmon J K. Ap. J., 1989, 337: 1023

- [9] Cronyn W M. *Ap. J.*, 1972, 174: 181
- [10] Woo R, Armstrong J W. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84: 7288
- [11] Armstrong J W, Woo R. *Astron. Astrophys.*, 1981, 103: 415
- [12] Scott S L, Coles W A, Bourgeois G. *Astron. Astrophys.*, 1983, 123: 207
- [13] Kojima M, Kakinuma T. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92: 7269
- [14] Rickett B J, Coles W A. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 1717
- [15] Harmon J K, Coles W A. *Ap. J.*, 1983, 270: 748
- [16] Manoharan P K, Ananthkrishan S. *M. N. R. A. S.*, 1990, 244: 691
- [17] Salpeter E E. *Ap. J.*, 1967, 147: 433
- [18] Yeh K C, Liu C. *Proc. IEEE*, 1982, 70: 324
- [19] Ishimaru A. *Wave propagation and scattering in random media*. New York: Academy, 1978
- [20] Little L T, Ekers R D. *Astron. Astrophys.*, 1971, 10: 306
- [21] Coles W A, Liu W, Harmon J K, Martin C L. *J. Geophys. Res.*, 1991, 96: 1745
- [22] Readhead A C S, Kemp M C, Hewish A. *M. N. R. A. S.*, 1978, 185: 207
- [23] Coles W A. *Space Sci. Rev.*, 1978, 21: 411
- [24] Coles W A, Harmon J K. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83: 1413
- [25] Gapper G R, Hewish A. *M. N. R. A. S.*, 1981, 197: 209
- [26] Scott S L, Rickett B J, Armstrong J W. *Astron. Astrophys.*, 1983, 123: 191
- [27] Coles W A, Filice J P. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 5082
- [28] Ree W G, Duffett-Smith P J. *M. N. R. A. S.*, 1985, 212: 463
- [29] Woo R, Yang F C, Ishimaru A. *Ap. J.*, 1976, 210: 593
- [30] Woo R, Yang F C, Yip K W *et al.* *Ap. J.*, 1976, 210: 508
- [31] Tyler G L, Vesecky J F, Plume M A *et al.* *Ap. J.*, 1981, 249: 318
- [32] Hewish A In: Cordes J M, Rickett B J, Backer D C eds. *AIP Conf. Proc. No.174*, 1988: 82
- [33] Dennison P A, Hewish A. *Nature*, 1967, 213: 343
- [34] Vitkevich V V, Vlasov V I. *Soviet Astronomy-AJ*, 1970, 13: 669
- [35] Coles W A, Rickett B J. *J. Geophys. Res.*, 1976, 81: 4797
- [36] Kakinuma T, Kojima M. *Proc. RIA Nagoya University*, 1984, 31: 1
- [37] Lotova N A, Nagrelys Ya V. *Solar Phys.*, 1988, 117: 407
- [38] Lotova N A. *Solar Phys.*, 1988, 117: 399
- [39] Coles W A, Esser R, Lovhaug U *et al.* *J. Geophys. Res.*, 1991, 96(A8): 13849
- [40] 王家龙. *空间物理与探测技术*. 1991, 6; 1
- [41] Gapper G R, Hewish A, Purvis A *et al.* *Nature*, 1982, 296: 633
- [42] Tappin S J. *Planet. Space Sci.*, 1986, 34; 93
- [43] Hewish A. In: Thompson R J *et al* eds. *Solar-terrestrial prediction, Proc. Solar-terrestrial prediction workshop*, Leura, Australia, 1989, Boulder: NOAA, 1990: 81
- [44] 魏奉思. *中国科学 (A 辑)*, 1987, 2: 186
- [45] Wei F, Dryer M. *Solar Phys.*, 1991, 132: 373
- [46] 魏奉思, 张剑虹, 刘四清. *空间物理与探测技术*, 1991, 6: 100
- [47] 魏奉思, 蔡红昌. *科学通报*, 1992, 22: 2062
- [48] Woo R, Armstrong J W, Sheeley N R *et al.* *J. Geophys Res.*, 1985, 90: 154
- [49] U. S. ISTP community. *Solar-terrestrial physics in the 1990s: draft report of the IACG-ISTP workshop*, San Antonio, Texas, 1991, Washington: NASA, 1991
- [50] NASA. *International solar-terrestrial physics program: a plan for the core spacecraft mission*. Washington: ESA, ISAS, NASA, 1985
- [51] Hewish A. private communication, 1991

- [52] Lotova N A. 中国科学院北京天文台讲学笔记, 1991
- [53] 王绶琯. 关于利用密云米波射电开展行星际闪烁 (IPS) 观测研究的意见. 私人通信, 中国科学院北京天文台, 1990

(责任编辑 林一梅)

## Research of Solar Wind by Observations of Radio Wave Propagation

Ma Guanyi, Wang Jialong

( *Beijing Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080* )

### Abstract

The results of recent 30 years study of solar wind using the method of radio wave scattering are reviewed, with emphasis on the interplanetary scintillation(IPS). The principal theory of radio wave propagation and its application to various observations are outlined. The electron density spectrum and solar cycle evolution of the three-dimensional solar wind structure are discussed. The results confirm the important role of scintillation measurements in studying the acceleration of solar wind. Consulting the International Solar-Terrestrial Physics Program(ISTP), this review also points out major research topics of solar wind in 1990s. Finally, the feature of Miyun Synthesis Radio Telescope(MSRT) of Beijing Astronomical Observatory and its possibility in making IPS measurements are briefly described.