

行星际闪烁 (IPS) 研究新进展

马振国^{1,2} 张喜镇² 韩文焯²

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

(2. 中国科学院国家天文观测中心 北京 100012)

摘 要

太阳风行星际闪烁 (interplanetary scintillation, IPS) 研究在太阳物理、日地空间物理和空间天气学研究中具有重要科学意义。经过近 30 年重点研究太阳风后, 从 90 年代初开始, IPS 研究在太阳风与日球观测的对比分析、行星际扰动与地磁活动预报、观测数据的层析分析三方面都取得了新的进展。

关键词 太阳: 太阳风 — 行星际闪烁 — 方法: 观测

分类号 P182.9

1 前 言

对由太阳大气、行星际空间、地球磁层、电离层以及热层、中层和低层大气组成的日地系统 (solar-terrestrial system) 的研究, 在经历了初期的发展阶段和 20 世纪 70 ~ 80 年代的测绘阶段后, 正在向成熟阶段迈进。该阶段主要实施国际日地物理计划和日地能量计划, 把日地系统作为一个各组成部分有紧密联系的整体, 探测太阳内部结构和日冕的内部区域, 了解太阳活动、日冕加热以及太阳风加速的过程, 研究太阳风携带的质量、动量和能量向地球空间的输入, 发展全球日地模型, 从而研究太阳能量的产生和它在日地空间中的传输并最终影响地球环境的全过程。简言之, 即对日地系统整体行为的空间天气研究。作为全面了解太阳风性质和磁层 - 电离层性质手段之一的行星际闪烁 (interplanetary scintillation, IPS) 观测研究, 是研究日地系统整体行为的重要组成部分。

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。它不仅是日地间物质的主要来源, 还将太阳活动和地球物理的相关现象联系起来。同时, 太阳风所涉及的广阔空间也是研究天体等离子体物理的天然实验室, 对天体物理研究具有重要科学意义。自从宇宙飞船对行星际空间等离子体直接探测之后, 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。空间探测太阳风可以实地测量多种物理参数 (如电子密度、磁场、太阳风速度等), 精确度比较高。二十多年来, 空间飞行器直接探测虽然导致了人们对于日地空间概念的变革, 但是探测只能沿着固定轨道取样, 而日面的瞬变事件在时间和位置

上都有相当大的随机性。每一个空间飞行器，又只能提供一种预定的而不是实时选择的轨道扫描，因而这样的一个甚或几个轨道，对所要研究的空间来说是“极其稀疏的分布”，意味着对于任何一个特定空间位置的极低取样率。况且，迄今大部分的空间探测器，轨道都在近黄道面范围，其观测的局限性显而易见。

IPS 指由太阳风不规则性引起的射电源观测记录中的不规则强度起伏，它来自于约 200km 的小尺度密度变化，反映与地磁暴相关的日层扰动的日变化^[1]。60 年代后，人们不仅开始通过地基射电观测研究太阳风的特征^[2,3]，还应用多站 IPS 观测确定太阳风的速度^[4,5]。继 1964 年发现 IPS 后，已成功地实现了太阳风密度、速度不均匀结构的观测研究。这种方法虽然还有相当的局限性，如分辨率低、物理模型也有待进一步完善等，但它在很大程度上避免了空间探测的局限，不仅可用来研究任何日心距和任何日球纬度上的太阳风，还具有能够长期监测、跟踪观测的优势，特别是能够研究日心距较短处，即空间探测达不到的区域。如果与空间飞行器直接探测相配合，则有可能从根本上阐明太阳风的结构与物理性质，为结合太阳的空间和地面观测资料，研究日冕加热以及加速太阳风的过程奠定基础。90 年代以前，虽然取得了时间上长于 2 个 11yr 太阳活动周的太阳风原位测量数据，但仅局限于飞船所及的黄道面上日球纬度为 $\pm 7.25^\circ$ 的窄带之内；而作为常规观测手段的地基 IPS 观测，发挥了其不局限于日心距和日球纬度的特点，已取得了太阳风观测研究的诸多成果，马冠一、王家龙^[6]对此已作了详尽综述。

90 年代后的国际日地物理计划 (ISTP)^[7] 和太阳磁活动 (Solar Magnetic Activities)^[8] 研究，都将太阳磁场与磁活动、日冕加热与太阳风加速、太阳风 - 磁层 - 电离层的耦合，作为日地系统研究的重点，IPS 的研究方向也随之发生变化。将几十年来积累的太阳风观测资料作为研究的基本数据，与日球观测资料、地磁活动资料或新的模型分析方法相结合，获得了更为准确或更大空间范围的太阳风行星际扰动、地磁活动预报、激波结构等研究成果。

2 国际 IPS 观测研究进展

2.1 IPS 观测与日球观测相关研究

在太阳 22 活动周内，印度 Ooty 射电天文中心的 Manoharan^[9,10] 绘制了太阳风等离子体密度和速度综合图，并与日冕密度图^[11] 和 2.5 个太阳半径处的源面磁场图^[12] 对照分析。他发现太阳风速度和日冕磁场强度具有强关联，两者都在高日磁纬区较大，越靠近低纬越小；在闭合磁区上方，太阳风密度起伏较为集中，并且与速度变化相反。此外，高速风中的可压缩湍流比低速风高 2 倍或更多。研究还发现密度起伏与日冕中性片的位置有关，随着离开中性片角距的增加，密度的变化减少，与前期研究结果^[13,14] 相同。

太阳风究竟起源于低温冕洞区，还是起源于 Parker^[15] 的日冕高温区，这是太阳物理的重要内容之一^[16]。在 Carrington 1753 转动周内，Hakamada 和 kojima^[17] 将 IPS 太阳风速度图和色球 He I(1083nm) 吸收线强度图对比，采用 P 点近似法和视线权重因子法，将太阳风观测数据沿磁力线投影到 2.5 个太阳半径的源面后，继续投影到光球面，并以足点作为太阳风的光球源区。研究显示， P 点近似法优于权重因子法，并且平均来看太阳风在约 27 个太阳半径内被加速。应用首次估计的太阳风速度时变表达式进行计算，结果与从 Parker 理论推出的太阳风速度的径向变化类似，二者之间仅具有变化率的差异。

另一个重要问题是, 太阳风形成后其总体变化图像是怎样的? 对于比太阳更亮的恒星来说, 星风驱动过程消耗更大比例的恒星质量, 从而可能更明显地改变星体的演化过程^[18]。那么, 对于太阳这颗我们可详细研究的恒星, 总体观测得到的定量结果就可作为所有恒星(至少包括那些类太阳恒星)质量驱动过程研究的参照。基于这种思考, Leinert 和 Jackson^[19]对比研究了 Helios 飞船光度计亮度数据、局地等离子体密度数据和 IPS 速度观测数据的相互关系, 获得了太阳 21 周(1975~1986)期间太阳风的总体变化特征(参见图 1)。这是首次针对整个太阳周研究太阳风速度和密度变化的关系。Schwenn^[20]较早指出, 在太阳周内可近似认为低纬区的动量流守恒, 并且速度或质量都鲜有变化; 但在高纬区, Helios 光度计记录到了等离子体亮度的太阳周变化, 并在太阳活动极强时呈最大。另一方面, 太阳极区的太阳风速度 IPS 观测^[21]也取得类似结果, 但变化趋势相反。Leinert 和 Jackson 认为, 光度计测量得到的亮度在太阳活动极大年期间的变化, 反映太阳质量流量高于通常采用的恒定动量流假设推出的结果, 一部分所增加的过剩质量与太阳质量抛射有关; 从太阳活动最小年到最大年, 日层动量流守恒是很好的一级近似; 太阳风的加速与太阳风结构和太阳活动周关系不大, 加速过程并未明显受到在太阳活动极大年时占优势的太阳表面强磁场的影响。

2.2 行星际扰动与地磁活动预报

对太阳活动及其变化的日地空间效应研究是一个长期课题。人们一直将强地磁暴和行星际扰动 (IPD) 归因于相应日面活动区的强活动, 耀斑在 CME 形成中扮演着重要角色^[22], 但地磁暴和其它 IPDs 的源可能是 CME 而不是耀斑^[23]。相对于极稀疏的飞船实时实地探测点来说, IPS 观测就充分发挥了优势。应用 Manoharan 等人^[24]的研究方法, Janardhan 等人^[25]

根据事先由美国空间环境中心获得的两个耀斑产生激波前沿的预报, 利用 Ooty 射电望远镜在 1992 年 10 月 31 日~11 月 5 日对一些合适的射电源进行了 IPS 观测, 以检验 IPDs 的特征。他们沿视线对许多空间分布的致密射电源进行快速扫描, 检验到了二次 IPD。将二次

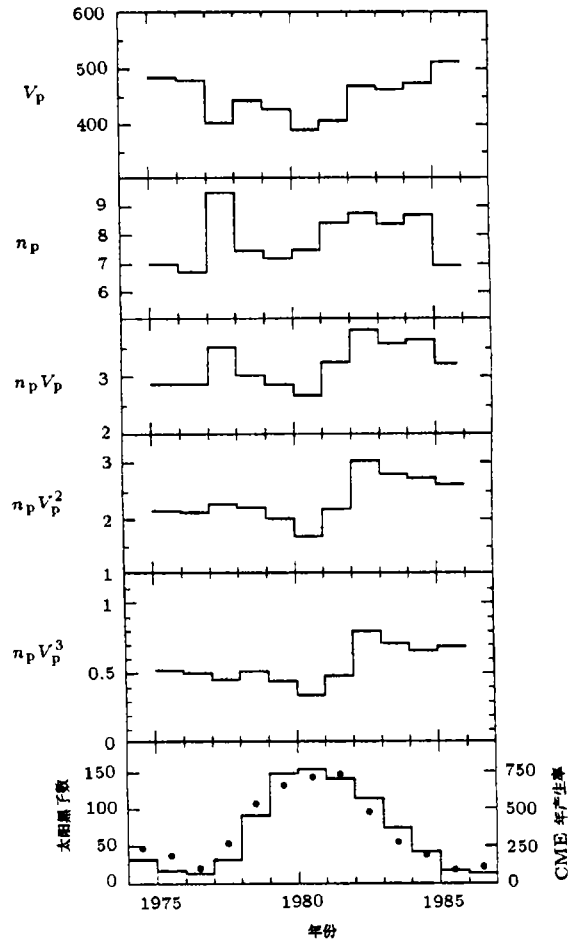


图 1 太阳风参数的年均变化

数据取自 Schwenn^[20]的 Helios 1 和 Helios 2 局地空间探测结果。 V_p 是质子速度, 单位为 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; n_p 是质子密度, 单位为 cm^{-3} ; $n_p V_p$ 是质子通量密度, 单位为 10^8 质子 $\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $n_p V_p^2$ 是动量通量密度, 单位为 $10^3 \text{N}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; $n_p V_p^3$ 是质子动能通量密度, 单位为 $10^{-7} \text{J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。最下方图给出年均太阳黑子数目(直方图)和 CME 年产生率(实圆点)

IPD 追溯回太阳表面,发现足区是离一个大冕洞很近的日面活动区。尽管在表述 IPDs 与太阳表面各种现象之间的联系分歧甚大,但该研究明确说明,对所研究的两个互不相干的行星际瞬间事件,耀斑和冕洞都可能起着重要作用。

英国剑桥 Mullard 射电天文台 (MRAO) 从 1978 年到 1981 年期间,每天对 g 值 (闪烁指数与其均值之比) 成图 (其分辨率为几度) 来反映 IPS 观测的结果。Hewish 和 Bravo^[26] 指出,根据常规 IPS 日观测 g 值 (观测区内闪烁测量值与计算值之比) 曲线图中, g 值呈现较短时间的小起伏,还呈现另外一两个较长时间的大起伏,这说明存在两种主要类型的扰动事件,即共转区事件和喷射流事件,前者可能来自持续的外逸流,后者是某种形式的突发事件中产生的瞬态流,并被定义为 CMEs 的行星际延伸。但是, Moore 和 Harrison^[27] 利用 MRAO 一部分数据检验与 IPDs 相关的大尺度太阳风密度和速度特征后,发现对于地球附近的 IPS 扰动事件,几乎都存在小于 1h 短时标内的密度增加,而相关的压力改变可能是近地磁层响应之源。IPS 扰动事件发生时,速度是随密度增加增加的,但在事件后,密度可能稍有减少,速度一般仍略有增加。由于并不能判别到底是哪一种类型的扰动在起作用,从 IPS 图区分开两种事件对日地环境的影响差别不大。

通过局地飞船探测和 IPS 观测已对由耀斑和 CME 产生的行星际激波进行了广泛研究。局地飞船探测可给出当地等离子体粒子和磁场的详细数据,IPS 观测能给出扰动的总体结构。对飞船探测难以企及的太阳风区,虽然遥测方法 (诸如 IPS 和白光光度计测量) 是行之有效的,但视线的积分效应会使测量出现偏差,空间分辨率较低。尤其对于瞬变事件的诊断,尚无真正合适的办法来实施。这种情况下, Shishov 等人^[28] 将闪烁指数表为激波前沿和给定射电源之间距离的函数,根据取得的俄罗斯 Pushchino IPS 观测数据,消除偏差并再现激波结构后通过分析得到,激波密度涨落实际存在两种成分,第一种成分的厚度约为 0.02AU,尺度为 0.3AU,太阳风密度增加 $15^{1/2}$,第二种成分厚度为 0.1AU,尺度为 0.7AU 左右,但密度仅增加 $2^{1/2}$ 。由于所考虑的激波前沿离太阳的距离在 1AU 的量级,所以得到的结果对近地轨道区域应具有参考价值。

如果将 IPS 技术与内日层大尺度等离子体结构的监测相结合,能否预报地磁活动呢? Hewish 及其合作者在研究单个激波和太阳共转流事件时,已定性地提出了这个问题^[29~31]。1987 年, Hewish 和 Duffett-Smith^[32] 报道了在 1978 年 8 月~1979 年 9 月期间,16 个强磁暴 (地磁活动指数 $A_p > 40$) 之前的 IPS 日层扰动特征信号,但相关性却不强^[33]。其后, Harrison 等人^[34] 提出用 IPS 日活动指数 $I_{35} = (GT - LT)/N$ 来检验 IPS 与地磁活动性的联系,其中 GT、LT 和 N 分别是 g 值大于 1.35、小于 0.65 的射电源数目和观测区总射电源数目。然后, Hapgood 和 Harrison^[35] 作出了 $I_{35}-A_p$ 图,对图中呈三角形点分布的观测数据来源进行研究,探讨了 IPS 预报地磁活动的可行性。结果表明,IPS 观测到的太阳风动量流的扰动,可决定地磁活动的最大可能水平;在 A_p 指数明显变化的前一天,可观测到 I_{35} 的明显变化。从而,IPS 观测就有可能成为预报地磁活动的一种手段。但是,由于行星际磁场 (IMF) 也是太阳风/磁层耦合的主要因素之一^[36],所以,还必须考虑 IMF 及其它可能的因素并联合分析,才可能实施准确的地球磁层磁暴、磁层亚暴预报。

2.3 IPS 数据的层析分析

尽管自 60 年代开始的 IPS 观测已取得较大进展,但实际上,不仅在 IPS 事件的日面对应源区及其对地磁的影响方面尚存在疑问^[37],ISP 技术本身也存在问题:IPS 观测假设被

观测物质全部位于视线上离太阳最近的点(称为 P 点近似)。但实际情况是, 观测到的闪烁是沿视线全部贡献的权重求和。

Jackson 等人^[38]编制了计算机辅助层析程序, 在每一视线上, 用权重法计算出模型数据, 然后与观测值比较, 误差再作为输入数据进一步修正模型计算, 直到模型分析结果与观测结果达到最小二乘法的最优拟合。太阳风模型取径向外流, 并且动量守恒; 假定太阳风密度随径向距离 r 呈 r^{-2} 变化。他们使用日本名古屋和英国剑桥的 ISP 观测数据, 以日面经纬度精度为 10° , 作出了太阳风速度和电子密度的 Carrington 图。结果显示, 日面高速风区与 Yohkoh 软 X 射线望远镜 (SXT) 观测的冕洞 (包括极区) 轮廓相对应, 低速风区一般对应 SXT 数据的明亮区; 高密度区与 SXT 观测亮区的强太阳活动相对应。接着, Jackson 等人^[39]又把层析结果与 IMP 飞船数据、Sacramento Peak Fe XIV 强度、Mark III K 日冕仪图结合分析, 得出太阳风电子密度 N_e 的起伏 $\Delta N_e \propto N_e^{0.3}$, 高密度区对应于 K 日冕仪的观测亮区。他们认为, 在层析假设下, 这种分析方法提供了共转日球参数的最佳拟合。同时, Kojima 等人^[40]也利用层析程序, 分析了太阳活动最小年的 IPS 观测数据。他们发现, 极区存在约 $800\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高速太阳风, 但在太阳赤道 30° 之内风速减为 $400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。将层析方法用于距角小于 17° 的部分强闪烁区, 取得的结果与大日距角时相差无几。此外, 将 $0.1 \sim 0.3\text{AU}$ 和大于 0.3AU 的 IPS 数据对比可知, 高速极区太阳风在 0.1AU 之内达到其最大速度, 0.1AU 之外加速很小。

太阳风的密度涨落可能与太阳风加速、日冕加热、MHD 湍流等有关。Asai 等人^[41]应用层析程序研究了日心距在 $0.3 \sim 0.8\text{AU}$ 时, 太阳活动极小年的太阳风速和尺度约 100km 的电子密度 N_e 涨落 ΔN_e 之间的关系, 这期间, 在高速风区和赤道低速风区之间, 有一个较大的速度梯度区。研究发现, 密度 N_e 的起伏 ΔN_e 与风速 V 之间存在幂律关系: $\Delta N_e \propto V^{-\gamma}$, $\gamma = 0.5 \pm 0.15$, 表明高速风的密度相对变化量 $\Delta N_e/N_e$ 大于低速风, 这与较早报道的两项研究结果相吻合。这两项结果一是 Celnikier 等人^[42]通过射电测量两颗卫星信号取得的太阳风密度湍动结果, 另一是 Tu 和 Marsch^[43]对 Helios 飞船测量的质子相对密度变化 $\Delta N_p/N_p$ 所作的谱分析结果。前者观测得到了 1AU 处高速太阳风温度高于低速风温度; 而高温太阳风中的 $\Delta N_e/N_e$ 高于低温风中的 $\Delta N_e/N_e$, 他们认为高速风中的 $\Delta N_e/N_e$ 就大于低速风中的 $\Delta N_e/N_e$ 。后者的观测结果是, 波数增加到 $2 \times 10^{-5}\text{km}^{-1}$ 附近, 高速风的相对密度变化 $\Delta N_p/N_p$ 也增加到与低速风的相对密度变化 $\Delta N_p/N_p$ 相当; 从而, 作者们认为当波数进一步增大时, 高速风的相对密度变化 $\Delta N_p/N_p$ 会进一步增加, 超过低速风的相对密度变化 $\Delta N_p/N_p$ 。如果取等离子体的质子密度 N_p 及其涨落 ΔN_p 分别等于电子密度 N_e 及其涨落 ΔN_e 时, 则 $\Delta N_p/N_p$ 密度谱给出了 $\Delta N_e/N_e$ 的特征, 这样, 该结果就与 Asai 等人^[41]的研究结果相吻合。

3 讨 论

20 世纪 90 年代, IPS 观测研究主要取得了以下进展:

(1) 太阳风的速度和日冕磁场强度强关联, 密度涨落在闭合磁区上方较为集中, 并与速度反相关。太阳风速度在径向约 27 个太阳半径内加速。但是, 加速与太阳风结构和太阳活动周联系不大。

(2) 耀斑和冕洞都可能是太阳风行星际扰动的原因。扰动发生时, 太阳风的密度在小于 1h 的时标内增加, 速度随之增加; 扰动发生后, 密度可能稍有减小, 而速度一般略有增加。作为

扰动的一种特定类型, 行星际激波发生后, 其密度增加存在大小两种空间尺度的组分, 两种组分密度增加值与空间特征长度 ($V_S^{1/3}$, V_S 为激波密度涨落组分的体积) 大致为倒数关系。利用新提出的 IPS 日活动指数, 有可能预报地磁活动指数 A_p 的最大值。

(3) IPS 数据的层析分析表明, 太阳风电子密度 N_e 与其起伏 ΔN_e 之间存在幂律关系: $\Delta N_e \propto N_e^{0.3}$, ΔN_e 与太阳风速 V 之间存在负幂律关系: $\Delta N_e \propto V^{-\gamma}$, $\gamma = 0.5 \pm 0.15$; 太阳活动低年, 太阳风区分为高速区和低速区, 高速区位于高纬区, 速度约为 $800 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 低速区在赤道 30° 之内, 速度约为 $400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

如果实施选择射电源进行 IPS 观测, 将连续跟踪观测取得的太阳风电子密度起伏和太阳风的速度数据, 与电离层扰动 (ISD) 观测结合起来形成双 I 观测^[44], 再与应用其它观测方法, 取得的太阳活动资料和 / 或地磁活动资料对比研究、联合分析, 以发现一些有科学研究意义的日地环境扰动事件, 可能更具研究价值。

致谢 本文是在王绶琯先生的具体指导下完成的。参加本工作的其他同志还有: 康连生高工、张忠勇副研究员等, 对他们的指导和帮助敬致谢意。

参 考 文 献

- 1 Gapper G R, Hewish A, Purvis A et al. *Nature*, 1982, 269: 633
- 2 Hewish A, Scott P F, Wills D. *Nature*, 1964, 11: 1214
- 3 Houminer Z. *Nature*, 1971, 231: 165
- 4 Coles W A, Kaufman J J. *Radio Science*, 1978, 13: 591
- 5 Kojima M, Kakinuma T. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92: 7269
- 6 马冠一, 王家龙. *天文学进展*, 1994, 12(1): 30
- 7 US ISTP Community. *Solar-terrestrial Physics in the 1990s: draft report of the IACG-ISTP Workshop*, San Antonio, Texas, 1991
- 8 Wang J X. *Fundam. Cosmic Phys.*, 1999, 20: 252
- 9 Manoharan P K. *Solar Phys.*, 1993, 148: 153
- 10 Manoharan P K. *Bull. Astron. Soc. India*, 1995, 23: 399
- 11 Hansen S F, Sawyer C, Hansen R T. *J. Geophys. Res.*, 1974, 83: 4177
- 12 Hoeksema J T, Wilcox J M, Scherrer P H. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 9910
- 13 Bourgois G, Coles W A. *Proceedings of 7th Inter. Solar Wind Conf.*, 1992, Germany: Max-Planck-Institute fur Aeronomie, Katlengurg- Lindau, 155
- 14 Woo R, Goldstein R M. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 21: 85
- 15 Parker E N. *Ap. J.*, 1958, 128: 664
- 16 Barnes A. *Rev. Geophys.*, 1992, 30: 43
- 17 Hakamadau K, Kojima M. *Solar phys.*, 1994, 153: 419
- 18 de Jager C, Nieuwenhuijzen H, van der Hucht K A. In: Lamers H J G L M, de Loore C W H eds. *Instabilities in Luminous Early Type Stars*, Dordrecht: Reidel, 1984. 201
- 19 Leinert Ch, Jackson B V. *Ap. J.*, 1998, 505: 984
- 20 Schwenn R. In: Schwenn R, Marsch E eds. *Physics of the Inner Heliosphere 1*, Berlin: Springer, 1990. 99
- 21 Coles W A et al. *Nature*, 1980, 286: 239
- 22 Dryer M. *Space. Sci. Rev.*, 1994, 67: 363
- 23 Gosling J T. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(A11): 18937
- 24 Manoharan P K et al. *Solar Phys.*, 1995, 156: 377
- 25 Janardhan P et al. *Solar Phys.*, 1996, 166: 379
- 26 Hewish A, Bravo S. *Solar Phys.*, 1986, 106: 185
- 27 Moore V, Harrison R A. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(A1): 27

- 28 Shishov V I, Vlasov V I, Kojima M. *Solar Phys.*, 1997, 176: 373
29 Gapper G R et al. *Nature*, 1982, 296: 633
30 Tappin S J et al. *Planet. Space Sci.*, 1983, 31: 1171
31 Tappin S J et al. *Planet. Space Sci.*, 31, 1984: 1273
32 Hewish A, Duffet-Smith P J. *Planet. Space Sci.*, 1987, 35: 487
33 Hewish A, Bravo S. *Solar Phys.*, 1986, 106: 185
34 Harrison R A et al. *Ann. Geophys.*, 1992, 10(8): 519
35 Hapgood M, Harrison R. *Geophys. Res. Lett.*, 1994, 21(7): 637
36 Akasofu S I. *Dynamics of the magnetosphere*, Dordrecht, Holland: Reidel, 1980. 447
37 Tsurutani B T, Gonzalez W D. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(A8): 12305
38 Jackson B V et al. *Adv. Space Res.*, 1997, 21(1): 23
39 Jackson B V et al. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A6): 12049
40 Kojima M et al. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A2): 1981
41 Asai K et al. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(A2): 1991
42 Celnikier L M et al. *Astron. Astrophys.*, 1987, 181: 138
43 Tu C Y, Marsch E. *Space Sci. Rev.*, 1995, 73: 1
44 马振国, 张喜镇. *电波科学学报*, 1999, 14(增刊): A11

Interplanetary Scintillation (IPS) Observations

Ma Zhengu^{1,2} Zhang Xizhen² Han Wenjun²

(1. *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080*)

(2. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100012*)

Abstract

The study of the interplanetary scintillation (IPS) of the solar wind is of great scientific significance in the fields of the solar physics, solar-terrestrial physics, as well as the newly developed space meteorology. By focusing on the observations of the solar wind during 30 years, more new progress has been made in the following three aspects with IPS observations since 1990s: the comparative analysis between the solar wind and the inner heliosphere, the interplanetary disturbance and the geomagnetic prediction, and the heliospheric data-tomography.

Key words sun: solar wind—interplanetary scintillation (IPS)—methods: observational