

# 关于耀斑-激波非对称传播的统计研究\*

魏 奉 思

(中国科学院空间物理所, 北京)

## 摘 要

本文根据耀斑活动所引起的地球物理效应(地磁扰动和宇宙线 Forbush 下降)、空间飞船的直接观测和射电源的行星际闪烁(IPS)观测的综合研究,得到了有关耀斑-激波在行星际空间传播的一些新认识。要点是:耀斑-激波相对耀斑法线常表现为非对称传播,最快的传播方向于经度上趋向行星际螺旋形磁场一边,纬度上接近太阳电流片方向;激波的东南部是高动力学参数( $V, P, N, T$ )和高等离子体 $\beta$ 参数区,其西北部则相反;磁场则是激波东南部较弱而西北部最强,与动力学参数的分布截然相反;激波东南部的能量高于西北部。在上述结果的基础上提出了关于耀斑-激波非对称传播的三维物理模型。该模型和新近根据大量飞船观测所进行的统计研究结果一致,能统一而自然地解释耀斑-地球物理效应随源耀斑分布的非对称性。耀斑-激波的三维非对称性传播和结构可能是其“效应”的非对称性分布的基本起源。

## 一、前 言

太阳耀斑高速流引起的行星际激波(简称耀斑-激波)和冕洞高速流引起的共转激波是造成日球空间和地球物理环境变化的二类重要扰动源。特别是大耀斑-激波常携带着 $\geq 10^{25}$  J 的巨大能量在日球空间传播,直接影响人类地球物理环境的变化。如极光、地磁暴、宇宙线 Forbush 下降、电离层暴以及天气过程、航天飞行和科学实验等活动。因而耀斑-激波的传播问题是日地关系研究中十分引人注目的问题。然而长期来由于空间飞船观测局限于黄道面附近和理论上处理非线性激波的困难,诸如激波的形状、各向异性传播、三维结构以及它和太阳磁场、日球大尺度结构的关系等基本问题,至今了解甚少,基本上处于实验研究阶段<sup>[1-2]</sup>。

耀斑-激波的传播问题曾在文献[3-6]中进行过设想和一些个例的分析。由于当时的局限性,背景太阳风的各向异性流动对激波的影响问题虽然提出来了,但未能考虑;分析激波形状所依据的平均速度不是同一时刻、同一激波面上的值,动力学效应(激波减速)考虑过简而多有失真;只有少数个例分析而无统计研究,等等。在此情形下,提出对称传播(相对于耀斑法线方向)的看法似乎勉强,且有争论<sup>[3]</sup>,同时也不能解释耀斑-地球物理效应中的非对称性分布。此外,关于激波能量、磁场和动力学参数在激波面后的分布等知识也尚未获得。为了适应日地系统研究的深入,我们针对这些问题对大量的飞船观测、IPS 观测和耀斑-激波的地球物理效应进行了较广泛的综合研究<sup>[7-11]</sup>,提出了耀斑-激波传播最基本的特征是相对耀斑法线方向为

本文 1985 年 9 月 21 日收到,1986 年 8 月 13 日收到修改稿。

\* 中国科学院科学基金资助的课题。

非对称传播的观点。这里非对称是指耀斑法线方向所分开的二个激波部份的平均特性而言。基本含义包括: 激波形状(或传播速度); 激波面后动力学参数  $V_2$  (或  $V_s$ ),  $\rho_2$ ,  $T_2$ ,  $N_2$  和磁场  $B_2$  以及等离子体  $\beta$  参数的分布; 单位立体角内能量分布的非对称性等。在此基础上提出了关于耀斑-激波传播的三维物理模型。这个模型有利于深入了解耀斑-激波的起源、它同背景介质之间的相互作用过程、提供有关近太阳传播条件(特别是磁场结构)的重要信息和改善耀斑引起的日地扰动事件的预报水平。若按对称传播的观点, 人们对上述问题的了解将会受到限制。

下面分别就耀斑-激波的效应、飞船观测和 IPS 观测几个方面的研究成果予以简要介绍。

## 二、太阳耀斑之后地磁、宇宙线效应的研究

### 1. 观测依据

太阳耀斑之后的地磁、宇宙线效应曾为许多学者研究过<sup>[11-16]</sup>, 比较完整的统计研究结果一致表明: 太阳大耀斑之后的地磁扰动、宇宙线 Forbush 下降分别与太阳风速度和磁场增强有密切联系; 地磁扰动  $A_p$ , AE,  $\Sigma K_p$  和  $D_{st}$  等指数随源耀斑位置的分布有鲜明的东-西不对称性, 西半球的耀斑所引起的地磁扰动比东半球的耀斑要大得多; 宇宙线 Forbush 下降幅度却具有与地磁扰动相反的东-西不对称性。上述结果分别给在图 1 中,  $\theta$ ,  $\phi$  分别代表源耀斑的纬度和经度, 纵坐标均表示按极大值归一化的大小。图 1 所示曲线所具有的物理内含请见下节分析。

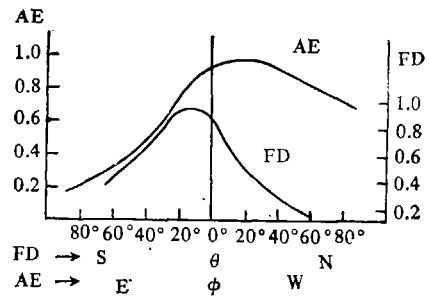


图 1 地磁 AE 指数, 宇宙线 Forbush 下降分别随源耀斑经度  $\phi$  和纬度  $\theta$  的平均分布

### 2. 分析方法

研究太阳耀斑之后的地磁、宇宙线效应, 我们的基本思想是: 图 1 所示的统计平均分布曲线系由一个平均的耀斑-激波所引起, 分布曲线的非对称性主要是由耀斑-激波的传播特性及其结构的非对称性所决定。基本的研究方法是: ①由于耀斑-激波在 1AU 附近空间的特征尺度  $\approx 1\text{AU}$ , 可把和地球发生相互作用的局部区域近似为平面, 这部分激波面与日地经向方向间的夹角  $\phi$  同耀斑法线方向(通过耀斑的太阳径向方向)与日地经向间的角度  $\zeta$  相对应, 也就是说与源耀斑的位置  $\theta$ ,  $\phi$  相对应; ②利用理想的平面斜激波的跃变条件解出激波面后的参数  $V_2(\phi)$ ,  $V_s(\phi)$ ,  $B_2(\phi)$ ,  $P_2(\phi)$ ,  $T_2(\phi)$  和  $N_2(\phi)$  等; ③再根据已为众多学者所得到的统计结果  $AE = CB_s V^2$ ,  $A_{FD} = K_1 + K_2 B_2 + K_3 B_2^2$  以及图 1 的归一化平均分布可找出  $\phi$ - $\phi$  (或  $\theta$ ) 的关系。于是可分别得到由地磁 AE 指数和宇宙线 Forbush 下降所推算的耀斑-激波在黄道面内和子午面内的激波传播特征  $V_s(\phi)$ ,  $V_s(\theta)$  以及激波面后的参数分布  $V_2(\phi)$ ,  $B_2(\phi)$ ,  $P_2(\phi)$  等以及  $V_2(\theta)$ ,  $B_2(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  等。主要结果如图 2 所示(这里应说明的是, 图 2 采用的是相对耀斑法线的经纬度  $\Theta$  和  $\lambda$ , 以便说明参数在激波面后的分布。而图 1 是采用源耀斑的日面经纬度, 以便说明不同日面位置的耀斑所产生的地球物理效应的不同。因为当耀斑位于日面西边时是激波的东部扫过地球, 耀斑位于日面东边时则是激波的西部扫过地球, 所以两种表示方法的东-西正好相反)。由图 2 可以看出: 激波向耀斑法线之东南方向的传播比向西北方向快; 激波的东南部为高动力学参数区,

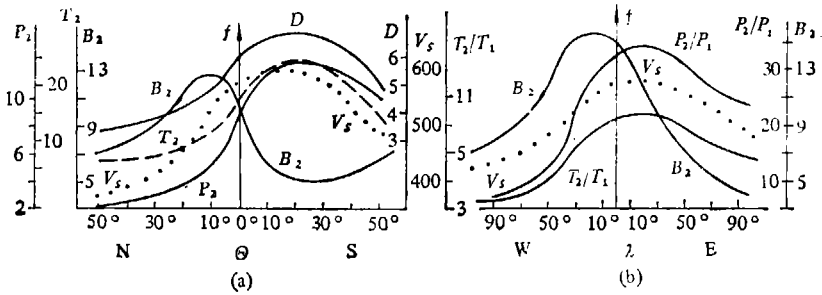


图 2 激波面后物理参数随相对耀斑法线的纬度  $\theta$  ((a)图)和经度  $\lambda$  ((b)图)

的非对称分布(单位:  $V_s$ ——km/s,  $P_2$ —— $\times 10^{-12}$ N/cm<sup>2</sup>,  $D = \sqrt{\rho_2 V_s^2}$ —— $\times 10^{-3}$ ( $10^{-7}$ J/cm<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup>,  $T$ —— $\times 10^5$ K,  $B$ —— $\gamma$ )

西北部则弱于它们;磁场的分布则与动力学参数的分布正相反,东南部的磁场弱于西北部。这表明就平均而言,耀斑-激波的传播及其结构具有东西不对称性和南北不对称性。而这正是根据图 1 所揭示的基本物理内含。

### 三、空间卫星观测数据的统计研究

这里介绍 1965-1977 年间  $\geq 2$  级耀斑之后太阳风扰动的多卫星测量结果的分析。太阳风速数据取自 Pioneer 6, 7, 9, Vela 3, 4, 5 和 NSSDC-73-08, 耀斑数据取自世界资料 A 中心发表的太阳-地球物理资料 (S.G.D)。

#### 1. 数据采样与统计检验

选取  $\geq 2$  级耀斑和太阳风速数据比较完整的事件;所选耀斑发生前后四天内无其它  $\geq 2$  级耀斑发生的这种孤立耀斑事件;排除太阳背面可能发生的耀斑事件的影响,即只挑选飞船位于经度  $\phi_s \leq \pm \frac{1}{2} (90^\circ \pm |\phi_f|)$  内所观测到的事件 ( $\phi_s$ ——飞船和耀斑之间的经度差,飞船于耀斑之东为正,反之为负,  $\phi_f$ ——耀斑的日面经度);耀斑发生前两天的太阳风速  $< 500$  km/s。符合上述全部标准的样本共 156 个。对这样一组较好的统计样本采用时间迭加法研究扰动传播速度与耀斑经度的统计平均关系。对统计结果的平均值和极大值进行了严格的统计检验,置信概率  $> 95\%$ , 置信估计分别按下式

$$\bar{V}_n \pm t_{\alpha} s / \sqrt{n-1},$$

$$V_K \pm t_{\alpha} s / \sqrt{K(n-2) / [n-K-K(\bar{V}_K - \bar{V}_n)/s]}$$

进行。式中随机变量  $t$  遵循自由度为  $n-2$  的学生式  $t$  分布,  $\bar{V}_n$  是全部  $n$  个数据的平均值,  $\bar{V}_K$  为最大太阳风速的  $K$  个采样平均。

#### 2. 统计结果

按不同耀斑经度分区,对多卫星观测的太阳风速进行时间迭加法研究。为精简起见,将所得结果给在用极坐标表示的图 3 中,  $T$  为渡越时间,  $\bar{V}$  为平均速度。由图看到: ①耀斑发生后太阳风速明显增加 ( $V_0 \approx 420$  km/s); ②耀斑位于日面西边 ( $0^\circ-60^\circ W$ )、( $60^\circ-90^\circ W$ ) 和东边 ( $0^\circ-60^\circ E$ )、( $60^\circ-90^\circ E$ ) 时分别于第 2 天、第 3 天和第 3 天、第 3.5 天观测到极大风速。

这个结果表明,大耀斑之后太阳风扰动的传播相对于耀斑法线方向而言,平均讲向东比向西快,最快方向偏向行星际螺旋形磁场一边,耀斑所引起的太阳风扰动是非对称传播。章公亮等人<sup>[11]</sup>曾对 1966—1978 年间 387 个  $\geq 2$  级太阳耀斑所引起的太阳风扰动进行过统计研究,得到的结论与图 3 基本一致。对不同时间、不同数据来源和不同的采样标准与处理方法,均得到一致的结论,这表明耀斑-激波的非对称传播是它的一种平均属性。

#### 四、对 1975—1982 年间行星际闪烁观测的分析研究

本世纪七十年代中期,由于 IPS 观测技术的发展,人们开始尝试利用这种观测来了解黄道面以外空间耀斑-激波的三维传播特征<sup>[1,17,18]</sup>。下面我们进一步给出一些新的有意义的结果并加以说明。

##### 1. 数据分析中的二个问题

IPS 数据的处理是比较困难的,要用它来研究耀斑-激波的三维传播特征有两个问题需慎重对待,否则会一事无成。

首先,如何选取观测参数才能使最后结果可靠性高? 由于 IPS 观测得到的太阳风速  $V$  以及激波到达时间  $T$  有较大误差,而传播距离  $R$  误差较小,决定激波传播基本特征的物理量——激波能量  $E$ , (单位立体角)的计算对  $V$  很灵敏,而对  $T, R$  则次之。选取  $R, T$  为基本参量,则可避开 IPS 观测的最大弱点; 其二,如何恰当考虑激波传播的动力学效应对观测数据的影响? 由于不同射电源的 IPS 观测是在不同方位、不同时间和不同距离上进行的,要研究激波的三维传播特征,必须把不同时刻的观测点组织到同一时刻的同一激波面上去,这里背景太阳风的各向异性流动以及不同能量、不同距离和不同背景速度时,具有不同的减速过程都将给激波传播以重要影响。因此这两种重要的动力学效应必须从数据中予以改正,才能得到较好反映实际状况的三维传播特征。我们采用能较好解释观测结果和这两种动力学效应的激波模型<sup>[19]</sup>,对所有 IPS 观测数据进行了传播效应的改正(沉长的数学公式在这里略去)。

##### 2. 事例介绍(根据美国的 IPS 观测)

图 4 给出 8 个由 IPS 观测所得到的耀斑-激波事件,箭头到太阳的距离代表本文得到的激波传播距离  $R(T = 55\text{h}, V_0 = 400\text{km/s})$ , 锁线为估计的激波面,虚线 ( $f$ ) 为耀斑法线方向,  $s$  为太阳赤道。为比较起见,实心圆点到太阳的距离是按文献[1]方法得到的平均速度。由图 4 看出:

① 80% 以上的耀斑激波 (63 个事例) 都是相对耀斑法线方向为非对称传播,无论是在纬度还是经度方面;

② 传播的纬度范围比经度范围小很多;

③ 若按文献[1]的平均速度(实心圆点)来估计激波面(图中未画出)则过于窄小,速度梯度太大 ( $8-15\text{km/s}$ ),这意味着经度差  $\approx 30^\circ$ , 速度差将为  $240-450\text{km/s}$ 。那末,当耀斑与日地连线相差  $20^\circ-30^\circ$  以上时,地球附近一般观测不到激波和地球物理效应,这与实际观测相

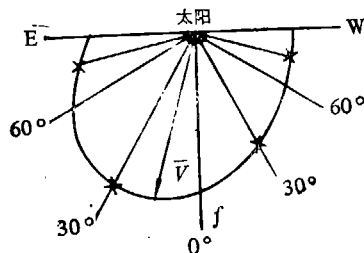


图 3 耀斑-激波平均传播速度  $\bar{V} (= R/T)$  的东西不对称性极图

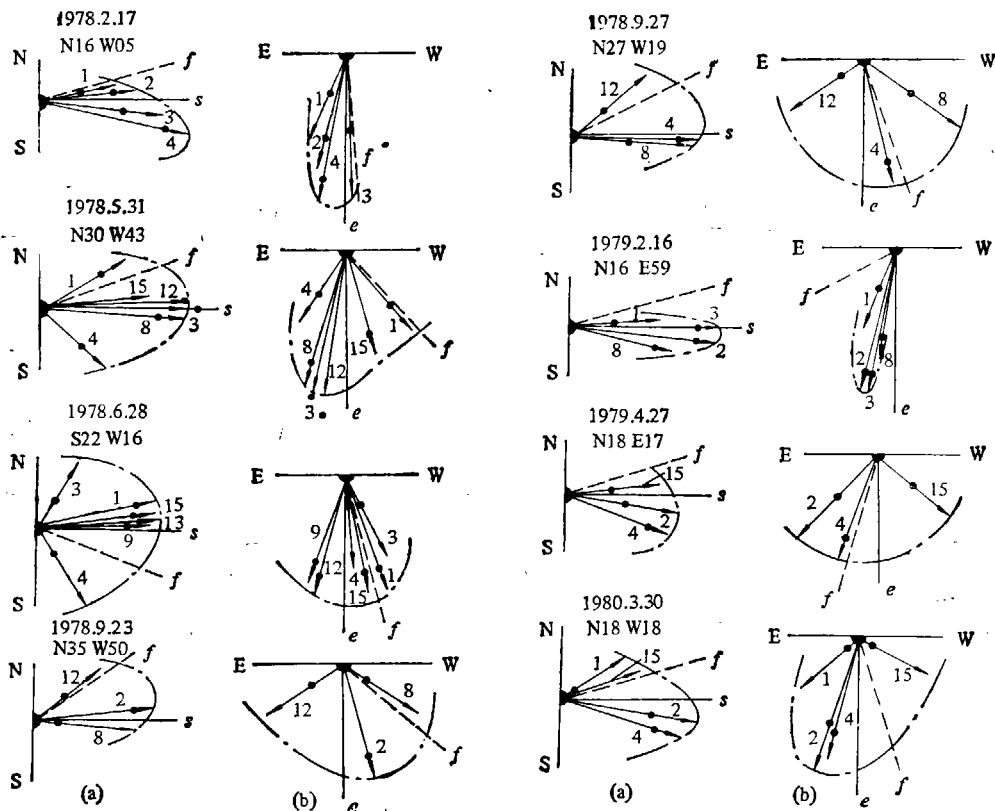


图4 耀斑-激波传播距离  $R$ : (a) 子午面内, (b) 黄道面内

(箭头为本文结果, 圆点为文献[1]结果, 锁线为估计的激波面.)

$f$ ——耀斑法线,  $s$ ——太阳赤道,  $e$ ——日地联线方向.

射电源代号:

1——3C48, 2——3C144, 3——3C147, 4——3C161,

5——3C196, 6——3C216, 7——3C222, 8——3C237,

9——3C273, 10——3C283, 11——3C295, 12——3C298,

13——3C409, 14——3C446, 15——3C459)

差太远!

### 3. 耀斑-激波传播的三维曲面

在分析美国 63 个 IPS 耀斑-激波的基础上得到了激波传播的三维拟合曲面。为节省篇幅起见, 这里只给出激波能量的拟合结果。结果表明, 相对耀斑法线方向而言, 激波东南部的能量  $E$ , 约为西北部的 2 倍左右, 极值点位于  $\theta_M = -18.5^\circ$ ,  $\lambda_M = -27.5^\circ$ , 具有明显的非对称性。由此而决定了传播距离  $R$ , 传播速度  $V$ , 等亦有类似的不对称性。激波能量中的这种不对称性足以引起地球物理效应中的不对称性发生。

对日本的 85 个耀斑-激波的 IPS 观测结果进行统计研究, 也得到很类似的结果, 这里不再介绍<sup>[20]</sup>。

应予指出的是, 等离子体流动的效应已在数据中进行了基本的改正, 因而上述非对称性主要反映的是激波传播过程中比较稳定的非随机性磁场位形, 以及有关的物理过程方面的信息,

它为发展非对称激波传播理论提供了有意义的基础,从下节的介绍可看出这点。

#### 4. 耀斑-激波的三维传播特征与太阳磁结构的可能联系

这里仅举 1979 年 2 月 16 日(N16°, E59°)耀斑-激波的 IPS 观测结果为例(图 5),该耀斑位于复杂的黑子磁场与冕洞的半包围之中,唯有其西南方向无重要磁结构存在。据此预期

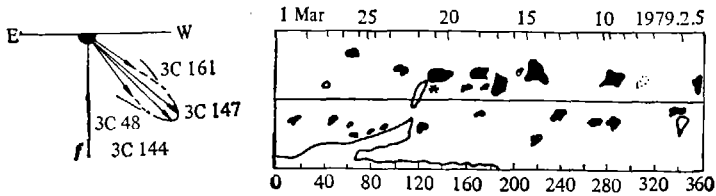


图 5 1979 年 2 月 16 日耀斑(\*号)发生时日面黑子(黑斑块)、冕洞(细实线,右)和该耀斑激波传播(左)示意图

激波主要是向西南方向空间传播,这与处理观测数据后所得到的结果基本一致。类似例子甚多,这里不再例举。从这里可以看到,耀斑-激波的三维传播特征将会受到太阳活动区、冕洞磁场结构等的调制,其间的可能关系值得进一步深究。

综合上述研究我们看到,根据不同的现象、不同的资料来源和不同的研究方法,均得到基本一致的物理结论。在此基础上,我们从统计研究的角度提出关于耀斑-激波在行星际空间非对称传播的三维物理模型,示意于图 6。该模型要点是:传播速度具有东西、南北非对称性,激波之东南部比其西北部传播得快;激波后动力学参数( $V$ ,  $P$ ,  $T$ ,  $N$ ,  $\beta$ )等是激波东南部

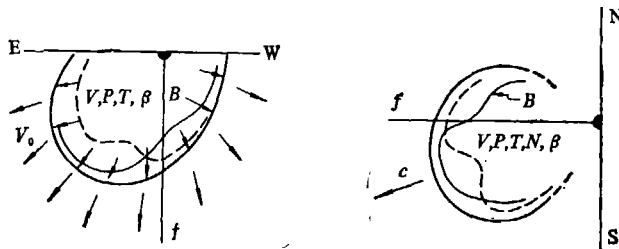


图 6 一种可能的非对称传播的三维耀斑-激波模型  
(左:黄道面,右:子午面。c——日球电流片)

高于其西北部;激波面后磁场具有与动力学参数正相反的非对称性分布;激波东南部的能量为西北部的 $\approx 2$ 倍;激波的横向传播亦是是非对称的;传播的纬度范围远小于经度范围;激波的非对称传播可能与太阳活动区、冕洞磁结构以及行星际各种尺度结构有密切关系。图中各种分布曲线到波面的距离示意取值大小,波面虚线表示可能不再是激波面的一部分。

### 五、太阳耀斑之后若干重要地球物理效应的非对称性分布

众所周知,太阳耀斑之后常常由于它所引起的行星际激波扫过地球而引起地球环境的急剧变化,这些变化常可通过地磁  $K_p$ ,  $A_p$ ,  $D_{st}$  和 AE 等指数,宇宙线 Forbush 下降、太阳风-磁层能量耦合函数  $\epsilon$  以及电离层扰动和大气湍流指数等来描述。鉴于它们在日地关系研究中的重要性,人们对这些耀斑效应进行了广泛而持久的研究<sup>[10-16]</sup>。这里给出一些有代表性的结

果于图 7 中。为说明这些现象与本文激波模型的关系,图中也给出了模型的一些结果,  $V_s$ ,  $B$ , 和  $\sqrt{\rho_s V_s^2}$ 。图 7 很直观地告诉我们: 耀斑-地球物理效应中的非对称性,主要来源于耀斑-激波

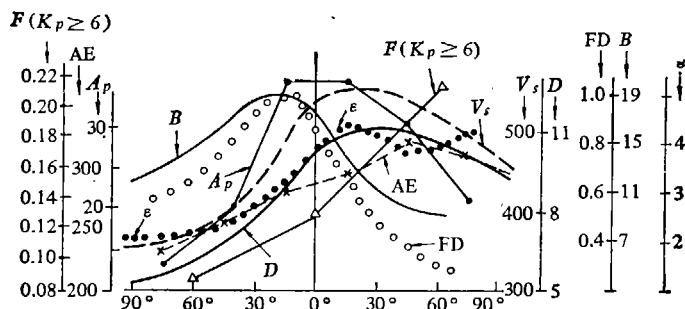


图 7 耀斑-地球物理效应的东西不对称性分布的解释  
(单位:  $\varepsilon$ —— $\times 10^{11}$  J/s, 其余参数同 2 图)

本身的三维结构的非对称性。磁场的非对称性分布将主要影响受磁场控制的现象, 如宇宙线 Forbush 下降现象 (FD)。动力学参数分布的非对称性将主要影响受能量传输过程控制的现象, 如地球磁暴过程 ( $F(K_p \geq 6)$ 、 $A_p$  和 AE) 和能量耦合函数  $\varepsilon$  等。由于本文模型能自然而统一地解释耀斑-地球物理效应, 运用它于耀斑-地球物理效应的预报, 已获初步成功<sup>[4]</sup>。

## 六、讨 论

1. 耀斑-激波的非对称传播是它的一种统计平均特性。基本原因在于日球空间的传播条件, 无论是太阳风等离子体的流动还是各种磁结构, 和发生于其中的各种物理过程, 往往对于耀斑法线方向讲都不是对称的, 它们都将在一定的程度上影响激波的传播。激波传播最快方向在纬度和经度上分别趋向平均电流片方向和行星际螺旋形磁场方向。一种可能的解释是, 太阳双极冕洞所形成的磁场位形, 可能产生一种非径向力有利于激波向电流片(磁中性区域)附近膨胀。新近对 2—4 个太阳半径处的日冕物质抛射事件的分析表明, 抛射的物质偏离径向往赤道低纬方向运动, 这是对本文结果的新支持。沿行星际磁场方向传播的激波将具有准平行激波的性质, 虽然 1AU 附近磁能远小于动能, 但考虑到各种输运过程和磁流波做功等过程相对磁场方向各向异性的累集效应, 可能有利于往行星际磁场方向偏转。自然, 上述看法只是一种初步猜想, 有待深入探讨;

2. 本文的模型主要适合于强激波(或大扰动), 因为动力学传播改正的数学模型是使用小参数  $y = V_0/V_s$ ;

3. 本文仅限于从统计研究的角度去了解耀斑-激波的三维传播特性, 所用的样本数尚显不足。还有待于进一步发展非对称激波传播的动力学理论, 去深入揭示其非对称传播的物理本质。

## 参 考 文 献

- [1] Pintér, S., *Space Sci. Rev.*, **32**(1982), 145.
- [2] Dryer, M., *ibid.*, **17**(1975), 277.
- [3] Hundhausen, A. J., *Coronal Expansion and Solar Wind* (中译本: 日冕膨胀和太阳风, 魏奉思译, 1985, 科学出版社), Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1972.

- [4] Ogilvie, K. W. and Burlaga, L. F., *Solar Phys.*, **8**(1969), 422.
- [5] Hirshberg, J., *Planetary Space Sci.*, **16**(1968), 309.
- [6] Sakurai, K., *Nature Phys. Sci.*, **246**(1973), 72.
- [7] 魏奉思、严健萍, 中国空间物理第二次学术会议文集, 1978, 31.
- [8] 魏奉思, 地球物理学报, **23**(1980), 1.
- [9] 魏奉思、杨光、章公亮, 天体物理学报, **5**(1985), 214.
- [10] 章公亮, 地球物理学报, **12**(1963), 32.
- [11] 章公亮, 中国科学 A 辑, 1984, 254.
- [12] Mead, K., *J. G. R.*, **69**(1964), 1181.
- [13] Akasofu, S.-I. and Yoshida, S., *Planet. Space Sci.*, **15**(1967), 39.
- [14] Baronch, E. and Burlaga, L. F., *J. G. R.*, **80**(1975), 449.
- [15] Lockwood, J. A. and Webber, W. R., *ibid.*, **82**(1977), 1906.
- [16] 魏奉思, 地球物理学报, **27**(1984), 417.
- [17] Kakinuma, T. and Watanabe, T., *Space Sci. Rev.*, **19**(1976), 611.
- [18] Richett, B. J., *Solar Phys.*, **43**(1975), 237.
- [19] 魏奉思, 空间科学学报, **2**(1982), 63.
- [20] 魏奉思, 空间科学学报, **6**(1986), 76.