

# 日地系统扰动多层次综合研究

章公亮

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

**[摘要]** 本文介绍对日地系统扰动多层次综合研究所取得的最新成果;分析了磁暴形态类型对行星际扰动结构,包括激波、高密度结构、强磁场结构、高速流等的响应特征;讨论了磁暴主相形成、延迟和消隐,及初相形成的条件;发现了行星际强磁场膨胀结构的动力学效应,及新的亚阿尔文波速流事例。

**[关键词]** 日地系统扰动,磁暴形态类型,行星际扰动结构,行星际磁膨胀结构,行星际亚阿尔文波速流

## 引言

太阳扰动等离子体输出引起的日地系统扰动,是日地能量传输过程研究的中心问题。这是一项涉及太阳、行星际、地球磁层、电离层等空间多层次的综合性研究课题,目前已积累了浩如烟海的地面和空间观测资料,并且进行了大量的研究。但研究工作者往往局限于某一空间层次的现象的研究。日地物理进一步发展,要求科学工作者摆脱单层次研究的局限性,进行日地扰动多层次甚至全过程研究,只有这样才能建立日地扰动及其对空间环境影响的物理预报模式,但目前很少有人能做到这一点。

作者于国际地球物理年(1957—1958)开始研究磁暴,就注意把磁暴形态与太阳活动联系起来进行研究,导致发现日地扰动中的不对称现象。80年代以来,作者在中国科学院基金项目“日球扰动和太阳活动”和“太阳22周峰年日地系统整体行为研究”,国家自然科学基金项目“磁暴类型预报方法研究”、“行星际扰动结构类型”、“若干特殊类型日冕物质抛射事件研究”以及在研的重大基金项目“日地系统能量传输过程的研究”第7子课题“日地系统扰动事件综合观测和研究”等的资助下,不断扩大研究的空间层次,力图形成多层次研究的体系。这种研究既要对不同层次的主要现象进行一定深度的研究,但又不拘泥于某一层次现象的细节,而把研究的重点放在决定不同层次之间联系的基本规律,力求对扰动全过程有一完整了解并有所发现。本文通过典型事例的分析,介绍若干最新的成果。限于篇幅,本文只讨论磁暴类型对行星际扰动组合结构的响应、行星际磁膨胀结构和亚阿尔文波速流。有关冕洞起源的日地共转扰动的似稳结构研究成果的综述请参看文献[1]。本文涉及的物理量:太阳风速 $V$ 和密度 $n$ ,行星际磁场强度 $B$ 及其相对于黄道面的倾角 $\theta$ ,磁暴主相环电流 $Dst$ 指

国家自然科学基金资助项目。

本文于1996年3月4日收到。

数, 太阳风热压力  $P$  和磁压力  $P_m$ , 阿尔文波速  $C_a$ , 磁能相对于动能和磁压力的比值  $\mu_k$  和  $\mu_p$ 。

## 1 磁暴类型对行星际扰动组合结构的响应

在众多空间扰动现象中, 地球磁暴反应最为灵敏, 也最易观测, 可以作为行星际太阳风扰动输入地球空间系统的重要标志。自 70 年代中期起, 开始有人注意从现象相关上研究太阳风与地球磁层的能量耦合, 但大都只注意行星际介质的单一参数, 如行星际磁场南向分量、或太阳风速与地磁指数之间的相关。有的即使考虑了多种参数, 设计了能量耦合函数, 但既未注意行星际扰动是特定结构的有规律的组合, 也未注意地磁扰动形态类型的特征差异。

我们的工作两个方面与国外的研究有所差异: 其一是提出了地球磁暴的类型分类<sup>[2]</sup>。与传统的强度分类不同, 考虑了包括强度在内的形态特征, 即根据初相和主相这两个基本过程的关系来进行分类。下面的讨论将能说明, 强度相近的扰动的形态特征可能是不一样的。这种形态特征的差别是不同的行星际扰动结构所引起的, 单纯的强度分类无法反映行星际扰动特征。其二是提出了行星际结构组合结构的新思想, 这就是到达地球的行星际扰动是由起源不同、特征各异的扰动结构(如激波、高密度结构、强磁场结构、高速流等)相互作用和演化而成的复合体, 简称为组合结构。个别的结构可以单独出现, 也可以与别的结构以不同方式进行组合, 这种组合结构是多种太阳扰动源产生的等离子体, 各按特定的规律在日地空间演化和相互作用的结果。不同方式组合的行星际扰动结构作用于地球磁层引起了地球磁暴形态类型的差异, 反映着不同的行星际扰动能量、质量和动量输入磁层的过程。以行星际组合结构的复杂多样性为出发点, 向上追溯到它们的太阳起源, 向下跟踪至地球空间系统, 就有可能形成具有特色的研究日地系统扰动全过程的体系。

(1) 磁暴强主相的形成与延迟。关于磁暴主相形成的条件, 我们的工作说明, 只有当南向磁场结构尺度足够大时, 才能引起磁暴强主相, 而强主相的出现则与大尺度磁场的旋转方向有关。

(2) 磁暴初相的起源。对初相的起源, 国外文献通常认为是太阳风动压力的增强压缩磁层引起的。但动压力包括风速和密度两个参数, 高速流与背景太阳风相互作用能引起其前沿密度增强, 但尺度很小, 所引起的初相并不显著。我们的研究说明, 尽管行星际大尺度高密度结构的速度可能并不高, 但密度可以成倍增长, 是形成动压增强的主要行星际结构。

(3) 磁暴强主相的消隐。初相和主相是两个有联系但又可以独立存在的过程。重现性磁扰的初相特征不明显是众所周知的。我们的研究说明, 在一定的行星际条件下, 可以形成只有初相而主相特征不明显的‘不完整’磁暴。图 1 左说明, 磁场不强的低速高密度结构独立出现时, 引起的地磁扰动特征是急始后初相持续时间长, 但无相应的强主相。图 1 右是行星际强激波追赶高密度结构的事例。激波后的高密度和强磁场结构尺度都很小, 引起变幅很大的急始, 但相应的初相和主相特征均不明显, 它属于强急始脉冲型地磁扰动。激波只能给出地磁扰动开始的时间, 不能决定磁扰的强度。因此, 通过行星际激波预报地磁扰动强度的观点在物理上是难以成立的。

## 2 行星际磁膨胀结构及亚阿尔文波速流

强磁场结构是引起磁暴的重要行星际扰动结构。我们分析了与不同类型磁扰相对应的行

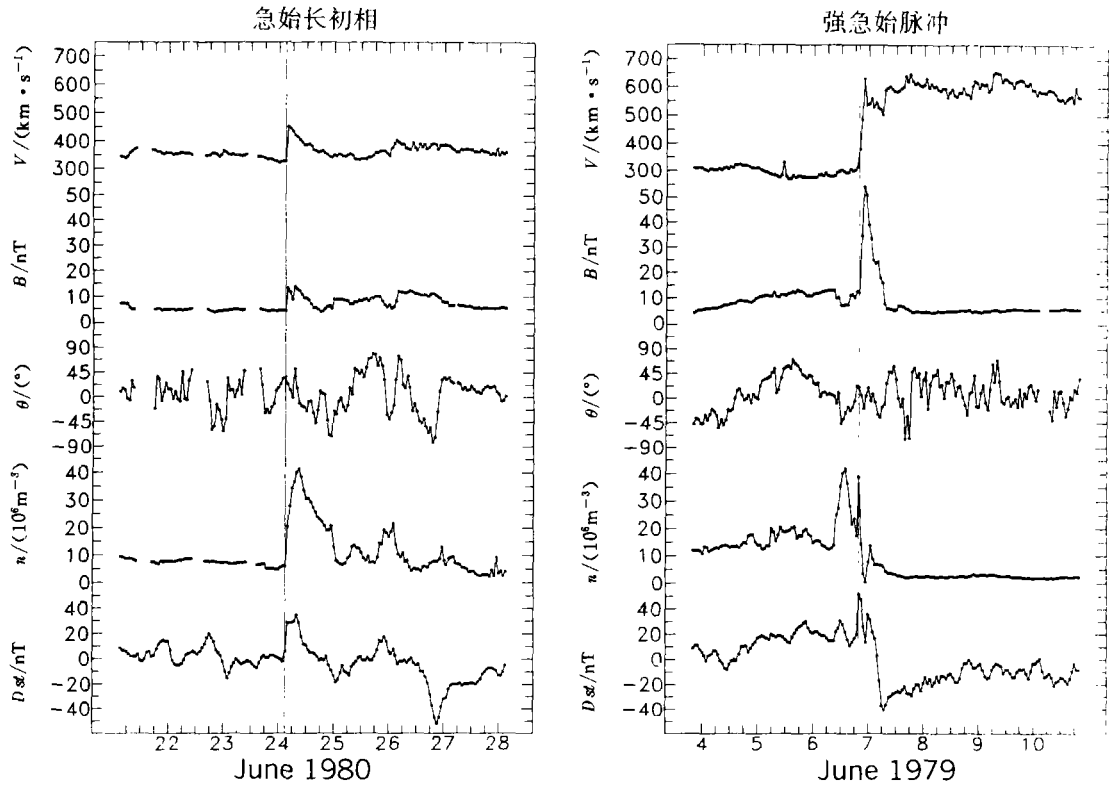


图1 磁暴初相的形成与主相的消逝. 竖线表出磁暴急始及对应的行星际激波出现时间

星际强磁场结构的磁流体动力学特征, 及它与其它结构的相互作用和组合方式。在强磁场膨胀效应和亚阿尔文波速流等两方面有新的发现, 对太阳风理论提出了若干重要的新问题。

### 2.1 行星际强磁场膨胀结构

太阳风起因的经典理论是 Parker 的热膨胀理论。这种理论能很好地说明低速太阳风的特征, 但在解释高速流的成因问题上遇到了困难。关于瞬变太阳风的起因, 在相当长时间内未能摆脱热压力脉冲引起的爆炸波的传统观点束缚, 到现在仍未有统一的看法。作者在长期研究太阳行星际扰动时, 形成了太阳瞬变等离子体输出的磁膨胀的模式<sup>[4]</sup>。这个模式的提出是建立在对太阳-行星际扰动所作的系统研究基础上的, 它概括了作者发现的一系列现象规律及数值模拟结果<sup>[4]</sup>。其中, 行星际强磁场结构的膨胀效应是重要的观测证据。所谓磁膨胀是指只有磁场异常增强, 而无相关的热能和动能同时增强的一种 MHD 过程。磁膨胀与众所周知的热膨胀不同, 是一种由新的磁通量出现所引起的磁流体力学慢过程, 可以用磁能相对于动能和磁压力的比值  $\mu_k$  和  $\mu_p$  这两个无量纲参数的异常增高, 来识别磁膨胀形成的行星际结构<sup>[4]</sup>。

图 2 给出行星际强磁场膨胀结构与太阳风流相互作用的两个例子。可以看到, 强磁场结构内部磁压力远大于热压力, 无量纲能量比  $\mu_k$  异常增高, 它能向前、后两方向膨胀。前部磁压力的负梯度能加速前方太阳风, 而后部的磁压力正梯度则能对后随太阳风进行减速。左图是强磁云追赶前方太阳风流的典型事例, 它驱动出双锯齿状流速位形。右图是组合结构的典型事件<sup>[5]</sup>。它包括激波、强磁场结构、电流片、高密度结构和高速流等多种行星际扰动结构。膨胀强磁场结构为后随高速太阳风流追赶, 通过相互作用形成流速巨大落差, 驱动出双台阶

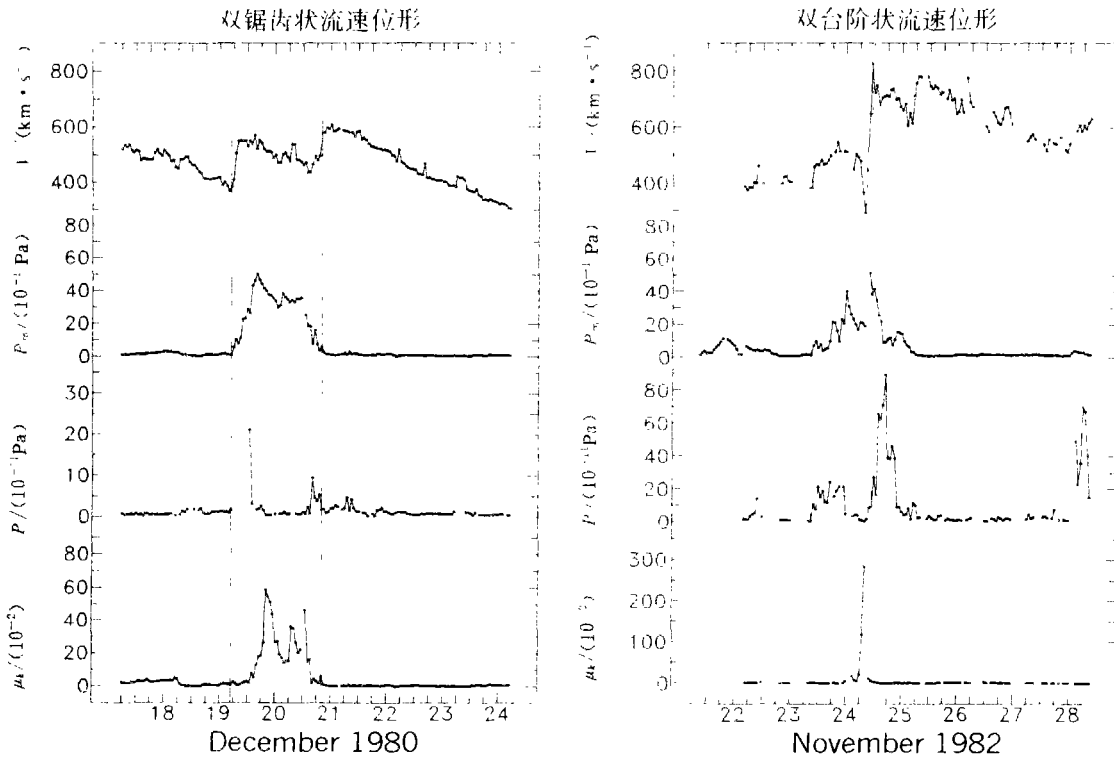


图2 行星际强磁场结构的动力学效应。两竖线之间为磁膨胀区

状流速位形。这种对观测现象的物理推论已为数值模拟证明<sup>[4]</sup>。

## 2.2 行星际亚阿尔文波速流

根据理论,太阳风必须是超磁声速,即超阿尔文波速流。绝大多数的行星际观测是符合理论预测的。1982年曾有报道,在行星际空间观测到低速太阳风中的亚阿尔文波速流的两个例子,这是经典太阳风理论无法解释的。为研究其起因,还需要寻找更多的事例,并弄清其出现规律,但此后研究工作无新的进展。行星际强磁场结构是一种低温、低密度结构,有较高的阿尔文波速,它的阿尔文马赫数  $Ma$  比背景太阳风低。图2的例子说明了这种情况。由于  $\mu_k = Ma^{-2}$ ,  $Ma \leq 1$  与  $\mu_k \geq 1$  是等价的。宁静太阳风的  $Ma$  和  $\mu_k$  的量级分别为 10 和  $10^{-2}$ 。在 1980 年 12 月 19 日事件中,  $\mu_k$  高达 0.6, 相当于  $Ma$  略大于 1。1982 年 11 月 23 日事件是强磁场结构中的亚阿尔文波速流的例子<sup>[5]</sup>, 在强磁场结构的后部  $\mu_k$  最高值接近 3, 流速最低值为 291 km/s, 相当于  $Ma$  跌落至 0.59。这是又一起低速流中亚阿尔文波速流的例子。

鉴于亚阿尔文波速流在理论上的重要性,我们进行了跟踪研究,意外地发现图1的1979年6月6日行星际强激波事件也出现亚阿尔文波速流。这是高速流中的亚阿尔文波速流的首例。从图3左可以看到,强激波后亚阿尔文波速竟达到 2043 km/s 的难以想象的极高值,在通常情况下它不大于  $10^2$  km/s。当时的太阳风速仍高达 538 km/s, 但亚阿尔文马赫数已跌落至 0.26。此波速异常区也是强磁场膨胀区,磁能相对值惊人的高。磁压为热压的 300 倍,磁能竟是动能的 15 倍。在通常情况下,磁压与热压为同一量级,磁能只有动能的百分之一。

值得注意的是,此亚阿尔文波速流具有太阳自转会合周期( $\sim 27.3$ 天)的重现性,即它

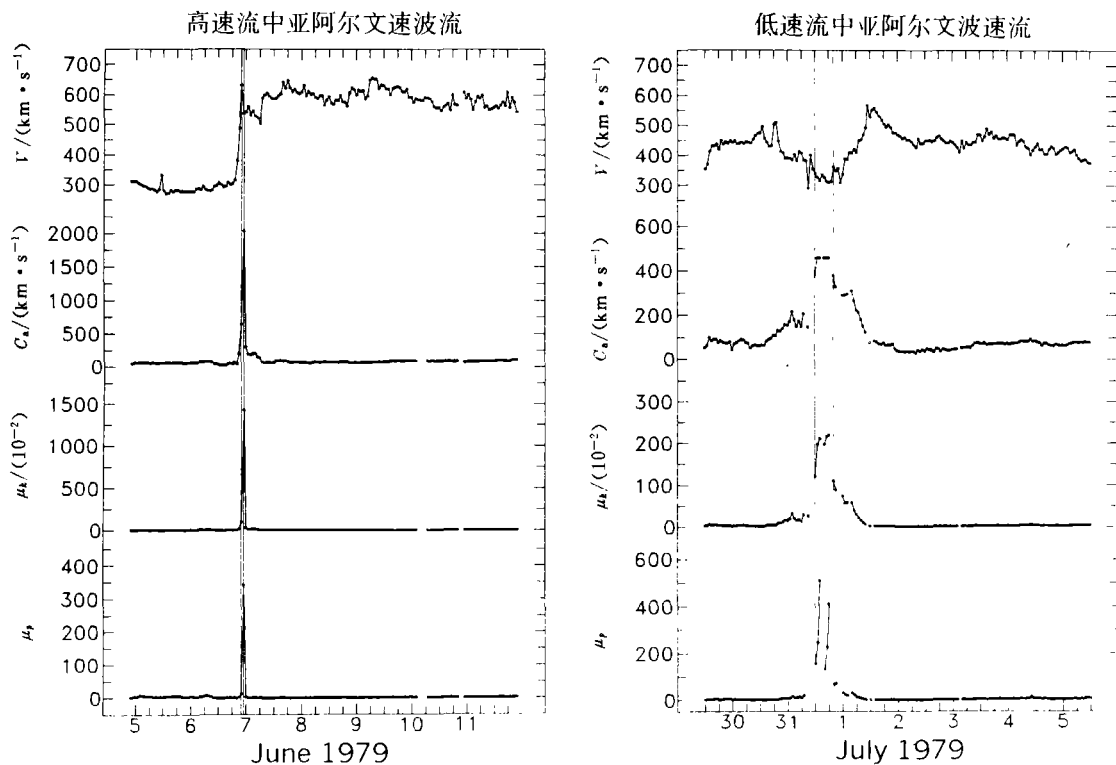


图3 行星际亚阿尔文波流. 两竖线之间为亚阿尔文波速流区

在7月4日和31日再次出现。图3右给出55天后的情况, 可以看到, 尽管未出现强激波, 太阳风速也很低, 但  $\mu_p$ ,  $\mu_k$  和  $C_a$  仍有异常增强, 从而再次形成亚阿尔文波速流。在此异常区内, 磁场扰动均方差很小, 方向几乎在黄道面内。此重现亚阿尔文波速流, 是与磁场在黄道面内的准静态低速太阳风相联系的。

### 3 结论

我们对日地扰动的多层次综合研究已取得如下结果:

- (1) 阐明了磁暴形态类型对行星际扰动组合结构响应的基本规律。
- (2) 发现了行星际强磁场膨胀的观测证据。
- (3) 发现了多起新的行星际亚阿尔文波速流。

### 参 考 文 献

- [1] 章公亮. 日地共转扰动似稳结构及瞬变扰动的不对称性. 自然科学进展, 1996, 6 (4).
- [2] 章公亮. 磁扰的 Kp 类型与耀斑活动. 地球物理学报, 1982, 25 (1): 10.
- [3] Zhang G L, Gao Y F. The Morphology of Geomagnetic Disturbance in Transient Plasma Output, in COSPAR Colloquia Ser. 5, Pergamon Press, Oxford, 1993, 93.
- [4] Zhang G L. Magnetic Expansion: The Basic Characteristics of Strong Solar Transient Plasma Output, in COSPAR Colloquia Ser. 5, Pergamon Press, Oxford, 1993, 93.
- [5] 章公亮. 行星际强磁场结构中的亚阿尔文波速流. 空间科学学报, 1996, 16 (2): 85.

## A COMPREHENSIVE MULTI-REGION STUDY OF SOLAR-TERRESTRIAL DISTURBANCES

Zhang Gongliang

(Center for Space Science and Applied Research, CAS, Beijing 100080)

**Abstract** Presented in this paper are new results obtained through a comprehensive multi-region study of solar-terrestrial disturbances. The response of the morphological category of geomagnetic storms to interplanetary disturbance structures is analyzed, which includes the shock, the high density structure and the strong magnetic field structure, as well as the high-speed stream. The discussion involves interplanetary conditions for the formation, delay, and disappearance of strong main phase, and for the formation of initial phase. Observational evidences are found for the dynamic effect derived by an expanding interplanetary structure with strong magnetic field. Also found are new examples of the interplanetary sub-Alfvénic flow.

**Key words** solar-terrestrial disturbance, morphological category of geomagnetic storm, interplanetary disturbance structure, expanding interplanetary magnetic field structure, interplanetary sub-Alfvénic flow

---

### 国家自然科学基金委员会副主任王乃彦简介



**副主任：王乃彦 研究员 中国科学院院士**

1935年出生，1956年毕业于北京大学技术物理系。1959—1965年在原苏联杜布纳联合核子研究所工作。1985—1986年在日本名古屋大学等离子体物理研究所任客座研究员。现任中国核工业总公司科技委副主任，中国核工业研究生部主任，中国原子能科学研究院研究员，国家863计划“惯性约束聚变”主题专家组成员，国务院学位委员会委员，中国核学会副理事长，中国物理学会常务理事，国际原子能机构聚变委员会委员，美国物理学会会员，日本核聚变与等离子体物理学协会会员。

1997年起任国家自然科学基金委员会副主任。

专业：核物理、核聚变与等离子体物理、激光技术和物理。长期致力于惯性约束聚变研究。先后从事过强流电子束的产生、输运及其与物质的相互作用、粒子束聚变、氟化氦激光反应动力学、氟化氦激光聚变驱动器等研究工作。