

# 磁层亚暴面临的难题及研究方向

刘振兴\*

濮祖荫

沈超

(空间中心 北京 100080) (北京大学 北京 100871) (空间中心 北京 100080)

**摘要** 文章就磁层亚暴研究中遇到的问题,包括对其整体过程,行星际磁场南北方向分量的起源,对行星际条件影响的定量关系,太阳风驱动过程,膨胀相触发区的位置,以及与磁暴的关系等作了叙述。同时,作者还指出了今后的研究方向。

**关键词** 磁层亚暴,整体过程,研究方向

## 1 引言

磁层亚暴是磁层中能量储存、释放和耗散的瞬变活动,它的发生和发展涉及日地系统的整体过程,包括太阳瞬变事件在行星际空间中的表现形式,太阳风和行星际磁场与磁层的相互作用以及磁层、电离层和上层大气的耦合过程等。近 40 年来,磁层亚暴一直是日地空间物理中最核心的科学问题之一。磁层亚暴包括极光亚暴、电离层亚暴、磁亚暴和热层亚暴,可引起地球空间环境(磁层电离层和上、中层大气)的剧烈扰动,包括:磁层中各种类型的粒子事件(亚暴粒子注入事件,电离层上行离子事件,辐射带粒子变化和环电流粒子变化等),电离层暴和电离层骚扰及热层结构变化等。这些扰动,对空间活动、地面技术系统和人类生存环境有重要的影响。

近 40 年来,国际上曾对磁层亚暴进行了大量的地面观测和卫星探测,对磁层亚暴现象已有大致的了解。到目前为止,先后提出了各种磁层亚暴模式,如近地中性线(NENL)模式,近地电流中断(CD)模式,边界层模式,热灾变模式,磁层-电离层耦合(M-I-C)模式及近地位形(结构)不稳定模型等。这些模式都不能完整地解释磁层亚暴的各种现象。近年来,一些新的观测数据对磁层亚暴理论提出了新的质疑,过去较流行的近地中性线模型面临着严峻的挑战。当前对磁层亚暴的论战,又掀起了新的高潮,预期磁层亚暴研究将会取得突破性的进展。

## 2 磁层亚暴面临的难题

### 2.1 磁层亚暴的整体过程

过去的亚暴模型,只从局部现象和物理过程考虑,因而不能解释亚暴发生和发展的全过程。磁层亚暴的发生和发展涉及日地系统的整体过程及宏观和微观的相互作用过程,包括:太阳瞬变事件对行星际磁场(IMF)和太阳风结构的影响,IMF 和太阳风条件对磁层亚暴和磁暴发生和发展的影响过程,近、中、远磁层等离子体片结构和动力学与磁层亚暴发生和发展的关系,磁层、电离层和热层的耦合过程,以及等离子体片中的微观和宏观不稳定性等。要全面了解

\* 中国科学院院士

收稿日期:1998 年 1 月 26 日

磁层亚暴的发生和发展过程,应将这些过程有机地联系起来。

## 2.2 行星际磁场南北方向分量的起源

大量观测事实表明,产生磁层亚暴的主要因素是 IMF 南向分量( $B_s$ )和太阳风速度( $V_s$ )。 $B_s$  和  $V_s$  的大小和持续时间,决定着磁层亚暴和磁暴的强弱的类型。目前对 IMF 南向分量产生的原因及南北分量转化的过程还很不了解,这可说是研究磁层亚暴发生过程的首要问题。

观测结果表明,IMF 南向分量具有不同的时间尺度和强度,而不同时间尺度和强度的 IMF 南向分量结构的形成原因是不同的。总的来说,IMF 南向分量主要是由以下因素产生的:

(1)行星际激波效应,如行星际激波加强了原已存在的南向分量及行星际激波扫过行星际电流片时引起的强的南北分量等。

(2)日冕物质抛射事件(CME)和磁云效应。CME 往往会产生行星际激波和大尺度的磁云,磁云可产生强度较大和持续时间长的 IMF 南北分量。行星际电流片中的磁场重联,可产生不同时间尺度的等离子体团(磁云),这种等离子体团可产生不同时间尺度的 IMF 南北分量。

(3)行星际中的波动和湍流效应。行星际空间中的波动和湍流,有时可产生大振幅的和持续时间较长的 IMF 南北分量起伏,这种 IMF 南北分量结构也可引起一定类型的磁层亚暴。

## 2.3 磁层亚暴对行星际条件响应的定量关系

IMF 的南北转向,是触发磁层亚暴的重要因素,探测表明,IMF 南北分量变化存在着不同时间尺度和结构形式,不同 IMF 的结构形式,可产生不同类型的磁层亚暴,主要可分为三种:

(1)大振幅( $>10\text{nT}$ )长持续时间( $>3$  小时)的 IMF 南向分量  $B_s$ ,这种形式的 IMF 南向分量,可引起准周期性的系列亚暴和较强的磁暴。

(2)时间尺度较小的 IMF 南北翻转(IMF 间断)其表现形式是先出现 IMF 南向,持续时间一般为 1 小时左右,后又转北向。这种 IMF 的表现形式可产生孤立亚暴,这种孤立亚暴一般不会形成磁暴和强亚暴,其出现率可达 30%。

(3)小时间尺度的 IMF 湍流和波动形式,这种 IMF 形式可产生高强度、持续时间较长和连续性的活动。

目前对于不同形式的磁层亚暴对不同 IMF 结构形式响应的机理还不了解,这是今后需要研究的重要问题。

## 2.4 太阳风直接驱动过程与载-卸过程的关系

目前认为,磁层亚暴包括两种过程:一是太阳风直接驱动过程;一是载-卸过程,太阳风直接驱动过程是指行星际磁场和太阳风与磁层顶直接相互作用的过程,这一过程控制着太阳风的能量、动量和质量向磁层传输率的大小和表现形式。观测表明,只有当太阳风-磁层发电机输出功率达到某一值( $10^{11}$  焦耳)时,磁层亚暴才可能发生。载-卸过程是指太阳风-磁层相互作用将能量储存在磁尾(增长相)以及这些能量的突然释放(膨胀相)过程。这一过程与等离子体片区的磁重联和等离子体稳定性密切相关,磁重联在何种条件下产生,它是否和如何引起亚暴的?载-卸过程主要与何种不稳定性有关?这种不稳定性的产生与太阳风直接驱动过程的关系如何?具体说,即磁层边界层的结构和动力学对等离子体片的结构变化和不稳定的影响过程,目前对这方面的问题了解甚少,等待开展研究。

## 2.5 磁层亚暴膨胀相触发区的位置

目前对磁层亚暴膨胀相在磁尾的触发区位置有很大的争议。不同亚暴模型的提出者各有

自己的看法。例如,近地中性线模型认为磁层亚暴是发生在 15—20 个地球半径( $R_E$ )的磁尾等离子体区;电流中断模型认为磁层亚暴是发生在 6—10 $R_E$  的近地等离子体片区。还有,中磁尾和远磁尾( $>25R_E$ )的动力学过程对磁层亚暴的触发位置有何影响?总之,磁层亚暴的发生位置是亚暴触发过程中的关键问题之一,需进行探测和研究。

## 2.6 磁层亚暴与磁暴的关系

磁层亚暴与磁暴两者是有密切联系但又具有各自特性的磁层扰动过程。目前一般认为,引起磁暴主相的环电流,是由亚暴膨胀相期间注入环电流区的高能粒子形成的。观测表明,在强的磁暴主相期间往往伴随着一系列的亚暴,但并不是发生了亚暴就一定会形成磁暴,也不是 AE 指数强时 Dst 指数一定是强。

磁暴和亚暴的关系,主要取决于行星际条件和亚暴过程中注入粒子对环电流的贡献。观测表明:对于 IMF 南向分量持续时间长( $>3$  小时)和强度大( $>10\text{nT}$ )的行星际条件,可间歇性地发生多次亚暴,这种系列亚暴一般会形成强的磁暴主相;对于持续时间较短( $<1$  小时)和强度较小( $<3\text{nT}$ )的 IMF 南向分量,可产生孤立的亚暴,这种孤立的亚暴,一般不会形成磁暴主相,或只能形成很弱的磁暴主相;对于振幅很大,持续时间较长的 IMF 南北分量起伏,可产生较强的 AE 指数,但这种情况一般不会形成磁暴主相,或只形成弱的磁暴主相。

了解磁层亚暴和磁暴的关系,对磁层亚暴和磁暴的预报是十分重要的,目前对磁暴和亚暴关系的机理还不很了解。

## 3 今后磁层亚暴的研究方向

### 3.1 磁层亚暴整体和全体过程研究

目前提出的一些磁层亚暴模型,它们之所以不能解释磁层亚暴的发生和发展过程,就是因为没有考虑磁层亚暴的整体过程。

由于观测结果与模式之间的矛盾,国际空间物理界又掀起了一次对磁层亚暴争论的高潮,主要热点集中在近地中性线(NENL)模型和近地电流中断(NECD)模型,NENL 模型的支持者认为,该模型考虑了磁层亚暴的整体过程,包括:行星际磁场和太阳风与磁层的相互作用,磁层能量的储存和释放过程,近磁尾、中磁尾和远磁尾与磁层亚暴的关系,以及磁层与极区电离层的耦合过程。在 NENL 模型的框架基础上,得用新的观测数据作进一步地改进和扩展,才能形成一个较完整的磁层亚暴模型。NECD 模型的支持者认为,近年来极光和场向电流的观测结果,说明磁层亚暴膨胀相是发生在近地等离子体片区(6—10 $R_E$ )。在近地等离子体片区,由于电流不稳定性产生了大的反常电阻、湍流或弛豫效应,导致越尾电流减小,转向电离层,形成亚暴电流楔。然而,NENL 模型的支持者对亚暴产生的位置提出异议,并指出,在等离子体片变得很薄的情况下,利用现有的磁场模型确定亚暴膨胀相期间极光和场向电流对应的等离子体片位置是很不准确的。他们认为,NENL 模型和 NECD 模型有密切联系,而且近地(15—25 $R_E$ )的磁场重联对磁层亚暴的发生和发展起主导作用。最近有人认为,近地磁场重联产生的高速流对亚暴膨胀相期间场向电流的增强有重要作用:主要是高速流减弱产生的惯性电流,地向高速流引起近地磁通量堆积产生的场向电流,以及由于地向高速流向东西方向偏转形成速度剪切及其激发的 K-H 不稳定性产生的场向电流,这些论点进一步支持了 NENL 模型。

我们认为,研究磁层亚暴的整体过程,必须进一步了解以下问题:

(1)磁层亚暴发生和发展的时间序列特性。目前将磁层亚暴的载-卸过程分为三个阶段,即



增长相、膨胀相和恢复相。增长相是指太阳风(包括行星际磁场)和磁层相互作用对磁层能量的积储阶段,总的来说,这个阶段是比较明确的,但对于不同的行星际条件,磁层储能的时间和储能的多少是不同的,因而可产生不同类型的磁层亚暴和磁暴,这方面的问题需要进一步研究。

膨胀相是磁层亚暴研究的重点,也是最不清楚的一个阶段。亚暴膨胀相最先是从小观测现象确定的,不是从物理过程确定的。从物理学上来说,亚暴膨胀相应包括磁层能量的突然释放、释放出的磁能的转化及其在极区电离层的耗散过程。从这一角度来说,磁层中磁能突然释放的时间与现在定义的亚暴膨胀相开始的时间是不同的。对于 IMF 持续南向时发生的亚暴来说,磁能释放可用磁场重联过程来描述;因而,近地磁场重联发生的时间和位置与亚暴膨胀相开始的时间和位置是不同的。我们认为,目前定义的亚暴膨胀相是笼统的含义,我们提议,将膨胀相具体分为三个时段,即主要磁能释放时间、过渡段(地向高速流与近地磁场相互作用阶段)和亚暴膨胀相开始时间,如这样划分,一方面可解决极光区和近地观测现象与 NENL 模型的矛盾,另一方面可将 NENL 模型扩展为整体的磁层亚暴模型提供条件。

(2)磁层亚暴膨胀相发生的位置。亚暴膨胀相发生的位置是当前争议的焦点之一,我们认为,如将亚暴膨胀相分为上述的三个时段,则膨胀相是发生在近地磁层的某一区域,大约从等离子体片的内边界至 25Re(地球半径)左右,膨胀相开始的位置可能发生在等离子体片的内边界附近,等离子体片内边界的位置也不是固定的,它与行星际电场,磁层对流和磁场重联产生的地向高流速有关。因此,不同类型的磁层亚暴,其膨胀相开始的位置是不同的。

(3)不同类型磁层亚暴的发展过程中地球空间不同区域磁场和等离子体条件、参数及其变化。从观测资料入手搞清这些问题,配合计算机数值模拟和理论分析,建立不同类型磁层亚暴相应的全球模型,这是磁层亚暴研究有所突破的关键所在。

(4)中磁尾和远磁尾结构和动力学与磁层亚暴的关系。主要有两个问题:一是中磁尾的磁场重联对磁层亚暴的发生和发展有何影响;二是远磁尾的等离子体团事件与磁层亚暴的对应关系。完整的磁层亚暴模型应包括上述两种关系。

(5)磁层亚暴整体过程中不同尺度动力学的理论和模拟研究。建立大尺度的 MHD 模拟模型,重点研究 IMF 南北分量的结构和时间变化对太阳瞬变活动的响应过程;研究磁层结构变化及磁层对流和电流系统对不同行星际条件的响应过程。

建立中尺度模型,研究等离子体片的宏观不稳定性,如撕裂模不稳定性、K-H 不稳定性及近磁尾位型不稳定性等对磁层亚暴发生和发展的影响。

建立小尺度的动力学模型,研究微观不稳定性对亚暴期间反常电阻的增加,波动和粒子的加热加速过程。

### 3.2 磁层亚暴整体过程的探测

磁层亚暴研究遇到的主要困难,是缺乏较细微的整体探测数据。ISTP 的多卫星探测,对进一步了解磁层亚暴的整体过程会提供一些必要的探测数据。预计于 2000 年发射的 Cluster I 卫星是 2000 年前后最重要的国际日地空间探测计划。我国正计划提出地球空间双星计划,与 Cluster I 相配合,将大力实施地面综合观测台站子午链工程。预期这些计划会推动磁层亚暴研究的发展,可望取得某些突破性的进展。