

$$+ k_{22}[\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n}) - k_1/k_{22}]^2 + k_{33}[\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^2.$$

这里也许有人会提出, 在这个表示式中只考虑了单独的展曲、扭曲和弯曲项, 在二阶近似的条件下难道不会有它们的交叉项  $(\nabla \cdot \mathbf{n})[\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]$ 、 $(\nabla \cdot \mathbf{n})[(\mathbf{n} \cdot \nabla)\mathbf{n}]$  和  $[\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})][(\mathbf{n} \cdot \nabla)\mathbf{n}]$  的出现吗? 只要从表现  $\mathbf{n}$  和  $-\mathbf{n}$  相当性的变换中就可以看到这些项是不能满足自由能密度  $g$  对  $\mathbf{n} \rightarrow -\mathbf{n}$  变换的不变性的, 所以它们都不能存在。

碟层状液晶除去可以有指向矢取向的形变之外, 分子层本身也可以发生弹性畸变, 所以问题比较复杂一些。如果只考虑指向矢的形变, 那么上面所得出的自由能密度  $g$  的表示式对碟层状  $A$  相液晶仍然可以适用。碟层状  $A$  相液晶的分子形成与指向矢相垂直的分子层。如果各分子层的厚度相同, 那么沿任意路线  $d\mathbf{l}$  来计算液晶中两点  $A$  和  $B$  之间所包含的分子层数应该都是相同的, 也就是说

$$l^{-1} \int_A^B \mathbf{n} \cdot d\mathbf{l}$$

为不变量。如果  $A$  与  $B$  重合, 路线成为闭合曲线, 那么应该有

$$\oint_C \mathbf{n} \cdot d\mathbf{l} = 0.$$

根据斯托克斯定理

$$\oint_C \mathbf{n} \cdot d\mathbf{l} = \int (\nabla \times \mathbf{n}) \cdot d\mathbf{S},$$

就可以得出  $\nabla \times \mathbf{n} = 0$ 。因此碟层状  $A$  相液晶只能有展曲形变, 而不发生扭曲形变和弯曲形变。从物理上讲就是碟层状  $A$  相液晶的扭曲弹性常数和弯曲弹性常数很大, 因而很难获得足够的能量来激发这两种形变。

有了液晶形变自由能密度的表达式, 那么许多与形变相关的问题就都可以解决了。

### 参 考 文 献

- [1] 朱秀昌, 物理, 1 (1972), 89.
- [2] 赵南明, 物理, 7 (1978), 203.
- [3] 林磊, 物理, 9 (1980), 8.
- [4] F. C. Frank., *Disc. Faraday Soc.*, 25 (1958), 19.

# 磁 层 物 理 学

宋 礼 廷

(北京大学地球物理系)

## 一、引 言

人类对地球环境的认识在最近二十年有一个飞跃的发展。这一方面是由于科学技术的进步, 各种新的探测方法和手段不断改进, 另一方面也由于人类第一次飞出地球, 有可能从外部认识地球的环境。人造卫星发射以来, 这二十年已经有数千颗卫星在我们这个星球外空飞行过, 做了各种科学探测和研究, 使我们原来对外空环境的观感有了很大的改变。磁层物理学就

是在这种对地球空间环境崭新认识的基础上, 成长起来的科学分支。

### 什么叫磁层 (Magnetosphere)?

地球外层空间由 1000 公里高度以上, 大气变为完全电离状态, 称为等离子体, 这些等离子体被约束在地球偶极磁场内。但是到远处, 地球磁场不能维持偶极形态, 由太阳日冕不断流出的高速等离子体流 (称太阳风) 将地磁场压迫到一个有限的空穴区内, 这样在向日面太阳风将地磁场局限在约 10 个地球半径 ( $R_E$ ) 范围内, 而在背日面, 太阳风流过又将地磁场吹到很

远的地方( $>80R_E$ )形成磁尾(见图1)。

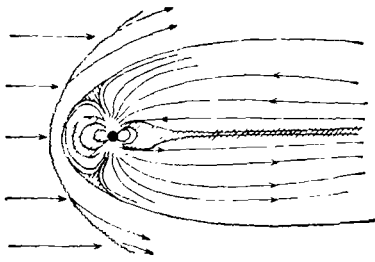


图 1

这个被太阳风局限住的、受地磁场约束的近地空间等离子体区就称为磁层。它占据着由1000公里高度直到约10个地球半径的空间范围。磁层主要是地磁场为主要控制因素的一个层次，以区别于行星际空间和下层大气的物理状态。磁层内包含着各种时间尺度和空间尺度的电磁场。很宽能谱范围的等离子体，就形成磁层特有的结构和动力学现象。磁层外接行星际磁场和太阳风，接受太阳的影响，对内则与电离层大气耦合成为许多地球物理现象的源。

本文概括介绍磁层物理的主要内容，包括磁层形成，大尺度物理结构和磁层某些物理过程。

## 二、磁层的形成

太阳风等离子体在大尺度上( $10^4-10^5$ 公里)近似地可看做导电的流体介质。它的电导率非常大，流向地磁场时，把地磁场屏蔽在一侧，完全类似无穷大导体屏蔽磁场的作用。在

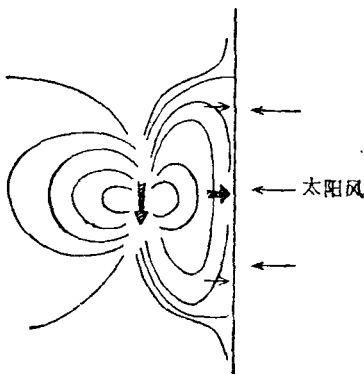


图 2

导体表面感应电流的作用是使导体内磁场为零，而使导体外附近的磁场增加一倍，表现为地磁场被压缩(图2)。

太阳风继续前进，平面的锋面不能维持，低纬度磁场压强比高纬度的强，锋面将弯曲形成包围地磁场的样子。最后太阳风锋面将终止在这样的位置上：锋面两侧的压强互相平衡，太阳风不再向内前进，形成地磁场的边界(图3)。

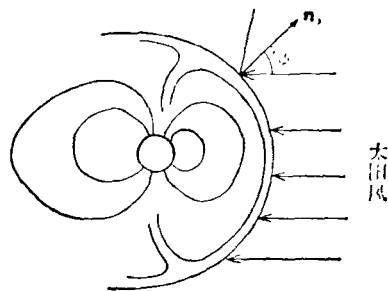


图 3

边界上满足太阳风动压强与地磁场磁压强相平衡的条件：

$$2mNv^2 \cos^2 \phi = \frac{B^2}{8\pi},$$

或写成

$$B = (8\pi P_0)^{1/2} \cos \phi, \quad (1)$$

其中  $P_0 = 2mNv^2$ ， $m$  为太阳风粒子质量， $N$  为太阳风数密度， $v$  为太阳风速度， $\phi$  为太阳风对边界面的入射角， $B$  为锋面处总磁场强度。令  $n$  为边界面单位法向量，由于磁场必须切于表面，可以把(1)式写成

$$|n \times B| = -(8\pi P_0)^{1/2} n \cdot \hat{v}, \quad (2)$$

$\hat{v}$  是太阳风速度单位矢量。

我们将总磁场写成三部分之和：

$$B = B_g + B_p + B_c,$$

$B_g$  为地磁场， $B_p$  为附近边界面局部电流产生的磁场， $B_c$  为远处边界电流产生的磁场。如果边界面为平面， $B_c = 0$ ， $B_c$  是边界面弯曲产生的修正项，恰在边界导体内一点磁场为零，即

$$B_n = B_c - B_p + B_g = 0,$$

$$B_p = B_g + B_c.$$

所以

$$\mathbf{B} = 2(\mathbf{B}_g + \mathbf{B}_c),$$

代入(2)式得

$$|\mathbf{n}_s \times (\mathbf{B}_g + \mathbf{B}_c)| = -(2\pi P_0)^{1/2} \mathbf{n}_s \cdot \hat{\mathbf{v}}. \quad (3)$$

(3)式就是确定边界形状的自洽方程。 $\mathbf{n}_s$ 由边界形状决定。如果其它量都已知,可以确定边界形状。但是, $\mathbf{B}_c$ 是由远处边界面电流产生的修正,不知边界形状, $\mathbf{B}_c$ 也求不出来。先假定 $\mathbf{B}_c = 0$ ,由(3)式求得一级近似边界形状,然后再由边界面求 $\mathbf{B}_c$ :

$$\mathbf{B}_c(\mathbf{r}) = \frac{1}{c} \int_{(S)} \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{r}'}{r'^3} dS,$$

$\mathbf{r}'$ 是微分面元到点 $\mathbf{r}$ 的矢量, $\mathbf{j}$ 是微分面元中面电流,

$$\mathbf{j} = \frac{c}{4\pi} \mathbf{n}_s \times \mathbf{B} \doteq \frac{c}{2\pi} \mathbf{n}_s \times \mathbf{B}_g.$$

这样求得 $\mathbf{B}_c$ 以后,再代入(3)式求二级边界面反复到自洽为止。图4就是求得的子午面内磁层边界形状,赤道面内类似,见图5(测量位置)。

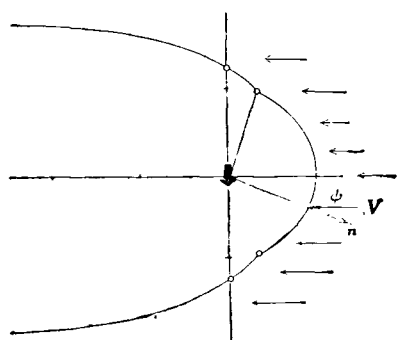


图4

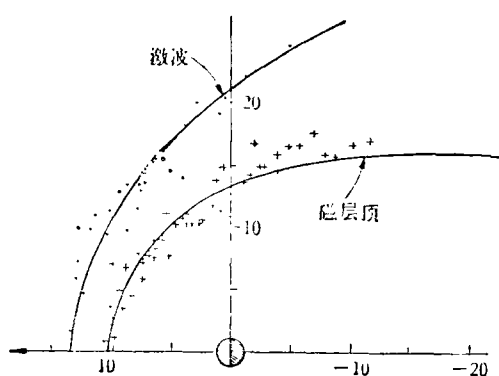


图5 IMP-1 卫星测到的边界位置

如果取太阳风速度为 $v \sim 500$ 公里/秒,数密度物理

$N \sim 10$  质子/厘米<sup>3</sup>,可以由方程(3)估计对日点磁层边界距离 $r_0 \sim 10$ 地球半径。一系列卫星测量结果完全证实磁层顶的存在,只是磁层顶的位置随太阳风速度,密度的变化有很大变动,随太阳活动增强,太阳风速度增高,磁层顶可被压缩到6—7个地球半径的距离。理论计算还得到向日面磁层顶两个中性点(称极歧点),也为观测证实。正是在这两点太阳风粒子可以直接进入地球高纬、极光区。

### 三、磁层大尺度结构

#### 1. 弓形激波

太阳风平均速度约500公里/秒,这样高的速度大大超过当地的声速和阿尔芬波速。超音速流受到地磁场阻碍会在它们前面形成激波。事实上是太阳风流经过这激波面以后,才形成前面所说的磁层顶。这个激波不同于一般的空气动力学激波,因为太阳风数密度只有1—10个质子/厘米<sup>3</sup>,如此稀薄的等离子体,粒子间几乎没有碰撞,激波过渡层的耗散过程不是靠粒子间的碰撞而是其它等离子体的集体效应。因此磁层外形成的地球弓形激波是无碰撞等离子体激波。

太阳风经过这激波面,在激波下游风速减小,密度、温度都要升高。十多年前“Vela 3”卫星已经测得这个结果: $v/v_\infty \approx 0.70$ ,  $T/T_\infty \approx 24$ ,  $\rho/\rho_\infty = 3.4$ ,脚标 $\infty$ 表示为上游值。弓形激波的平均位置,在向日面对太阳点为 $14.6R_E$ ,黎明方面为 $22.8R_E$ ,黄昏方面为 $27.6R_E$ ,激波厚度约10公里量级( $R_E \sim$ 地球半径),见前面图5。图6是美国“先锋6号”卫星测量结果,可以明显看到卫星经过弓形波和磁层顶时,粒子密度和磁场突然改变(横坐标是世界时)。

由于激波过渡层内的耗散过程是等离子体湍动,可以指望在弓形波与磁层顶之间的磁鞘内,湍动过程是很强的。观测到激波位置迅速变动,而激烈地湍动表明了它的这种固有性质。无碰撞激波是等离子体物理中非常有兴趣的非线性问题,激波过渡层内存在着强烈的粒子和

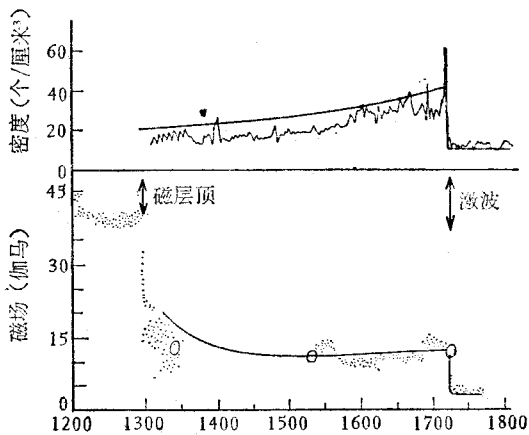


图 6

起伏电磁场的相互作用，这种复杂作用还并未完全了解，而地球弓形波恰为这种类型激波提供一个现实的研究样品。目前正引起研究者的巨大兴趣。

## 2. 地磁尾与中性片

卫星测量地球背日面远处的磁场，发现它完全不是偶极形态，磁场方向主要在日地连线的平行方向上，形成长长的地磁尾巴（见图 1）。地磁尾是与磁层边界面上的电流对应着的，向日面边界层上电流大致是由黎明指向黄昏方向，这电流使磁层内磁场增强而使磁层外地球磁场被抵消。背日面电流在磁层边界层上由黄昏流向黎明，再沿着磁尾两瓣交界的中性片，由黎明流向黄昏，使电流闭合。这个电流大大修正的磁场形态，使其变成两个尾瓣。图 7 是由地球看磁尾的横截面，上面尾瓣磁场是指向地球，下面尾瓣磁场是离开地球，两平行反向磁场

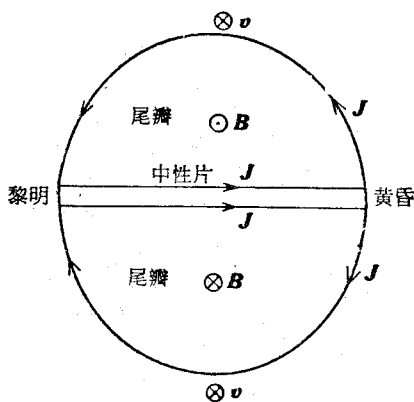


图 7

在中间形成中性片。维持这电流的电场，是太阳风与磁层相互作用感生出来的。这个感生电场是晨昏方向，通常称为晨昏电场。中性片厚度约为 1000 公里左右，这里磁场几乎为零，而上下两侧磁场方向相反，经过这中性片，磁场梯度很大。在这里发生的物理过程对地球物理现象是很重要的。

磁尾连续存在要求太阳风动量连续传输到磁层以平衡磁场拉伸而造成的张力。太阳风等离子体反抗磁场拉伸张力做功，是磁尾磁能贮存的供应者。磁场位形的任何变化都意味着能量的继续贮存或释放，由于磁尾结构在时间尺度平均不大于一天的时间里是不变的，很显然磁尾的产生被相应的耗散机制平衡着，（贮能的耗散）极光和磁亚暴是主要的耗散过程。地磁活动平静时也有能量不十分高的电子沉降到极光带大气里，产生扩散状极光。能量沉降率约为  $0.5$  尔格/厘米<sup>2</sup>·秒，对两极光带积分，得到总能量沉降率为  $5 \times 10^{16}$  尔格/秒，而磁尾含总能量约为  $5 \times 10^{22}$  尔格，足够维持十天以上极光耗散。而磁亚暴是更重要的耗散，一次亚暴造成的极光沉降是静日极光的三倍。贮能与耗散平衡着。

关于磁尾形成机制是有争论的，从磁流体力学观点是太阳风将极盖地磁场拉伸到背日面形成的。但是，拉伸的机制是什么？一种意见是类似流体粘滞效应产生的拉伸，例如磁流波由太阳风传播到磁层内伴随有动量和能量传输，产生类似粘滞的效应，或者磁层顶不稳定性带来的动量传递产生类似粘滞效应。另一种意见认为磁尾场是开放的，行星际磁场和地磁场连接起来，随太阳风流过自然形成磁尾。前者是一个屏蔽模型，磁层顶为切向间断面，太阳风和行星际磁场不能直接对磁层发生影响，粒子只能通过扩散、粘滞等效应进入磁层。后者是非屏蔽的，磁层顶是旋转间断，太阳风粒子可直接进入磁层，行星际磁场对磁层有一定控制作用。哪种模型更符合实际情况，需进一步观测和研究。

## 3. 辐射带

辐射带是指很高能量的带电粒子(质子或电子)被地磁场捕获,在近地空间一些区域集中形成围绕地球的环带状区。最靠近地球的区域叫内辐射带,其中心距地心约  $1.5R_E$ , 主要由能量  $10-100$  兆电子伏质子组成。外辐射带中心位于  $3-4R_E$ , 主要由很高能量的电子组成, 能量  $>45$  千电子伏的电子占优势, 通量达  $10^8/\text{厘米}^2 \cdot \text{秒}$ 。内带也有电子, 外带也有质子, 但通量都很小。外带质子能量愈低, 带的中心峰向外移, 形成很宽的区域, 仔细分辨可以发现不同能量捕获在不同位置, 形成象洋葱状多重带。内带与外带是分立的, 带间空隙始终存在。内带十分稳定, 外带随太阳活动有较大变化。

辐射带是怎样形成的呢? 必须说明这些粒子是从哪里来的? 何以有那样高的能量? 粒子有来源也必有损失, 耗损的机制又是什么? 粒子来源主要有以下几个方面:

(1) 太阳短波辐射使地球中性大气电离提供的带电粒子;

(2) 宇宙线粒子的直接捕获和簇射捕获, 以及产生的中子衰变捕获;

(3) 太阳风等离子体进入磁层被捕获。

粒子损失过程很复杂, 主要机制有与原子核非弹性碰撞损失、电荷交换损失、主要是进入低层大气的损失。

太阳短波辐射产生的大气电离主要是提供地球周围冷等离子体的源, 对辐射带贡献不大。内辐射带有极高能量又很稳定, 能谱与通量都与太阳活动无关, 说明它的源与损失机制都十分稳定。普遍认为内辐射带是由宇宙线形成的。高能宇宙线粒子与大气氧、氮原子核碰撞产生中子, 一部分中子反射回去, 在磁层中衰变被捕获而成内辐射带。外辐射带随太阳活动有很大变化, 粒子通量可以改变  $10-100$  倍, 说明粒子来源主要是太阳风。但是, 太阳风的低能粒子怎样进入地磁层, 同时又被加速成具有辐射带那样高的能量, 这正是当前重要的研究课题, 目前还没有成熟的理论。

#### 4. 等离子体层与等离子体片

除了辐射带高能带电粒子, 整个磁层分布

物理

有低能等离子体(能量从几个电子伏到  $50$  千电子伏)。在中低纬度由  $1000$  公里起向外, 低能粒子 ( $<10$  电子伏) 随高度缓慢减少, 大约到  $4-5R_E$  高度, 密度突然减小了  $100-1000$  倍。这里是个明显的边界, 边界以内称等离子体层, 边界称等离子体层顶。等离子体层的平均数密度约为  $2 \times 10^2 - 10^3$  个/厘米<sup>3</sup>, 温度为  $10^4 - 10^5$  K。层外密度降为  $1$  个/厘米<sup>3</sup>。等离子体层形状基本沿着偶极力线分布, 这就表明粒子是地球电离层起源的(图 8)。等离子体层顶的位

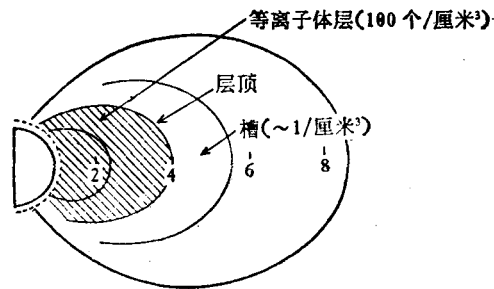


图 8

置, 在赤道面围绕地球并不对称, 随地方时变化。早晨(6时)层顶的位置距地球最近约  $3-3.5R_E$ ; 黄昏(18时)最远, 约  $5R_E$ 。层顶的位置随地磁活动而变化, 磁暴时向地球方向收缩。

由等离子体层向外, 整个磁层都分布着能量为千电子伏的等离子体。在外辐射带中这种低能粒子的通量甚至比高能粒子还高。这种定常的捕获状态, 使它们与高能粒子一起, 除了沿磁力线振荡外, 在偶极磁场作用下正粒子向西漂移, 负粒子向东漂移, 总效应形成包围地球的大电流环。这个电流环随着粒子强度涨落, 成为地磁暴的直接原因。

地球磁层中冷的和热的等离子体共存现象是不稀奇的, 由于等离子体很稀薄, 它们之间很少直接交换能量。能量交换只能通过波动, 但波与粒子相互作用, 造成能量交换是有选择的。目前对等离子体层内低频波 ( $10^2 - 10^5$  赫兹) 研究的比较多, 例如沿着磁力线波导传播的哨声波已经是地面上观测磁层等离子体密度的有效手段。关于各种波与粒子作用的研究还刚刚开始。

夜面磁层开放成磁尾状,磁层等离子体分布也改变了.除了沿磁层边界有一个等离子体幔外,在高纬度几乎没有等离子体,等离子体粒子集中在磁尾中性片附近,形成等离子体片(图9).由于等离子体片包围着零磁场区,磁场在这区域反向,巨大的磁场梯度意味着很大电流,如果这里磁场发生湮灭,粒子会加速到很高能量,磁层亚暴就发生在这个区域.

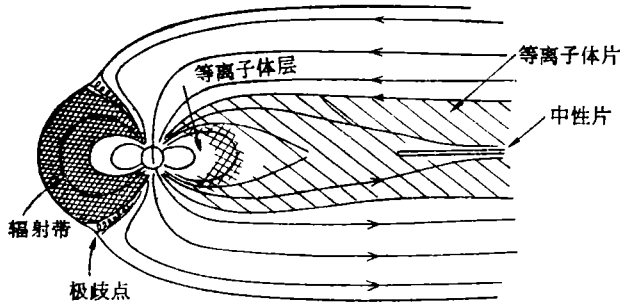


图9

#### 四、磁层中某些物理过程

上述大尺度磁层结构是从静态的角度说明的,每种结构的存在和它们产生的影响,都包含复杂的物理过程,这里不去说明每种作用的详细过程.磁层物理的重要课题是要解释人们期望了解的地球物理现象的起因.这些现象包括如地磁暴、磁层亚暴、极光、电离层骚扰、大气的变化等等.这都是直接或间接与磁层物理有关的.我们设想磁层是一个大系统,它的定常态就是上述结构,结构内部是一种动平衡,有各种尺度的流动在循环.磁层中由于电子沿着磁力线有极高的迁移率,一般认为沿着力线电场是不存在的( $E_{\parallel} = 0$ ),因为磁层等离子体电导率极高,任何等离子体横过磁场的运动总是与电场相联系的.

$$\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{v}_c \times \mathbf{B} = 0 \text{ 或 } \mathbf{v}_c = c \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}. \quad (4)$$

将电场  $\mathbf{E}$  取旋度,就得到

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v}_c \times \mathbf{B}). \quad (5)$$

这个方程很类似流体力学中的涡度方程,它表明等离子体流动时磁场好象和等离子体冻结在一起,因此可以定义  $\mathbf{v}_c$  为磁力线运动速度.若运动是定常的,  $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$ , 则  $\nabla \times \mathbf{E} = 0$ ,  $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ ,  $\varphi$  为静电位势.由(4)式,  $\mathbf{v}_c \cdot \mathbf{E} = 0$ ,  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = 0$  说明流动的流线和磁力线都是等位线.(4)式也表明由电场驱动的等离子体正负粒子一起以  $\mathbf{v}_c$  速度运动.

如果磁场是非均匀的,还会有因磁场变化的附加运动,总速度可写成

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_c + \epsilon_{\perp} \mathbf{B} \times \nabla B / c B^3 + 2\epsilon_{\parallel} \mathbf{B} \times \mathbf{R} / c B^2 R^2, \quad (6)$$

式中  $\epsilon = \epsilon_{\perp} + \epsilon_{\parallel}$  是粒子的能量,  $e$  为粒子的电荷,  $R$  为磁场的曲率半径.公式右侧第二项表示磁场梯度产生的漂移,第三项为弯曲磁场的曲率漂移.对于等离子体中低能粒子( $e \sim$  电子伏), (6)式最后两项很小,可以略去,  $\mathbf{v} \approx \mathbf{v}_c$ . 对高能粒子( $e \sim$  兆电子伏),  $\mathbf{v}_c$  可以略去.由于高能粒子和低能粒子在磁层中分布不同,就有不同的流动花样.由(6)式看出最后两项运动与粒子的电荷有关,正负电荷运动方向相反,且垂直与  $\nabla B$ ,  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{B}$ , 因此辐射带高能粒子运动给出包围地球的环电流.对于中等能量粒子( $e \sim 10^4 - 10^5$  电子伏), (6)式三项都是同量级的,运动图象就复杂些.

磁层中大量是低能等离子体,它们的对流图样可描述如下:太阳风扫过地球两极,极区磁场被拉伸成磁尾的过程,对整个磁层感生一个晨昏电场.这个由黎明指向黄昏的电场使磁尾两尾瓣等离子体及其磁场一同向赤道中性片运动,在远离地球的中性片某处磁场湮灭,形成  $x$  型中性点,磁场重连成新位形,等离子体在  $x$  型中性点一侧向地球方向流动,另一侧向磁尾远处流去.流向地球方向的等离子体流在  $4-5 R_E$  处的等离子体层顶绕过地球流到向日面磁层顶.同时,等离子体层内部的等离子体随地球一起旋转,极盖区电离层也有小尺度对流在循环.关于维持对流的电场,近年来提出磁场重连理论.所谓重连 (Merging or Reconnection)

就是指等离子体携带两反向磁场对流在一起,产生x型中性点(线)而磁场位形重新配置。见下面模型[图10(a)]。模型说明上下两侧束流携带均匀反向磁场在x型中性点(线)(阴影区)湮没,等离子体在两侧流出,磁场又重新连接起来。磁场湮没的重要区域是阴影区(称扩散区)。磁场重连有两个效应,一是磁场重新连接成新位形,一是下游磁场变弱,磁能减小,转化成等离子体动能。

行星际磁场与地磁场的重连过程由图10(b)说明。由图可见,磁层顶磁力线[1]与行星际磁场连接一起,随太阳风流过,沿着[2],[3],[4]路径,然后在中性片[A]点湮没,重连形成[6],再沿着[7],[8],[9]的路径绕过地球变成[10]→[1],行星际磁场在[A]的另一侧向磁尾远处曳出,如此循环重复。在循环过程中,等离子体在中性点加速,同时随磁力线收缩被绝热加速,能量升高的粒子一部分沿着磁力线沉降到极区电离层以下产生极光,一部分可能补充了外辐射带粒子的损失。上述磁层结构多数可看做是磁层平衡态。其实,磁层远不是平衡态,磁暴和

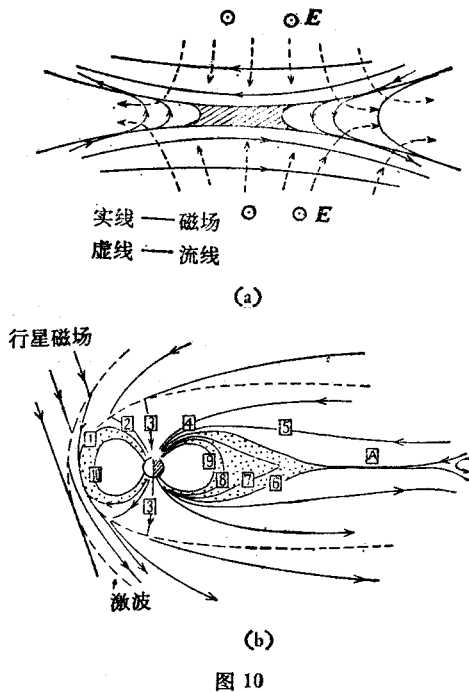


图 10

磁层亚暴就是众所周知的随时间变化的物理过程。

磁暴是一种全球性地磁扰动,有确定的形态规律和关联现象。它起因于太阳风通量的增加,向日面磁层被压缩,太阳风等离子体输入磁层,经过加速补充到辐射带,环电流急速增强,并有大量粒子向极区沉降。同时,整个磁层的形态和内部电磁场、粒子也随之发生很大变化。要经过一两天时间才恢复常态。

磁层亚暴是较之磁暴更为频繁的扰动,主要涉及背日面磁层和地球极区电离层。可以给磁层亚暴一个工作定义:它是指磁尾释放能量于夜面磁层时,造成持续时间约1—3小时的磁层非平衡态。亚暴的时序发展可分为三个相:增长相,膨胀相,恢复相。

(1) 增长相:夜面环电流和电离层电流都增长,等离子体片收缩变薄,等离子体逐渐由尾向地球方向传输,持续约1小时。增长相对应着磁能在磁尾贮存的过程。

(2) 膨胀相:这是亚暴的主要标志,极光带电层电流突然增强,夜面靠近地球方向的磁尾场突然崩溃,磁场恢复成更象偶极形状,极光的亮度和形态都有突然变化。膨胀相对应着磁能在夜面磁层突然释放,有粒子加速的过程。

(3) 恢复相:磁层张弛到原来磁尾状的平衡态,持续约1小时。

近年来对磁层亚暴研究很重视,因为它的能量释放过程很类似一个小型的太阳耀斑,如果说全球性磁暴起因于太阳风的强烈扰动,向磁层传输了巨大的能量,那么磁层亚暴主要是与太阳风的磁结构有关。目前通行的理论认为由太阳风携带的磁场突然反向,由北向分量转成南向分量,在向日面磁层发生重连后能量迅速向夜面磁层传输,磁尾场增强触发磁尾中性片内快速磁场重连,x型中性点在靠近地球附近形成,把能量释放出来加速粒子,形成磁层亚暴。

这种模式,只能说它可以解释一类广泛的现象和观测结果,它是根据部分观测事实和一定假设演绎出来的定性模型,可以做为研究磁

层变化的一个立足点,距建立一个具有坚实实验基础的定量的磁层动力学模式还有一定距离。

由前面介绍可见,磁层物理学远非成熟,它是近二十年随着等离子体物理、天体物理发展起来的,对磁层中各种现象的内在联系还正在研究和猜测。本质上它是实验科学,观测和实验的水平决定着它的状况。磁层研究的重要性在于地球上任何与太阳有密切关系的现象,人类对空间的任何开发都要经过磁层这个中间媒介,都需要对磁层环境有很好的了解。充分地认识它,才能开发它。另外,磁层也给我们研究天然等离子体现象提供一个巨大的实验室,这是人工无法实现的。暂时,人们面对磁层中存在的品类繁多的稀薄等离子体现象,还没有给出十分系统完整的说明。但是人类对未知世界的探索和征服总是满怀信心的,随着观测和实验的不断进步,我们对外空环境的认识和利用肯定会达到一个新的境地。

## 参 考 文 献

- [1] S. I. Akasofu and S. Chapman, *Solar Terrestrial Physics*, Oxford University, 1972, p. 397.
- [2] G. D. Mead and D. B. Beard, *J. Geophys. Res.*, **69**(1964), 1169—1179.
- [3] N. F. Ness, *J. Geophys. Res.*, **71**(1966), 3305—3313.
- [4] D. L. Carpenter, *J. Geophys. Res.*, **68**(1963), 1675—1682.
- [5] J. A. Van Allen and W. C. Lin, *J. Geophys. Res.*, **65** (1960), 2998—3003.
- [6] K. W. Behannon, *J. Geophys. Res.*, **73**(1968), 907—930.
- [7] N. F. Ness, *J. Geophys. Res.*, **70**(1965), 891—905.
- [8] J. W. Dungey, *Phys. Rev. Letters*, **6**(1961), 47—48.
- [9] W. I. Axford and C. O. Hines, *Can. J. Phys.*, **39**(1961), 143—1464.
- [10] W. I. Axford and C. O. Hines, *Planetary Space Sci.*, **12**(1964), 45—53.
- [11] R. H. Levy, H. E. Petschek and G. L. Siscoe, *AIAA J.*, **2**(1964), 2065—2096.
- [12] K. I. Gringauz, *Physics of Solar Planetary Environments*, Proceedings of the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, 1976, p. 672.
- [13] L. A. Frank, *Physics of Solar Planetary Environments*, Proceedings of the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, 1976, p. 685.

# 核磁共振新技术简介

王金山

(北京师范大学)

## 前 言

1946年 E. M. Purcell 等人<sup>[1]</sup>用吸收法, F. Bloch 等人<sup>[2]</sup>用感应法,各自独立地观察到了物质一般状态中的核磁共振(Nuclear magnetic resonance——NMR)现象。所谓核磁共振,就是在电磁波的作用下,原子核在外磁场中的磁能级之间共振跃迁现象。核磁共振条件是

$$\omega = \gamma H_0 \text{ 或者 } h\nu = g_N \mu_N H_0,$$

式中,  $\omega = 2\pi\nu$  是电磁波的角频率;  $\nu$  为电磁

波的频率;  $H_0$  为外加静磁场强度;  $\gamma$  为迴磁比(或称磁旋比);  $h$  为普朗克常数;  $g_N$  为核的  $g$  因子;  $\mu_N$  为核磁子。

核磁共振信号有许多特性,例如谱线的宽度、形状、谱线包围的面积以及在频率或磁场刻度上的准确位置、谱线的精细结构以及弛豫时间等。谱线的这些特性不仅决定于被测原子核的性质,而且还决定于被测样品的结构与性质。所以,我们可以通过核磁共振谱线的参数来确定物质的分子结构与性质。于是就出现了一门新的学科领域——核磁共振波谱学。它是利用