磁通量管传输事件的形成和整体三维结构

刘振兴　　胡一丁

（中国科学院空间物理研究所，北京）

ISEE 系列卫星（International Sun-Earth-Explorer）最重要的发现之一是观测到了向阳面磁层顶区的通量管传输事件（Flux Transter Events），这对太阳风-磁层耦合的研究产生了重大影响．自从 1978 年 Russell 和 Elphic 首次报道了这一发现以来[1,2]，立即引起了人们的重视和兴趣，不少作者对 FTE 的特性进行了分析研究．然而，目前对 FTE 的理论研究还不多，FTE 的形成机制尚不太清楚．最近 Lee 和 Fu 提出了一种解释 FTE 的理论，他们的主要观点是：撕裂模不稳定性引起的向阳面磁层顶区的多重 X 线磁重联，可形成 FTE[3,4]．

本文中我们提出了一个 FTE 形成的"磁场涡旋响应重联"的新论点，其主要论点是：由于太阳风在磁层顶的绕流，在磁层顶区存在较强的速度剪切，通过 K-H 不稳定性，产生较大尺度的流体涡旋．在这种流体涡旋的作用下，磁层顶区的磁场相应地发生形变，一方面磁场绕曲形成磁场涡旋，一方面在较高的纬度区发生小尺度磁场重联，如图 1 所示．在另文中对此作了详细计算和论证．与过去的重联理论相比，涡旋磁场重联理论有以下几个特点：

1. 要求的流场不同．过去的重联理论，要求存在重联区两侧有反方向的垂直于磁力线的流速；我们提出的这一理论表明，在有切向速度切变的区域，只要产生流场涡旋，就可以形成磁涡旋和磁场重联．

2. 磁涡旋的 O 型磁力线和重联中性点是分离的，张开的磁场重联区只对应一个中性点．对向阳面磁层顶区来说，张开的磁场重联是发生在较高的纬度区．

3. 涡旋重联理论可应用于局域的小尺度重联．

下面我们讨论磁通量管的整体三维结构．Russell 和 Elphic[1]根据观测的 FTE 特性，提出了一个 FTE 的三维图象，如图 2 所示．行星际磁场与地磁场在磁层顶处发生重联，同时形成连接磁鞘和磁层的 U 型结构的通量管．他们认为磁层顶很薄，通量管在磁层顶内没有延伸结构，磁张力使磁通量管向高纬度区运动．为了解释管内的磁场位形，Cowley 对这种结构进行了补充，认为管内存在场向电流[5]．但这种 FTE 三维结构无法讨论 FTE 的动力学性质、形成机制和场向电流的产生等问题．

为了解决上述存在的问题，我们根据磁场涡旋重联理论和 FTE 的观测结果，提出一个包括磁鞘区、磁层顶和边界层区及磁层区的 FTE 整体三维结构模型，见图 3a，b．基本想法是：将 FTE 分为两个区域，一个是位于磁层顶边界区内的 O 型磁力线产生区，这个区域对 FTE 的形成起重要作用．另一个区域是 FTE 在磁顶区两侧的延伸区，FTE 的延伸区很大，一直伸向高纬区，观测到的 FTE 现象，大部分是在此延伸区．下面我们着重讨论这两个区的联系和整个磁通量管的形成过程．

在磁层顶边界区由涡旋流场效应形成的 O 型磁力线，在 B_y 作用下首先形成沿 y 方向的通量管，它在 y 方向延伸长度取决于速度切变较强的区域的尺度，对这个问题我们拟专门讨论．在磁场涡旋区将产生电流 j_y，j_y 将构成磁层顶电流的一部分．j_y 流出涡旋区后，由于平

本文 1986 年 4 月 25 日收到．

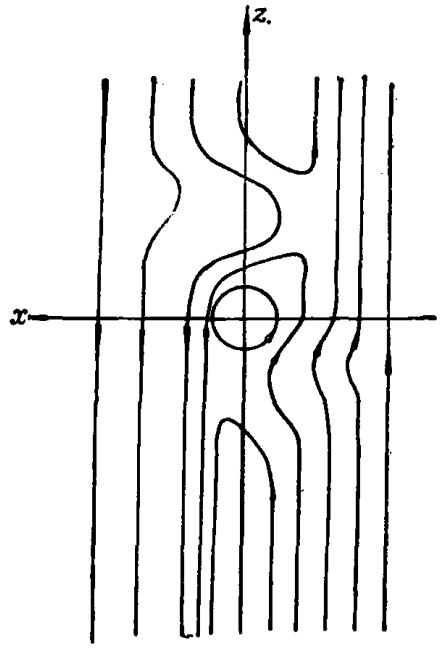


图 1　磁涡响应和磁力线重联时磁场位形示意

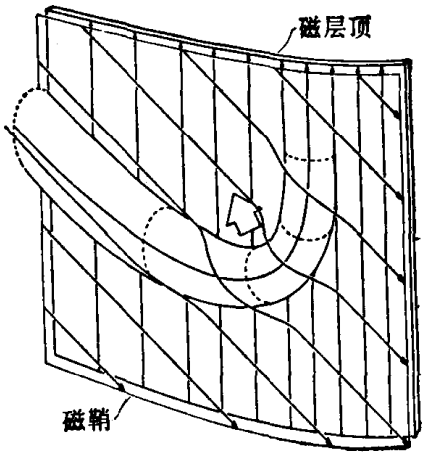


图　2

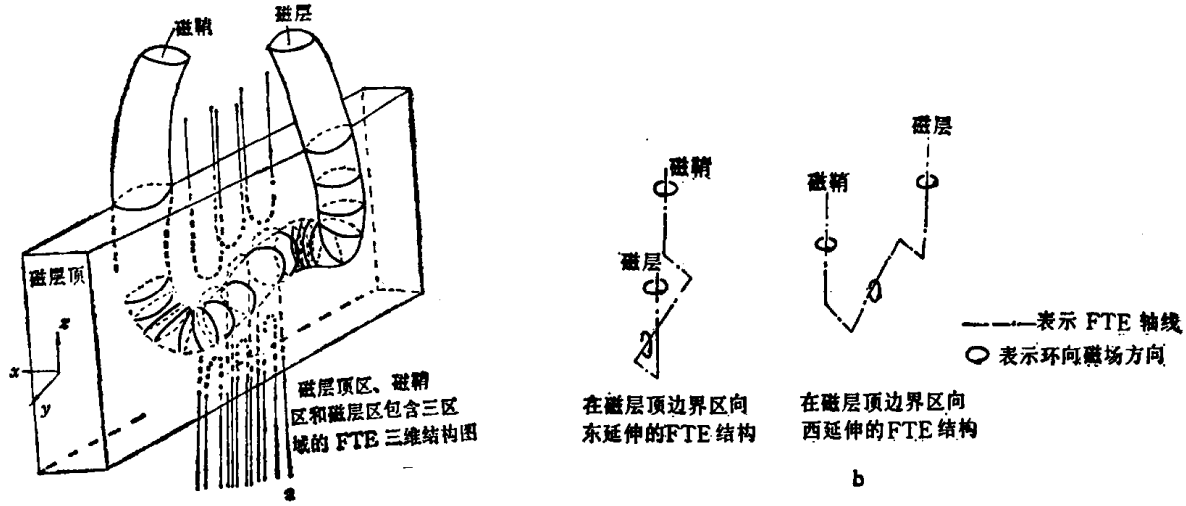


图 3

行磁场的电导率远大于垂直于磁场的电导率，电流必然沿磁力线流动，因此，在产生区形成的电流必然向磁鞘和磁层两边流动，形成场向电流 $j_{\parallel}$，流向高纬区域或注入电离层．当 $j_{\parallel}$ 流入磁鞘和磁层的磁力管（通过磁涡旋的磁力线）后，产生环向磁场 B_θ 并将背景磁场约束起来，经过箍缩或膨胀过程（对应观测中 $|B|$ 的峰或谷），使 B_θ 约束的等离子体从背景等离子体中分离出来形成延伸的 FTE*．与 Russell 和 Elphic 的结构相比，我们的三维结构模式不仅强调了产生区的结构和作用，而且澄清了以下几个概念：

1. 磁鞘和磁层内的磁场，并不是通过简单的重联而形成通量管的；不同的区域，通量管形成机制也不同：通量管首先在磁层顶区域内形成并沿 y 方向延伸，这是一个动力学过程，也同时是一个发电机过程，产生电流 j_y；延伸区的通量管则是 j_y 流出后对等离子体约束而成．重联只与产生区内的通量管形成有关；如果只发生重联，j_y 不注入延伸区，则磁鞘和磁层内的通

* 宋普、刘传薪，通量管传输事件的特性和动力箍缩过程的分析，待发表．

量管也不能形成.

2. 磁鞘和磁层内 FTE 中的场向电流与低纬区磁层顶通量管产生区中的磁层顶电流构成电流回路的一部分.

3. 产生区的磁场结构与延伸区相比有差异: 对延伸区, B_θ 由 $j_\parallel$ 产生;对产生区 B_θ 由两部分构成,一是磁涡旋磁力线,二是重联磁力线向低纬区开放的一支的一部分.

4. 决定 FTE 动力学性质的是产生区,它是通量管三维结构的关键区域.

同U型结构模式一样, 本文提出的 FTE 整体三维结构也可以用来解释 FTE 的观测现象;但由于有产生区的影响, FTE 的运动就显得更加重要. FTE 主要是由产生区的通量管部分带动着整体运动的. 详细情形拟另文讨论. 这里只以北半球磁通量管在产生区向西延伸为例讨论几种可能的情形. 其它情形照此类推. 通常 FTE 运动速度可达 10^2 km/s, 故卫星观测点可视为静止.

如果卫星位于磁鞘和磁层 FTE 之间,则如图 4 所示. 路径 I 表示 FTE 西北漂移, 观测到磁鞘 FTE, 是正 FTE(B_N:+/−); 路径 II 表示 FTE 向东北漂移,观测到磁层内 FTE, 也是正 FTE. 这两条路径对应着大部分纬度> 15° 的区域的观测现象[6], 这表明观测到的 FTE 主要是在延伸区; 这也说明了重联磁力线在这类观测中不出现的原因. 路径 III 表示 FTE 向北漂移,卫星穿过 FTE 产生区,这时在正 FTE 信号之前还应有一与 FTE 方向相反的重联变号区, 根据涡场响应重联理论,变号区与 FTE 信号是分离的(可达几个 R_E)并且信号较弱,常不为人注意. 卫星也可能位于 FTE 之外,如果 FTE 沿路径 IV 漂移, 则观测到反 FTE 现象; 如果 FTE 沿路径V漂移, 则可观测到一对正反 FTE. 我们可以预料到由于 FTE 的运动和其三维结构特性,可能若干次观测到的 FTE 对应于同一个通量管,尤其是 FTE

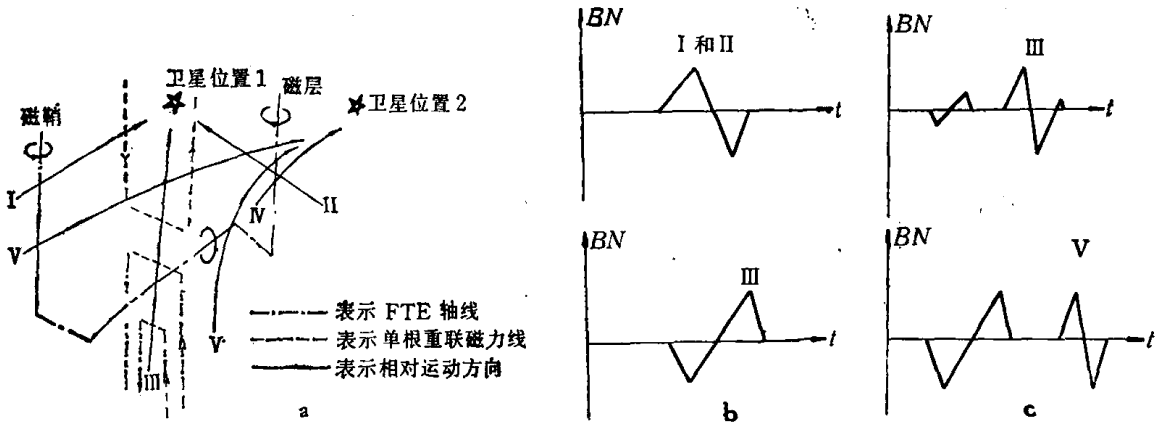


图 4 a.观测点与 FTE 相对运动示意图; b,c.不同观测路径的 B_N 信号示意图

周期性漂移时更为如此. 以上所预料的某些 FTE 的现象,与卫星探测结果相符合.

致谢: 感谢宋普同志与作者进行的讨论.

参 考 文 献

[1] Russell, C. T. and Elphic, R. C., *Space Sci. Rev.*, **22**(1978), 681.
[2] Russell, C. T., *IEEE Trans. Geosci. Electr.*, **GE 16**(1978), 239.
[3] Lee, L. C. and Fu, Z. F., *Geophys. Res. Lett.*, **12**(1985), 105.
[4] Lee, L. C. and Fu, Z. F., *ibid.*, **12**(1985), 29.
[5] Cowley, S. W. H., *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**(1982), 531.
[6] Daly, P. W. et al., *J. Geophys. Res.*, **89**(1984), 3834.