

磁云边界层中的等离子体结构

魏奉思 冯学尚* 杨 昉 钟鼎坤

(中国科学院空间天气学重点实验室SIGMA天气组, 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080.)

* 联系人, E-mail: fengx@spaceweather.ac.cn

摘要 分析1995年2月至2003年6月间由WIND飞船观测到的50个磁云边界层(BL_s)中的等离子体结构发现: (1) 磁云边界层是一种非压力平衡结构, 它的总压力 $P_{T,L}$ (热压力 $P_{th,L}$ 加磁压力 $P_{M,L}$)通常低于边界层前面太阳风的总压力 $P_{T,S}$ 和其后磁云中的总压力 $P_{T,C}$, 边界层中增高的热压力 $P_{th,L}$ 常常不能补偿其磁压力 $P_{M,L}$ 的下降; (2) 磁云边界层中的电子与质子温度比 $(T_e/T_p)_L$ 通常低于边界层前面背景太阳风的 $(T_e/T_p)_S$ 和其后磁云中的 $(T_e/T_p)_C$, 这常与质子的加热比电子明显相联系; (3) 在这些边界层中观测到等离子体反向流动的约占80%, 其中在3个方向($\pm V_x$, $\pm V_y$, $\pm V_z$)观测到反向流动的约占20%. 磁云边界层中的这些基本结构与边界层中可能的磁重联过程相联系. 这些结果表明磁云边界层具有不同于邻近太阳风和磁云的等离子体结构, 它是磁云和太阳风之间存在重要的动力学相互作用的一种重要表现.

关键词 太阳风 磁云 边界层 等离子体

行星际磁云是日冕物质抛射引起的一种重要的行星际扰动结构, 自Burlaga等人^[1]建议以来受到广泛关注^[2~5], 但是磁云边界的证认一直是一个没有解决的问题. 飞船观测到的许多信号, 如温度下降、密度下降、方向间断、磁洞、双向超热电子流、低能质子强度和等离子体 β 参数的突然下降等被用来证认磁云边界^[6~13]. 但是正如Burlaga^[14]指出的: “这些研究中存在不一致性”. 鉴于磁云边界的研究关系到磁云的形成与演化机理、与太阳风之间的相互作用、与地球磁层间的相互作用、地磁、电离层和宇宙线天气变化以及日冕物质抛射基本结构的证认等重要课题^[8,10,11,15]. Farrugia^[5]在分析磁云与磁暴效应时更强调“磁云边界的证认与性质是一个紧迫的研究课题”. 磁云边界层问题长期未能解决, 这是由边界问题的复杂性所决定. 最近我们对磁云边界层的概念和证认进行了研究^[16], 有益于了解磁云边界层的性质和克服磁云边界证认中的不一致性. 我们分析磁云边界层的磁结构^[17], 曾发现磁云边界层具有不同于前面邻近太阳风和其后磁云中的磁结构, 它是磁云与太阳风相互作用的一种重要表现. 这里, 我们进一步分析50个磁云边界层中的等离子体结构, 增加我们对磁云边界层概念和性质的新认识, 从而更好了解磁云的形成、演化过程, 以及和地球磁层的相互作用.

1 观测实例

根据我们近期提出的磁云边界层概念和证认判据^[16,17], 利用1995年2月~2003年6月期间由Lepping等人分析WIND飞船的等离子体数据所证认的磁云

事件为基础(<http://Lepmfi.gafn.nasa.gov/mfi/mag-cloud-publ.html>), 分析了其中50个比较易证认的磁云边界层的等离子体结构. 这里给出一个观测样本来说明磁云与边界层的基本等离子体结构. 图1(a)是飞船WIND于2001年10月31日观测到的一个磁云事件. 它开始于31日21.5时, 结束于11月02日10时. 这是一个比较清晰的磁云事件. 它驱动了一个激波, 其阵面出现在31日13.8时, 可由磁场强度 B_t , 速度 V_p , 温度 T_p 和数密度 N 等太阳风基本参数中的跳跃变化看出. 冲激鞘层区的压缩结构主要集中表现在03日13.8时至16.6时之间磁场、速度、温度和密度的压缩增强. 图1(a)中2条竖直线分别代表按磁云边界层判据^[16]而定义的前、尾边界层的外、内边界, 分别用字母 M_f , G_f 和 M_r , G_r 表示. 这里磁场 B_t 的突然下降和方位角 ϕ , 纬向角 θ 方向中的突然变化, 及其温度 T_p , 密度 N_p 和等离子体 β 参数的增加是该边界层的基本特点. 前边界层(M_f - G_f)把冲激鞘层区与磁云本体分隔开来. 图1(b)给出尾边界层有关总压力 P_T , 磁压力 P_M , 热压力 P_{th} , 速度、温度、密度和电子与质子的温度比 T_e/T_p 参数. 可以看出边界层具有自己的等离子体结构, 它明显不同于前面邻近太阳风和其后磁云的等离子体结构. 它是磁云与太阳风之间存在重要的动力学相互作用的一种重要表现.

2 结果与分析

下面将分别介绍分析50个磁云边界层等离子体结构的主要发现.

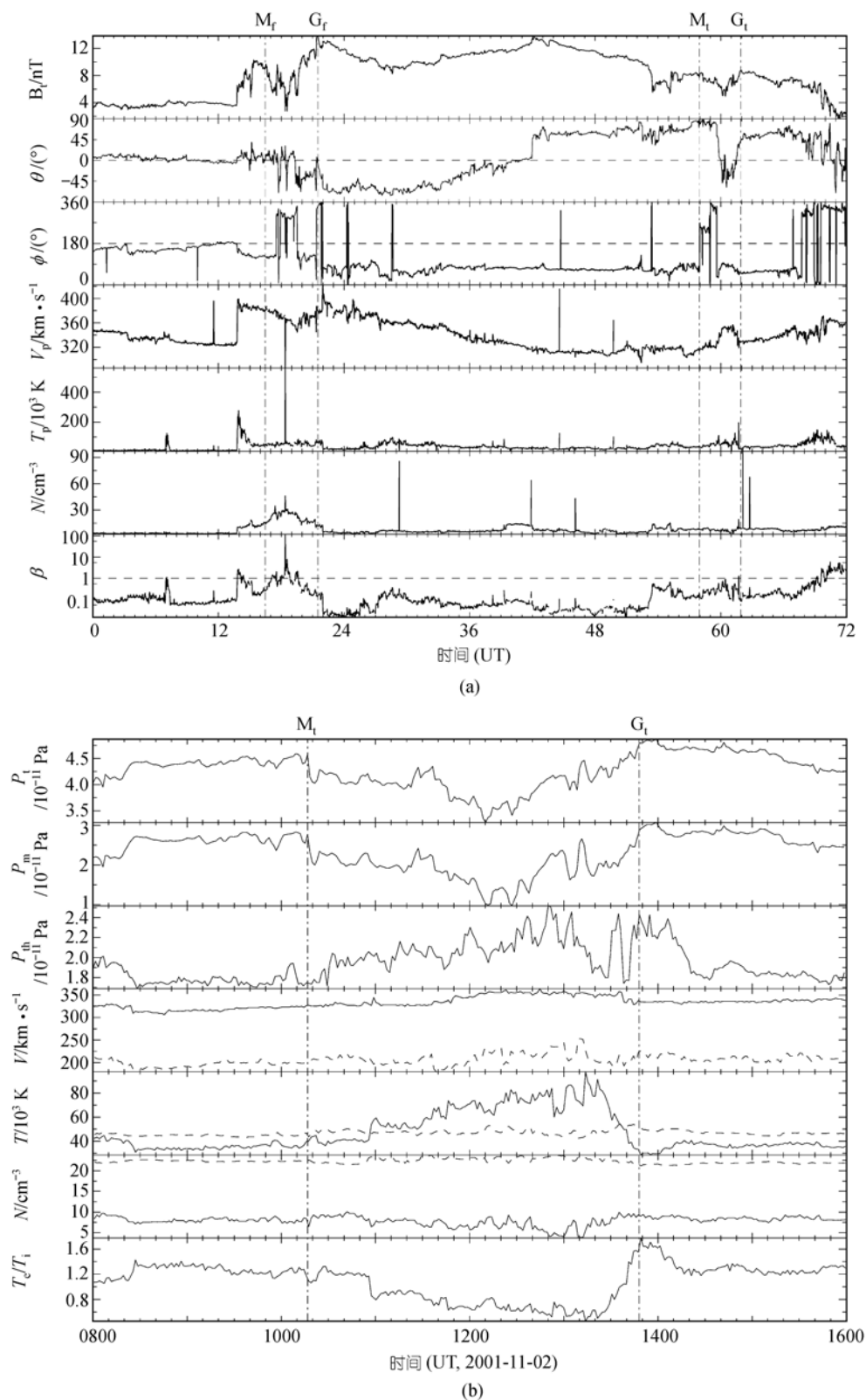


图 1

(a) 飞船 WIND 于 2001 年 10 月 31 日观测到的一个磁云, 其中 M_t , G_t 指示边界层位置; (b) 边界层 M_1 - G_1 中各种压力、温度的变化

2.1 磁云边界层是一种非压力平衡结构

太阳风等离子体的总压力 P_T 由热压力 $P_{th} = Nk(T_p + T_e)$ 和磁压力 $P_M = B^2/8\pi$ 构成. 压力平衡结构是一种跨越该结构总压力不变的结构, 它表示该结构相对太阳风参考系没有运动发生. 这种压力平衡结构经常在太阳风中观测到^[18-20], 切向和旋转间断就是压力平衡结构的典型例子. 分析飞船WIND的50个磁云边界层的等离子体观测资料发现, 边界层中的总压力 $P_{T,L}$ 通常都是小于其前面邻近太阳风的总压力 $P_{T,S}$ 和其后磁云的总压力 $P_{T,C}$. 这种边界层约占所研究的总边界层数的80%以上, 其余少数边界层中总压力或者大于背景太阳风, 或者大于磁云, 或者无明显变化. 这表明从统计意义上讲, 磁云边界层是一种非压力平衡结构. 它虽经历了从太阳到地球长达1 AU(天文单位)的演化历程, 其边界层仍处在相对太阳风参考系的动态运动与演化之中. 分析其原因, 主要是因为磁云边界层中发生着重要的磁流体动力学过程, 这从图1(b)所示边界层中各参数相对邻近太阳风和磁云有重要变化可以清楚看出来. 磁云边界层是一种磁场下降的结构, 虽然其中热压力的增加是普遍的, 约占所研究边界层数的80%以上, 但它们不足以补偿磁压力的下降, 从而导致磁云边界层的总压力低于邻近介质.

2.2 磁云边界层是一种电子与质子的温度比值相对较低的结构

电子与质子温度的比 T_e/T_p 是一个重要参数, 它与等离子体波的激发和传播有关. Burlaga等人^[6]1980年首先报道Helios-1飞船观测到磁云中的离子声波, 其后1997年也报道位于4.64 AU处的Ulysses飞船在1993年6月磁云事件中观测到离子声波^[4], 而在磁云外部则没有观测到它. 一般认为是由于磁云内部 $T_e \gg T_p$, 朗道阻尼对离子声波失效, 有利于离子声波的激发和传播. 而在磁云外部 $T_e < T_p$, 朗道阻尼使离子声波很快耗散. 我们分析50个磁云边界层发现, 约80%的边界层中的 $(T_e/T_p)_L$ 是低于邻近太阳风的 $(T_e/T_p)_S$ 和其后磁云的 $(T_e/T_p)_C$, 且常小于1. 其余少数边界层中电子与质子温度比值或低于边界层一侧而高于另一侧、或无明显变化. 一个典型的例子可在图1(b)中看到, 那里边界层中的 $(T_e/T_p)_L \approx 0.5$, 太阳风和磁云中的电子与质子温度比大约都是 ≈ 1.3 . 观测资料显示, 质子在边界层中被加热比电子来得显著, 质

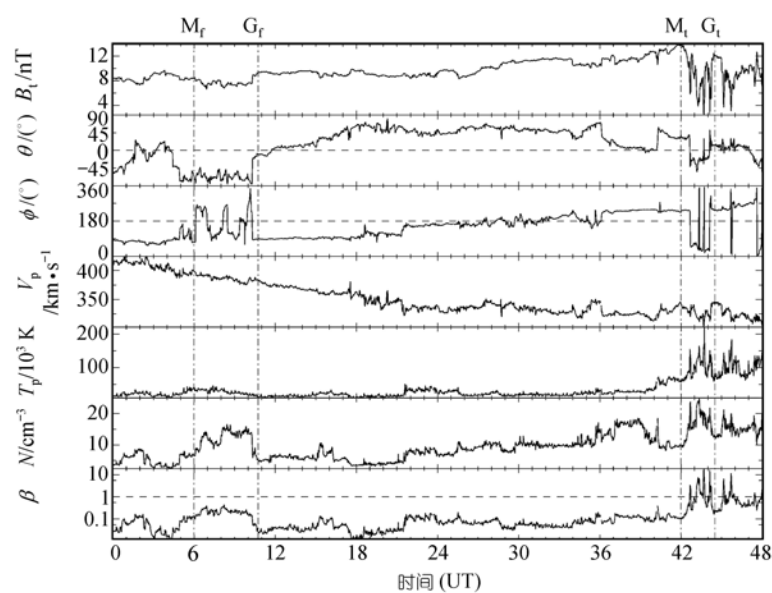
子增温达2.30倍, 而电子增温为1.12倍.

磁云边界层中等离子体的加热, 主要的原因可能与发生在边界层中的磁重联过程相联系, 正如图1(a)所示等离子体的加热发生在磁场强度下降并伴随磁场方向突然变化的区域, 那里磁场下降最大处磁场湮灭的磁能约为 3.6×10^{-11} J, 转换为等离子体的热能约为 0.6×10^{-11} J 和动能 1.5×10^{-11} J.

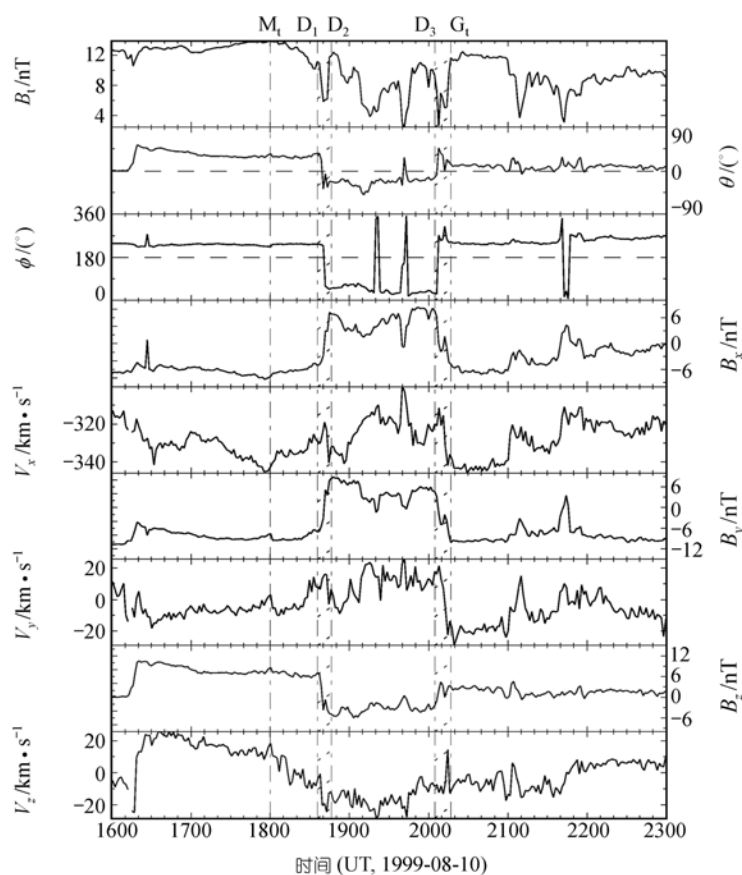
2.3 磁云边界层中常存在等离子体的反向流动

分析50个磁云边界层等离子体流动的特点时发现, 等离子体的反向流动普遍存在于边界层中, 占所研究的边界层总数的80%, 其中在地心太阳黄道(GSE)坐标系中3个方向的速度 V_x , V_y , V_z 都可观测到反向流动约占30%, 而在邻近的太阳风和磁云中观测到这种反向流动的机会要少得多. 图2(a)给出WIND飞船于1999年8月9日1042至8月10日1800世界时(UT)期间记录到的一个典型磁云. 根据我们建议的边界层定义和证认判据^[16,17], 该磁云头部的前边界层分别用 M_f , G_f 表示它的外边界和内边界, 而其磁云尾部的边界层分别用 M_t , G_t 表示其内边界和外边界.

该磁云是一个典型的正在膨胀的低速磁云, 它在太阳风参考系中相对背景太阳风的平均运动速度约为20 km/s, 约等于该处半个阿尔芬速 V_A ($V_A = 35$ km/s). 在该磁云的前部和尾部边界层中都观测到有较强的相互作用发生, 这从它的基本参数较之邻近太阳风和磁云有显著变化可以看出. 图2(b)以尾部边界层(M_t - G_t)(1800~2018 UT)中的反向流动为例给出飞船WIND对磁场总强度、纬向角、方位角、磁场三分量(B_x , B_y , B_z)和速度三分量(V_x , V_y , V_z)的观测结果. 图中等离子体的反向流动出现在用斜点线表示的区间 D_1 - D_2 和 D_3 - G_t 中. 在区间 D_1 - D_2 中 V_z 和 V_y 的反向流动是十分清楚的, 反向流速幅度可达20 km/s. 在区间 D_3 - G_t 中 V_z 和 V_y 的反向流动也是清楚的, 最大流速达30 km/s左右. V_x 的反向流是迭加在约为330 km/s的背景风速上, 它们分别用水平短线示意. 这些反向流动都有一个明显的特点, 它们都和区间中磁场强度的下降, 磁场方向的显著变化, 以及磁场分量中的磁场反向结构或称磁双极子结构相联系. 这意味着磁云边界层中可能存在着磁重联过程, 它导致了反向流动或称反向喷流被观测到^[21].



(a)



(b)

图 2

(a) 飞船 WIND 于 1999 年 8 月 9 日观测到的磁云; (b) 其中边界层 M_i - G_i 中有关速度和磁场三分量观测结果

3 初步结论

本文分析 50 个磁云边界层中等离子体结构的初步结论是：磁云边界层是一种总压力低于邻近太阳风和磁云的非压力平衡结构；其电子与质子温度比值常小于 1，且常低于邻近太阳风和磁云；普遍存在等离子体的反向流动。这表明磁云边界层具有不同于邻近太阳风和磁云的等离子体结构，它是磁云和背景太阳风存在重要的动力学相互作用的一种表现。边界层中的这些等离子体结构和可能存在其中的磁重联过程相联系。磁云与太阳风不同相互作用类型、磁云边界层性质和可能的磁重联过程的研究有待进一步深入开展。

致谢 感谢 NASA CDAWEB 公布的飞船 WIND 的太阳风等离子体和磁场资料，也非常感谢 GSFC 首席科学家 R. Lepping 的 WIND MFI 工作组认证的磁云事件。本工作受 G200078405 和国家自然科学基金(批准号：40336053, 40274052)资助。

参 考 文 献

- Burlaga L F, Mariani S F, Schwenn R. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP8 observations. *J Geophys Res*, 1981, 86: 6673~6684
- Tsurutani B T, Gonzalez W D, Tang F, et al. Great magnetic storms. *Geophys Res Lett*, 1992, 19(1): 73~76
- Bothmer V, Schwenn R. Eruptive prominences as sources of magnetic clouds in the solar wind. *Space Sci Rev*, 1994, 70: 215~220
- Osherovich V, Burlaga L F. Magnetic clouds, Coronal Mass Ejections. *Geophysical Monograph*, 1997, 99: 157~168
- Farrugia C J, Burlaga L F, Lepping L P. Magnetic clouds and the quiet-storm effect at earth. In: Tsurutani B T, Gonzalez W D, Kamide Y, et al, eds. *Magnetic Storms*. AGU, 1997. 91~106
- Burlaga L F, Lepping R, Weber R, et al. Interplanetary particles and fields, November 22 to December 6, 1977: Helios, Voyager and IMP observations between 0.6 AU and 1.6 AU. *J Geophys Res*, 1980, 85: 2227~2242
- Marsden R G, Sanderson T R, Tranquiller C, et al. ISEE-3 observations of low energy proton bi-directional events and their relation to isolated interplanetary magnetic structures. *J Geophys Res*, 1987, 92: 11009~11019[DOI]
- Gosling J T, Baker D N, Bame S J, et al. Bidirectional solar wind electron heat flux events. *J Geophys Res*, 1998, 103(AA8): 17249~17259[DOI]
- Osherovich V A, Farrugia C J, Burlaga L F, et al. Polytropic relation-ship for magnetic clouds. *J Geophys Res*, 1993, 98(A9): 15331~15342
- Farrugia C J, Fitzenreiter R J, Burlaga L F, et al. Observations in the sheath region ahead of magnetic clouds and in the dayside magnetosheath during cloud passage. *Adv Space Res*, 1994, 14(7): 105~109[DOI]
- Lepping R P, Burlaga L F, Szabo A, et al. The WIND magnetic cloud and events of October 18-20, 1995: Interplanetary properties and as triggers for geomagnetic activity. *J Geophys Res*, 1997, 102(A7): 14049~14063[DOI]
- Tsurutani B T, Gonzalez W D, Tang F, et al. Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979). *J Geophys Res*, 1988, 93(A8): 8519~8531
- Tsurutani B T, Gonzalez W D. The interplanetary causes of magnetic storms: A Review. In: Tsurutani B T, Gonzalez W D, Kamide Y, et al, eds. *Magnetic Storms*. AGU, 1997. 77~89
- Burlaga L F. *Interplanetary Magnetohydrodynamics*. New York: Oxford University Press, 1995
- Fainberg J, Osherovich V A, Stone R G, et al. Observations of electron and proton components in a magnetic cloud and related wave activity. In: Winterhalter D, Gosling J, Habbal S R, et al, eds. *Solar Wind Eight*. AIP Conference Proceedings 382, 1995. 554~560
- Wei F S, Liu R, Fan Q, et al. Identification of the magnetic cloud boundary layers. *J Geophys Res*, 2003, 108(A6): 1263. doi:10.1029/2002JA009511[DOI]
- Wei F S, Liu R, Feng X, et al. Magnetic structures inside boundary layers of magnetic clouds. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(24): 2283. doi:10.1029/2003GL018116[DOI]
- Burlaga L F. Micro-scale structures in the interplanetary medium. *Solar Phys*, 1968, 4: 67~69
- Belcher J W, Davis Jr. Large-amplitude Alfvén wave in the interplanetary medium. *J Geophys Res*, 1971, 76: 3534~3563
- Burlaga L F, Scudder J D, Klein L W, et al. Pressure balanced structures between 1AU and 24AU and their implications for solar wind electrons and interstellar pick up ions. *J Geophys Res*, 1990, 95: 2229
- Phieroset M, Phan T D, Fujimoto M, et al. In situ detection of collisionless reconnection in the earth's magnetotail. *Nature*, 2001, 412(26): 414~417[DOI]

(2004-04-23 收稿, 2004-07-30 收修改稿)