中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 4 期: 810 ~ 816
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

磁云内局部高温质子的可能加热机制: 磁场重联

冯恒强[①②*], 王杰敏[①]

① 洛阳师范学院物理与电子信息学院, 洛阳 471002;
② 空间天气学国家重点实验室, 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190
* E-mail: fenghq9921@163.com

收稿日期: 2013-10-14; 接受日期: 2013-12-02; 网络版发表日期: 2014-03-11
国家自然科学基金项目(批准号: 41074124, 41274180, 41231068)、河南省高校科技创新团队项目(编号: 13IRTSTHN02)和河南省科技厅基础研究项目(编号: 122300410331)资助

摘要 磁云具有较强的磁场和较低的质子温度和 Beta 值等显著特征, 但是大量的观测资料显示在磁云内部往往存在局部高温现象. 磁云内局部高温的质子可能是由于其内部磁场重联引起的. 以 1995 年 10 月 18~20 日磁云事件为例, 该事件前边界到 19 日 11:00 UT 之间有一个明显地温度突起区, 从这个持续时间将近 31 小时的磁云内部认证出了 8 个磁场重联出流区, 且大部分磁场重联事件发生在磁云内部质子温度凸起的部分. 所以磁云内局部区域的质子被磁场重联加热的可能性很大.

关键词
磁云
磁场重联
高温质子

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)早期被称为日冕瞬变(Coronal Transient)现象, 它是太阳大气中最剧烈的大尺度活动现象之一, 在短时间内从日冕向外抛射出大量的物质进入行星际空间. 日冕物质抛射在行星际空间的对应物被称为行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME). ICME 在地球附近常常被卫星观测到, 其持续时间一般从十几个小时到几十个小时. 在 ICME 中, 存在一类特殊的 ICME, 它们同时具有下面三个显著特征: (1) 卫星实时观测的磁场方向发生大角度光滑旋转; (2) 具有较强的磁场; (3) 相对较低的质子温度和等离子体 Beta 值. Burlaga 等(1981)把这类 ICME 称为磁云. 磁云的磁场位形可以用无力场通量绳模型近似描述, 它们在整个 ICME 事件中大约占 1/3 的比例(Burlaga, 1988; Cane 和 Richardson, 2003; Lepping 等, 1990). 由于磁云具有近似无力场位形, 这种低 Beta 的封闭磁场结构使整个系统处于最小能量状态, 能够长期维持下去, 它可能保留了日冕内磁通量绳的信息, 特别是各种冕环的磁结构的信息, 所以研究磁云对研究太阳活动的爆发环境和物理机制有重要意义. 磁云和磁层作用时, 其磁场的螺旋结构使它能够持续稳定地提供较强的南向磁场, 从而和磁层顶的北向磁场发生重联, 并导致强的地磁暴. 因此, 磁云一直受到太阳物理学家和空间物理学家的广泛关注并对其做了大量的研究, 取得许多重要的研究成果, 如建立了多种能够基本描述磁云磁场位形的通量绳模型以及拟合方法(Feng H Q 等, 2006; Li 等, 2013; Nakagawa 和 Matsuoka, 2010; Vandas 和 Romashets, 2003); 磁云边界的认证以及磁云边界层新定义的确立(Feng H Q 等, 2006; Lepping 等, 2009; Wei 等, 2003a, 2003b, 2006); 多重磁云的观测、理论模型的建立及其对特大地磁暴的触发(Wang 等, 2002,

中文引用格式: 冯恒强, 王杰敏. 2014. 磁云内局部高温质子的可能加热机制: 磁场重联. 中国科学: 地球科学, 44: 810–816
英文引用格式: Feng H Q, Wang J M. 2014. Magnetic reconnection as a possible heating mechanism of the local high temperature protons within magnetic clouds. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-013-4816-x

2003a, 2005); 磁云和地磁层的相互作用及其对地磁效应的触发机制(Wang 等, 2003b, 2003c; Wu 等, 2000; Xiong 等, 2007, 2009; Zuo 等, 2007); 小磁通量绳的起源以及和磁云的关系等(Feng 等, 2007, 2008, 2012).

由于行星际磁云在日地事件中占据着重要地位, 深入了解行星际磁云对空间天气研究有特殊价值, 特别是对提高磁暴的预报水平有重要帮助. 如上所述, 低的质子温度和等离子体 Beta 值是磁云的显著观测特征, 大量的观测事实表明在磁云内部靠近边界附近往往具有较高的质子温度, 磁云内部也往往会出现局部高温现象. 这些局部的高温的等离子体是怎么被加热的? 是通过和外部的能量交换来实现的还是由于内部的波动或其他物理过程造成的? 本文将以 1995 年 10 月 18~20 日磁云事件为例, 提出一个磁云内部局部高温质子区域的一个可能加热机制: 磁场重联.

1 行星际磁场重联的判据

磁场重联一直是太阳物理和空间物理研究的热点问题. 为了回答诸如耀斑爆发、磁层亚暴发生过程中磁能如何快速的转化为等离子体的动能和热能的问题, 人们在寻找一种磁场快速湮灭的可能机制. 50 多年前, Sweet(1958)根据太阳耀斑活动的观测资料, 首先提出磁能的转化和释放是发生在中性电流片附近区域的磁场重联模型. 但是按照 Sweet 模型, 能量转化的速率太慢, 与实际观测结果相差较大, 不能很好地解释天体和空间物理中的很多爆发过程. 尽管 Parker(1963)从理论上对这个机制进行了完善, 但仍然没有弥补上述不足. Petschek(1964)提出新的磁场重联模型. 在 Petschek 模型中, 重联扩散区仅存于中性线附近很小的区域内, 而且扩散区两侧伴有两组慢激波, 这两组慢激波在能量释放和电流片形成过程中起着至关重要的作用, 大部分的等离子体可以通过慢激波得到加速, 而不需要流过扩散区, 所以磁能的转化主要通过慢激波完成. Lyon 等(1981)还发展了磁重联的不对称模型, Petschek 模型中的慢激波被一个旋转间断和一条窄的慢膨胀带代替. 最近几十年, 在磁场重联的理论研究和数值模拟研究中都取得了一些重要成果(Feng X S 等, 2006; Hu 和 Feng, 2006; Lu 和 Cao, 2011; Wei 等, 2003c; Yan 等, 1992).

自磁场重联概念提出至今半个多世纪以来, 磁场重联的研究取得了长足的进步. 但是由于重联问题的复杂性和直接观测事例的匮乏, 将理论(模拟)模型和磁场重联的观测事件结合起来的研究还比较少. 十年前, Wei 等(2003c)在分析了 Helios, IMP-8, ISEE3 和 Wind 等卫星的观测资料后发现, 在磁云边界、电流片附近、小尺度湍动结构等处存在明显的磁场重联的观测证据. Gosling 等(2005)基于 Petschek 重联模型提出所谓的行星际磁场重联出流区的判据, 即重联出流应是近似的阿尔芬喷流(加速流或减速流), 其边界处的磁场和速度相关, 但前边界和后边界具有不同的相关性(正相关或者反相关). 近几年, 利用 Gosling 等(2005)提出的行星际磁场重联出流区的判据认证行星际磁场重联多达几百个, 其中很多重联事件和磁云相关, 在磁云的内部, 边界层和鞘层内都发现了磁场重联事件(Gosling 和 Phan, 2013; Owens, 2009; Ruffenach 等, 2012; Wang 等, 2010, 2012; Xu 等, 2011). 这些磁场重联出流区多有如下观测特征: (1) 重联出流内的等离子体具有较高质子温度、密度和 Beta 值; (2) 重联出流内的磁场强度明显低于周围太阳风的磁场强度; (3) 周围太阳风具有较低的等离子体 Beta 值. 另外, 早期报道认为重联出流两侧的磁场方向应具有较大夹角, 但是最近的观测结果表明重联出流两侧的磁场夹角可以很小(Gosling 和 Phan, 2013). 本文也将用 Gosling 等的判据认证磁云内部的磁场重联现象.

2 观测数据和分析

图 1 给出 Wind 卫星在 1995 年 10 月 18~20 日观测到的磁云的磁场和等离子体参数, 图 1 中的两条竖直实线是我们给出的磁云的前后边界. 该磁云作为一个典型事件而倍受关注, 许多文献对这个事件做了研究和讨论(Feng 等, 2006a; Wei 等, 2003a). 图 1 由上到下分别为总的磁场强度(B_t)、磁场在 GSE 坐标系里的轴向分量(B_x, B_y, B_z)、太阳风沿日地方向的速度(V_x)、质子的温度(T)、质子密度(N)和等离子体 Beta 值. 由图 1 可以看出该事件具有相对较高的磁场强度, 磁场方向发生大角度平滑旋转, 相对较低的质子密度、Beta 值和温度等磁云的特征. 但是由图 1 还可以看出, 该磁云事件的质子温度并不是持续较低, 而是在前边界到 19 日 11:00 UT 之间有一个明显突起, 在靠近后边界的部分质子温度慢慢升高. 其实大量的

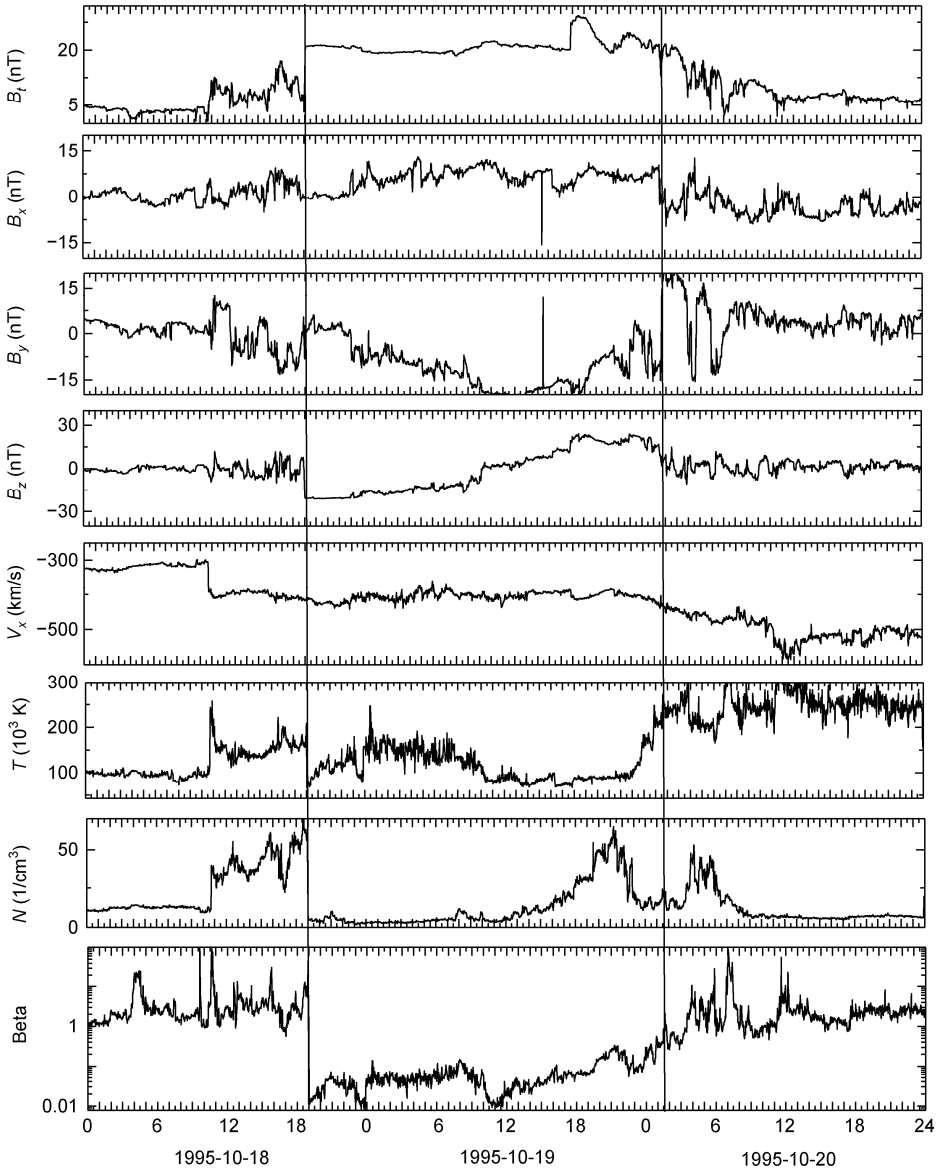


图 1　1995 年 10 月 18~20 日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数(GSE 坐标系)

观测事实表明并不是所有的磁云内部的温度都是持续较低的, 很多磁云像该事件一样, 内部会出现局部高温现象. 众所周知, 磁场重联加热当地质子的效果十分明显, 而最近报道的和行星际日冕物质抛射(或磁云)相关的磁场重联事件很多, 我们猜想磁云内部的局部高温质子可能是由其内部的磁场重联加热的.

我们认真检查了 Wind 卫星在 1995 年 10 月 18~20 日观测到的磁云内部高分辨率(3 s)的磁场和等离子体数据, 根据 Gosling 等(2005)给出的行星际磁场重联判断标准去认证磁场重联事件, 在该磁云的内部共认证了 8 个磁场重联事件. 表 1 给出了这 8 个磁场重联事件的开始和持续时间以及重联出流两侧的磁场方向的夹角. 图 2 给出了在 LMN 坐标系中 10 月 18 日 23:13UT 附近的磁场重联事件, 图中的虚线是利用 Walen 关系得到的重联喷流的理论速度值. 由图 2 的速度曲线可以看出, 在 23:12:52~23:13:19UT 期间有一个明显的喷流, 该喷流前边界处速度 **V** 和磁场 **B** 反相关, 后边界处速度 **V** 和磁场 **B** 正相关, 利用 Walen 关系预测的速度和卫星观测观测的速度曲线基本一致, 即满足 Gosling 等的磁场重联出流区判据.

表 1　磁场重联事件相关参数

No.	开始时间(UT)	事件持续时间(s)	前后边界的磁场的夹角(°)
01	1995-10-18 23:12:52	27	22.1
02	1995-10-18 23:51:52	36	24.8
03	1995-10-19 01:24:25	24	6.5
04	1995-10-19 02:22:04	33	4.2
05	1995-10-19 09:48:04	24	5.6
06	1995-10-20 00:02:10	27	15.3
07	1995-10-20 12:52:01	30	11.9
08	1995-10-20 16:19:37	36	21.1

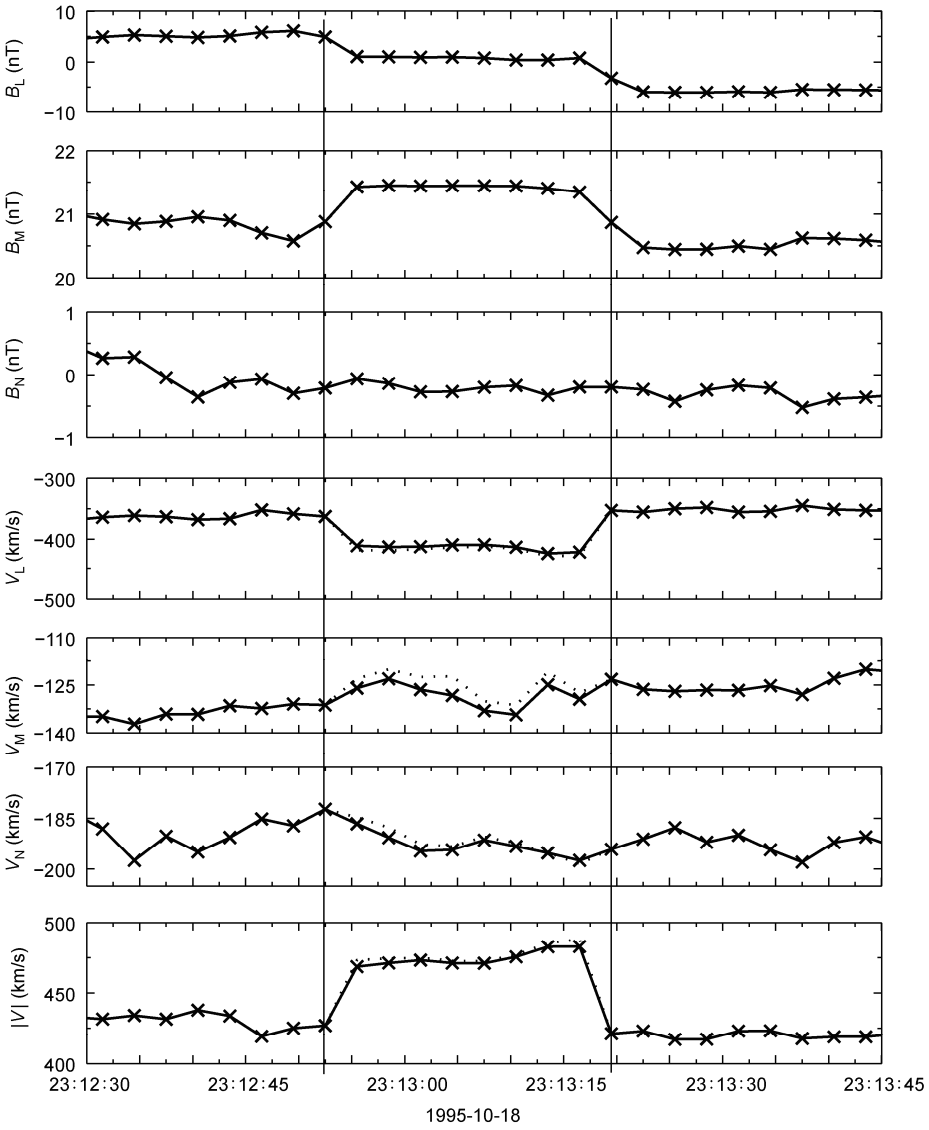


图 2　10 月 18 日 23:12:52~23:13:19 UT 磁场重联出流区事件的磁场和质子速度的变化曲线

其中虚线是利用 Walen 关系得到的重联喷流的理论速度值

该磁场出流事件的持续时间为 27 s, 重联出流前后边界处的磁场夹角为 22.1°. 图 3 给出了 10 月 18 日处于 23:51:52~23:52:28UT 期间的重联出流事件, 该事件是前边界处速度 **V** 和磁场 **B** 正相关, 后边界处速度 **V** 和磁场 **B** 反相关. 由表 1 可以看出, 这些磁云内部的磁场出流事件的持续时间为 24~39 s, 平均持续时间为 30 s; 磁场重联出流区前后边界的磁场的夹角为 4.2°~24.8°, 和以前报道的磁场重联事件比较, 这些事件的前后边界的磁场的夹角较小. 不过, 文献报道的磁云内部的磁场重联事件的前后边界的磁场的夹角往往也很小, Gosling 和 Phan(2013)最近报道的磁云内部磁场重联事件中, 前后边界磁场的夹角仅为 4°.

3 讨论和初步结论

具有较低质子温度是磁云的显著特征, 但是大量的观测资料显示在磁云内部往往存在局部高温现

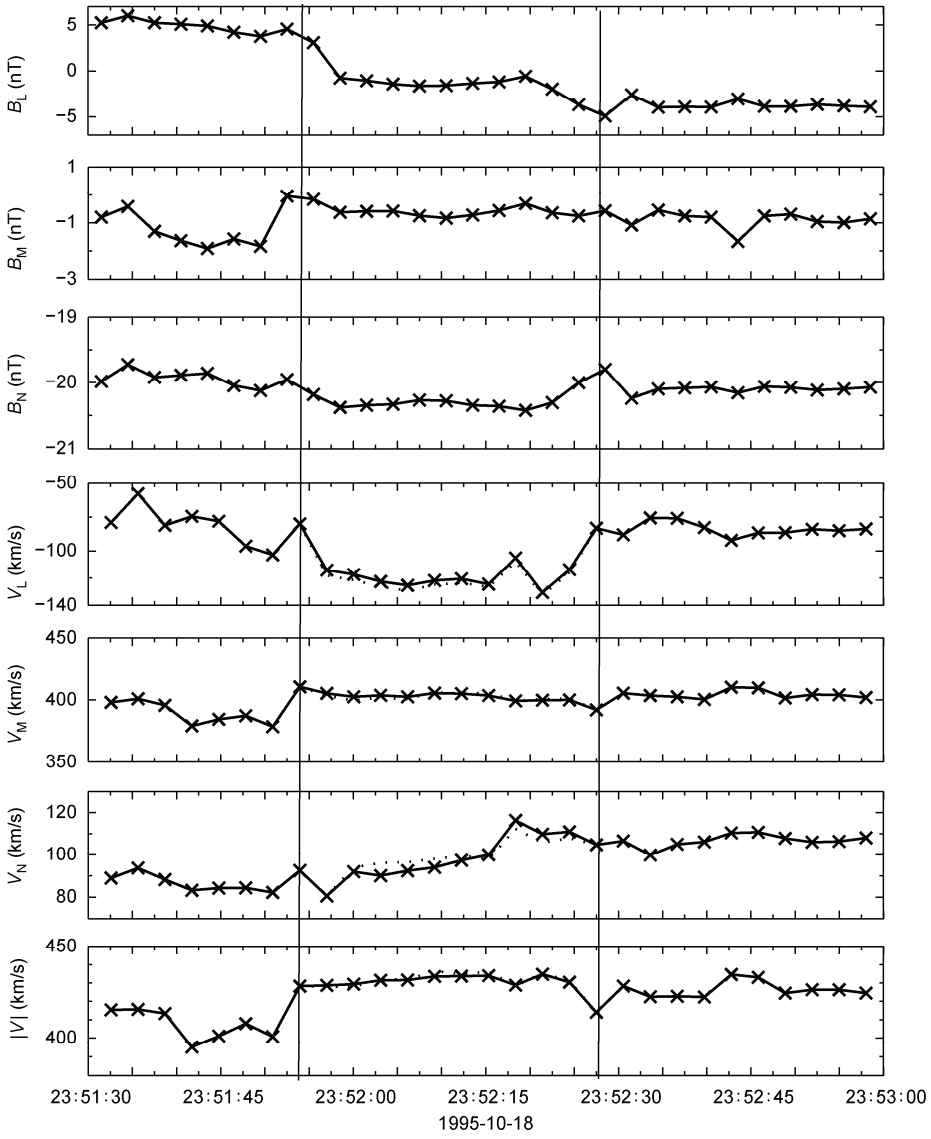


图 3　10 月 18 日 23:51:52~23:52:28 UT 磁场重联出流区事件的磁场和质子速度的变化曲线

其中虚线是利用 Walen 关系得到的重联喷流的理论速度值

象. 磁云作为一个封闭的通量绳结构, 很难和外界进行物质和能量的交换, 所以磁云内部局部高温, 尤其是距离磁云边界较远的高温质子不太可能是通过外部热源加热的. 那么, 磁云内部局部高温的起因很可能有以下两种: (1) 磁云在太阳日冕内被抛出的时候就具有局部的高温现象; (2) 磁云内部局部高温的热源在其内部. 磁云在刚从太阳上抛出的时候就具有局部高温的可能性是存在的, 因为太阳表面观测的日冕物质抛射很多具有典型三分量结构: 亮的外环、低密度暗腔以及暗腔内的高密度亮核(Paschmann 等, 1986). 据我们所知, 日冕物质抛射的这三部分结构具体对应磁云的哪一部分还不清楚, 通常文献认为磁云对应着 CME 的暗腔结构. 我们猜想日冕物质抛射内的高密度亮核也可能对应于行星际磁云内部的局部高温部分. 如果真是如此, 那么磁云内部的局部高温区应该和局部高密度区域一致. 由本文讨论的磁云为例可以看出, 磁云内部的高温区域和高密度区域并不一致. 磁云内部局部高温起因的第一种可能性有待进一步的深入研究.

如果磁云内部局部高温的热源在其内部, 那么磁云内部的磁场重联很可能充当热源的角色. 在最近报道的行星际磁场重联事件中, 很多和 ICME(磁云)相关, 本文以 1995 年 10 月 18~20 日磁云为例, 讨论了磁云内部磁场重联加热局部高温质子的可能性. 该磁云事件持续时间不到 31 h, 而其内部竟然被 Wind 卫星观测到 8 个行星际磁场重联事件, 可见在磁云内部磁场重联的发生率很高, 最近 Gosling 和 Phan(2013)的成果也证明了这一点. 如同 Gosling 和 Phan(2013)指出的, 磁云具有较低的等离子 Beta 值是磁场重联易于在其内部发生的原因. 对比这 8 个磁场重联事件的发生位置, 可以看出大部分发生在磁云内部质子温度凸起的部分. 磁云内部有如此高的磁场重联的发生频率, 而磁云到达 1AU 附近需要 3 天左右, 所以如果磁云刚抛离太阳日冕时具有较低的质子温度, 在 3 天的时间内局部区域的质子被磁场重联加热的可能性是很大的. 另外, 在文献报道的磁云内部的磁场重联事件中, 磁场重联的位置也往往处在质子局部高温区域, 如 Gosling 等(2007)给出的 ACE 卫星在 1998 年 11 月 13~15 日磁云事件中就有几个磁场重联事件发生在其内部质子温度凸起的部分, 其他文献也有同样的观测事例(Xu 等, 2011), 这和我们结果也是一致的. 但是, 磁云内有很多局部高温的地方可能没有观测到磁场重联, 这些质子温度异常区的原因是否是磁场重联? 我们认为这些没有观测到磁场重联的局部高温区仍然有可能是磁场重联引起的, 只不过磁场重联过程已经结束, 磁场重联对当地质子的加热已经结束. 还有可能磁场重联正在进行, 由于卫星穿越位置不同, 没有能探测到近似的阿尔芬喷流(加速流或减速流), 所以相应的观测不能满足我们使用的磁场重联判据. 退一步讲, 如 Wang 等(2012)指出的, 没有观测到阿尔芬喷流并不意味着不存在磁场重联, 阿尔芬喷流的判断标准不一定完备. 另外, 如今在磁云内部观测的磁场重联出流区的尺度比较小(时间尺度为 s), 磁云内部如何产生持续稳定的磁场重联条件从而对质子持续稳定的加热? 我们将在以后的工作中分析大量磁云实例, 结合数值模拟探索磁云内部磁场重联加热质子的具体过程.

参考文献

Burlaga L F, Sittler E, Mariani F, et al. 1981. Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, helios, and IMP 8 observations. J Geophys Res, 86: 6673–6684

Burlaga L F. 1988. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. J Geophys Res, 93: 7217–7224

Cane H V, Richardson I G. 2003. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002. J Geophys Res, 108: 1156, doi: 10.1029/2002JA009817

Feng H Q, Wu D J, Chao J K. 2006. Identification of configuration and boundaries of interplanetary magnetic clouds. J Geophys Res, 111: A07S90

Feng H Q, Wu D J, Chao J K. 2007. Size and energy distributions of interplanetary magnetic flux ropes. J Geophys Res, 112: A02102

Feng H Q, Wu D J, Lin C C, et al. 2008. Interplanetary small- and intermediate-sized magnetic flux ropes during 1995–2005. J Geophys Res, 113: A12105

Feng H Q, Wang J M, Wu D J. 2012. The evidence for the evolution of interplanetary small flux ropes: Boundary layers. Chin Sci Bull, 57: 1415–1420

Feng X S, Hu Y Q, Wei F S. 2006. Modeling the resistive MHD by the CESE method. Sol Phys, 235: 235–257

Gosling J T, Eriksson S, McComas D J, et al. 2007. Multiple magnetic reconnection sites associated with a coronal mass ejection in the solar

wind. J Geophys Res, 112: A08106
Gosling J T, Skoug R M, McComas D J, et al. 2005. Direct evidence for magnetic reconnection in the solar wind near 1 AU. J Geophys Res, 110: A01107
Gosling J T, Phan T D. 2013. Magnetic reconnection in the solar wind at current sheets associated with extremely small field shear angles. Astrophys J, 763: L39
Hu Y Q, Feng X S. 2006. Numerical study for the bursty nature of spontaneous fast reconnection. Sol Phys, 238: 329–345
Lepping R P, Burlaga L F, Jones J A. 1990. Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1 AU. J Geophys Res, 95: 11957–11965
Lepping R P, Narock T W, Wu C C. 2009. A scheme for finding the front boundary of an interplanetary magnetic cloud. Ann Geophys, 27: 1295–1311
Li H J, Feng X S, Xiang J, et al. 2013. New approach for solving the inverse boundary value problem of Laplace's equation on a circle: Technique renovation of the Grad-Shafranov (GS) reconstruction. J Geophys Res, 118: 2876–2881
Lu H Y, Cao J B. 2011. Evolution of symmetric reconnection layer in the presence of parallel shear flow. Phys Plasmas, 18: 072903
Lyon J G, Brecht S H, Huba J D, et al. 1981. Computer simulation of a geomagnetic substorm. Phys Rev Lett, 46: 1038–1041
Nakagawa T, Matsuoka A. 2010. Fitting a toroidal force-free field to multispacecraft observations of a magnetic cloud. J Geophys Res, 115: 10113
Owens M J. 2009. The formation of large-scale current sheets within magnetic clouds. Sol Phys, 260: 207–329
Paschmann G, Papamastorakis W, Baumjohann N, et al. 1986. The magnetopause for large magnetic shear: AMPTE/IRM observations. J Geophys Res, 91: 11099–11115
Parker E N. 1963. Kinematical hydromagnetic theory and its application to the low solar photosphere. Astrophys J, 138: 552–575
Petschek H E. 1964. Magnetic field annihilation. Washington D C: NASA Special Publication. 50: 425
Ruffenach A, Lavraud B, Owens M J, et al. 2012. Multispacecraft observation of magnetic cloud erosion by magnetic reconnection during propagation. J Geophys Res, 117: A09101
Sweet P A. 1958. The production of high energy particles in solar flares. Nuovo Cimento, 8(Suppl): 188
Vandas M, Romashets E P. 2003. A force-free field with constant alpha in an oblate cylinder: A generalization of the Lundquist solution. Astron Astrophys, 398: 801–807
Wang Y, Wei F S, Feng X S, et al. 2010. Energetic electrons associated with magnetic reconnection in the magnetic cloud boundary layer. Phys Rev Lett, 105: 195007
Wang Y, Wei F S, Feng X S, et al. 2012. Variations of solar electron and proton flux in magnetic cloud boundary layers and comparisons with those across the shocks and in the reconnection exhausts. Astrophys J, 749: 82
Wang Y M, Wang S, Ye P Z. 2002. Multiple magnetic clouds in interplanetary space. Sol Phys, 211: 333–344
Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2003a. Multiple magnetic clouds: Several examples during March–April 2001. J Geophys Res, 108: 1370
Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2003b. An interplanetary cause of large geomagnetic storms: Fast forward shock overtaking preceding magnetic cloud. Geophys Res Lett, 30: 1700
Wang Y M, Ye P Z, Wang S, et al. 2003c. Theoretical analysis on the geoeffectiveness of a shock overtaking a preceding magnetic cloud. Sol Phys, 216: 295–310
Wang Y M, Zheng H N, Wang S, et al. 2005. MHD Simulation on formation and propagation of multiple magnetic clouds in the heliosphere. Astron Astrophys, 434: 309
Wei F S, Feng X S, Yang F, et al. 2006. A new non-pressure-balanced structure in interplanetary space: Boundary layers of magnetic clouds. J Geophys Res, 111: A03102
Wei F S, Liu R, Fan Q L, et al. 2003a. Identification of the magnetic cloud boundary layers. J Geophys Res, 108: 1263
Wei F S, Liu R, Feng X S, et al. 2003b. Magnetic structures inside boundary layers of magnetic clouds. Geophys Res Lett, 30: 2283
Wei F S, Hu Q, Feng X S, et al. 2003c. Magnetic reconnection phenomena in interplanetary space. Space Sci Rev, 107: 107–110
Wu D J, Chao J K, Lepping R P. 2000. Interaction between an interplanetary magnetic cloud and the Earth's magnetosphere: Motions of the bow shock. J Geophys Res, 105: 12627–12638
Xiong M, Zheng H N, Wang S. 2009. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness: 2. Oblique collision. J Geophys Res, 114: A11101
Xiong M, Zheng H N, Wu S T, et al. 2007. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness. J Geophys Res, 112: A11103
Xu X, Wei F S, Feng X. 2011. Observations of reconnection exhausts associated with large-scale current sheets within a complex ICME at 1 AU. J Geophys Res, 116: A05105
Yan T, Lee L C, Priest E R. 1992. Fast magnetic reconnection with small shock angles. J Geophys Res, 97: 8277
Zuo P B, Wei F S, Feng X S, et al. 2007. The Relationship between the magnetic cloud boundary layer and the substorm expansion phase. Sol Phys, 242: 167