中国科学: 地球科学 2016 年 第 46 卷 第 4 期: 563 ~ 568
SCIENTIA SINICA Terrae earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

磁云内局部高温现象和太阳的观测关系

王杰敏, 冯恒强*

洛阳师范学院空间物理研究所, 洛阳 471022
* 通讯作者, E-mail: fenghq9921@163.com

收稿日期: 2015-10-04; 接受日期: 2016-01-20; 网络版发表日期: 2016-03-23
国家自然科学基金项目(批准号: 41274180, 41231068)和河南省高校科技创新项目(编号: 13IRTSTHN02)资助

摘要 在磁云内部常常观测到反常高的重离子电离态, 这些增加的重离子高价电离成分可以揭示其源区的温度特性. 利用 ACE 卫星数据检查了 1998 年 2 月至 2008 年 12 月期间的 74 个磁云事件, 发现 14 个磁云事件的内部具有明显的局部高温质子区. 通过对这些高温区域内部质子温度与 O^7/O^6 比值和铁平均电离态⟨Fe⟩进行相关性分析发现: 9 个磁云事件内部高温区域的质子温度和 O^7/O^6 比值或铁平均电离态⟨Fe⟩具有一定的相关性, 其余 5 个磁云事件内高温区域的质子温度与 O^7/O^6 比值和铁平均电离态都没有明显的相关性. 这表明 9 个磁云事件内部的高温现象起源于太阳.

关键词 磁云, 离子电离态, 高温质子

1 引言

磁云(Magnetic Cloud)是行星际日冕物质抛射(Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME)的一个重要子集, 在行星际空间经常被探测到. 在ICME中, 磁云所占比例约为30~40%, 并且随着太阳活动周期发生相应的变化: 在太阳活动极小年附近, 磁云所占比例较大(约为79%), 到太阳活动极大年附近慢慢下降到20%左右(Bothmer和Schwenn, 1996; Marubashi, 2000; Richardson和Cane, 2004a). 磁云具有较强的磁场, 相对较低的质子温度和等离子体β值, 磁场方向发生平滑旋转三个显著观测特征(Burlaga等, 1981). 磁云的局部磁场位形(即在1 AU处卫星观测到的当地磁场位形)可以近似表示为无力场通量绳, 在1 AU处, 磁云作为磁通量绳的直径大约是0.2~0.4 AU (Lepping等, 1990; Li 等, 2013; Nakagawa和Matsuoka, 2010). 由于磁云具有这种简单稳定的磁通量绳结构, 它们很可能带有CME在太阳上爆发时的信息, 而且其特殊的磁场结构往往能够产生较强地磁效应(Wang等, 2003a, 2003b; Wu等, 2000; Xiong等, 2007, 2009; Zuo等, 2007). 所以研究磁云对于研究CME的爆发机制, 以及日地联系和空间天气学都具有很大的意义.

如上所述, 低的质子温度是磁云的显著观测特征, 大量的观测事实表明在磁云内部往往会出现局部高温现象. 我们的前期研究讨论了这些局部高温

中文引用格式: 王杰敏, 冯恒强. 2016. 磁云内局部高温现象和太阳的观测关系. 中国科学: 地球科学, 46: 563–568, doi: 10.1360/N072015-00264
英文引用格式: Wang J M, Feng H Q. 2016. Observational connection between local high-temperature phenomena within magnetic clouds and the Sun. Science China Earth Sciences, 59: 1051−1056, doi: 10.1007/s11430-016-5275-y

© 2016《中国科学》杂志社

质子的加热机制(冯恒强和王杰敏, 2014). 由于磁云具有封闭的通量绳结构, 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不太可能是通过外部热源加热的. 于是, 冯恒强和王杰敏(2014)给出了两种引起磁云内部局部高温的可能: (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, 并以1995年10月18~20日磁云为例, 讨论了第二种可能, 即磁云内部局部高温质子区域是由内部的磁场重联加热. 该磁云事件持续时间不到31h, 在其内部确认了8个行星际磁场重联事件, 且这8个磁场重联事件多数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, 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. 那么第一种可能性是否存在? 本文将分析1998~2008年ACE卫星观测到的14个内部存在明显地局部高温质子区的磁云事件, 讨论磁云内部局部高温现象来源于太阳的可能性.

2 方法与数据

众所周知, 磁云内部常常出现反常的等离子体成份特征, 如氦与质子比的增高, 某些离子(如铁)丰度的增加, 出现O^7/O^6电离态比值大于1等(Henke等, 1998; Lepri和Zurbuchen, 2004; Richardson和Cane, 2004b). 当太阳风离开日冕后会快速膨胀, 使离子和电子的碰撞时间尺度变长, 当平衡时间大于传播时间时, 可以认为各种粒子所占的比例不变(冻结), 因而磁云内部的反常等离子成份特征可以揭示其源区原始化学成份和温度等特性. 那么, 如果磁云内部的局部高温质子现象是来源于太阳, 我们是否可以通过检查重离子的电离成份找到一些相关的痕迹? 铁元素的平均电离态⟨Fe⟩和O^7/O^6电离态比值可以反映铁元素和氧元素的电离情况, 它们的高低大概反映了起源区温度的高低. 另外, O^7/O^6电离态比值大于1和铁元素的平均电离态⟨Fe⟩大于12都是很好的认证磁云的标志, 且太阳风中的氧元素和铁元素的高电离态($O^7/O^6>1$, ⟨Fe⟩>12)基本上都和ICME相关(Burlaga等, 2001; Lepri等, 2001; Lepri和Zurbuchen, 2004). 但并不是所有的ICME(或磁云)都会出现高电离态的铁和氧. 内部出现高电离态的铁和氧的ICME源区多数都和耀斑有很好的相关性, 这说明ICME在太阳上的高温热源很可能是耀斑(Reinard, 2005).

本文利用ACE卫星搭载的太阳风离子成份谱仪(Solar Wind Ion Composition Spectrometer, SWICS)记录的分辨率为1小时的O^7/O^6比值和⟨Fe⟩数据, 分析磁云内部局部高温质子区和高电离态的铁和氧关系. 由于ACE卫星的离子成分数据是1998年2月开始可以使用, 我们参考Feng等(2010)的磁云列表和Richardson 和Cane给出的ACE卫星观测到ICME列表(http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm), 利用ACE卫星数据检查了自1998年2月至2008年12月期间的74个磁场旋转特征明显的磁云事件, 发现14个磁云事件内部具有明显的高温现象. 表1的第二、三列分别给出了这14个磁云事件的前后边界; 第四列给出了相应磁云内部高温区域的具体时间范围; 第五、六列分别给出高温区内质子温度与O^7/O^6比值和铁平均电离态⟨Fe⟩的相关性. 接下来我们将具体分析这14个事件内部高温显现与氧和铁电离成份的相关性.

3 观测分析

作为事例, 图1给出了ACE卫星在2000年7月28~29日观测到磁云事件的磁场和等离子体参数, 其中用FB和RB标注的两条竖直实线分别是我们给出的磁云的前后边界。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x、y、z分量(B_x、B_y、B_z), 质子密度(N), 质子温度(T), O^7/O^6电离态比及铁平均电离态⟨Fe⟩. 由图1可以看出在7月28日05:45UT附近有一个前导激波, 该事件具有相对较高的磁场强度, 该事件总的磁场强度是前高后低, 没有出现磁云常见的中间高两边低的磁场特征, 但是该事件磁场方向发生大角度平滑旋转的特征很明显. 由图1还可以看出, 该磁云事件的质子温度总体偏高, 而且在28日19:00UT附近温度曲线开始缓慢上升, 在21:30UT附近到达最大, 随后缓慢下降并在29日00:30 UT降到最低. 由图1的O^7/O^6比值曲线可以看出在28日19:00UT和29日00:30UT之间有一个和质子温度曲线的轮廓几乎一致的凸起. 在该凸起区域, O^7/O^6比值由0.99上升到4.58. 另外由表1可以看出, 在高温区域内质子温度和O^7/O^6比值的相关性为0.904. 现在来看铁平均

表 1　磁云内高温区域内质子温度与 O^7/O^6 和⟨Fe⟩的相关性

事件序号	磁云前边界(UT)	磁云后边界(UT)	质子高温区间(UT)	O^7/O^6	⟨Fe⟩
01	1998-08-20, 05:00	1998-08-21, 22:00	1998-08-20, 05:00~14:00	0.616	0.076
02	1998-10-19, 03:00	1998-10-20, 07:00	1998-10-19, 14:10~01:20	0.378	0.094
03	2000-07-28, 13:00	2000-07-29, 09:00	2000-07-28, 19:00~00:30	0.904	0.423
04	2001-04-04, 18:00	2001-04-05, 18:00	2001-04-04, 22:00~02:15	0.326	0.404
05	2001-10-31, 21:00	2001-11-01, 18:00	2001-11-01, 02:00~06:15	0.641	0.139
06	2002-03-19, 06:00	2002-03-20, 13:00	2002-03-19, 16:00~02:00	0.577	0.323
07	2002-09-30, 22:00	2002-10-01, 20:00	2002-09-30, 21:50~06:15	0.495	0.101
08	2003-08-18, 03:00	2003-08-19, 12:00	2003-08-18, 14:00~18:30	0.113	0.654
09	2005-02-20, 12:00	2005-02-22, 07:00	2005-02-21, 09:30~12:30	0.964	0.221
10	2005-05-29, 09:00	2005-05-30, 23:00	2005-05-29, 14:40~01:20	0.680	0.368
11	2005-06-15, 06:00	2005-06-15, 09:00	2005-06-15, 06:00~10:30	0.490	0.649
12	2005-12-31, 06:00	2006-01-01, 15:00	2005-12-31, 12:30~14:45	0.858	0.062
13	2006-04-13, 15:00	2006-04-14, 12:00	2006-04-14, 05:45~12:00	0.471	0.634
14	2006-11-29, 05:00	2006-11-30, 06:00	2006-11-29, 10:00~13:00	0.364	0.033

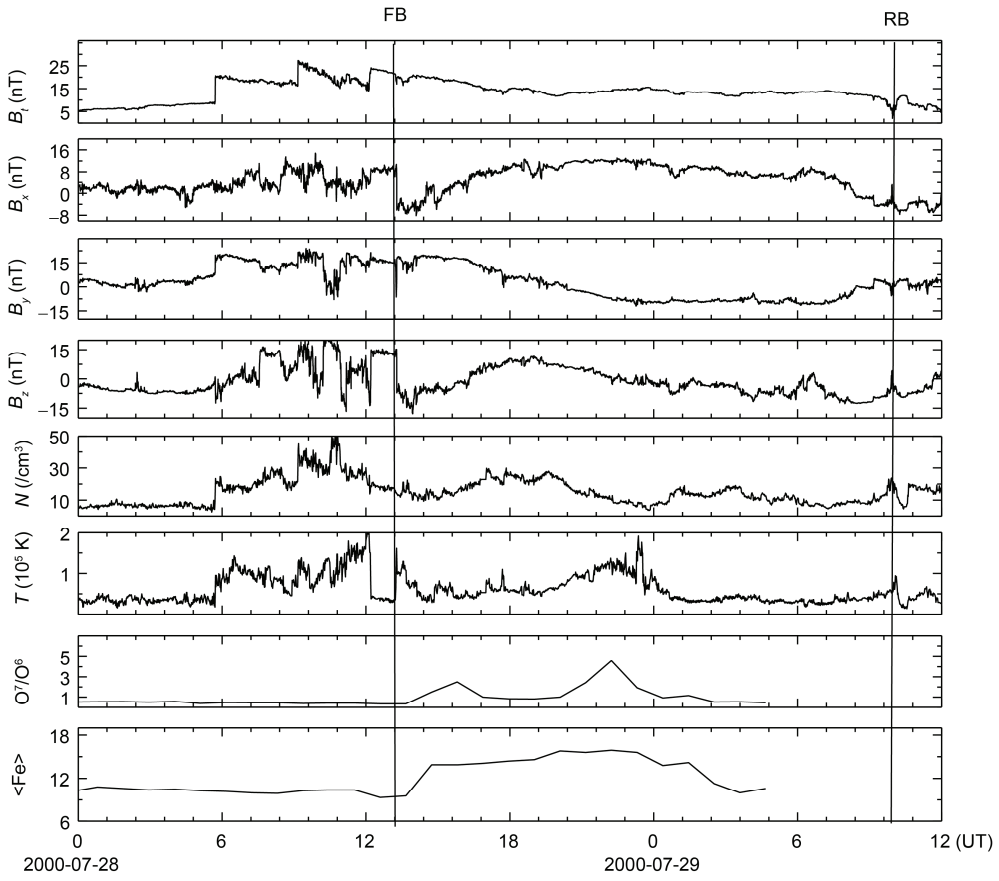

图 1　2000 年 7 月 28~29 日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数(GSE 坐标系)

电离态⟨Fe⟩曲线, 虽然在28日19:00UT和29日00:30 UT之间没有像温度曲线和O^7/O^6的比值曲线那样有一个明显凸起, 且该区域内质子温度和⟨Fe⟩的相关性只有0.423, 但是⟨Fe⟩曲线在这段时间内也存在明显上升, 并在28日21:30UT附近到达最大值15.9. 如此高的O^7/O^6比值和⟨Fe⟩在太阳风中是很罕见的, 其应该起源于太阳上的高温区域, 很可能和耀斑爆发相关. 由前面的介绍可知, O^7/O^6比值和⟨Fe⟩在太阳风里

是被冻结的, 它们的高低大概反映了起源区温度的高低. 所以, 该事件内部的局部高温现象很可能来源于太阳表面的爆发活动. 另外, 由图1还可以发现O^7/O^6比值曲线在前端也有一个小的凸起, 该事件的温度曲线在相应位置也有一个小的凸起, 只不过不是特别明显.

图2给出了ACE卫星在1998年8月19~21日观测到的磁云事件. 由图2可以看出该事件具有典型的磁场强度增强, 磁场方向发生大角度平滑旋转等特性. 由于该事件的质子密度和温度数据只有部分是可用的, 所以不能看出该事件整体的温度曲线情况. 但是通过质子温度曲线可以清楚的看到在该磁云的前边界到8月20日14:00UT附近有一个明显的温度凸起区. 尽管这个磁云事件内O^7/O^6比值总体偏低, 在整个磁云事件内部没有出现$O^7/O^6>1$的情况, 但是在和质子温度凸起对应处也出现了相似的凸起轮廓曲线, 表明该区域的质子温度和O^7/O^6比值具有一定的相关性, 其相关系数为0.616. 这表明该区域在太阳源区就可能具有相对较高的温度. 另外, 这个事件的⟨Fe⟩曲线在相应位置没有显示出特别地变化, 从相关性分析上来看两者不具有相关性, 其相关系数为0.076. 图3给出了1998年10月18~20日磁云事件的磁场和等离子体参的数变化曲线. 由图3可以看出, 该事件在10月19日14:10UT至20日01:20UT之间有一个明显的温度凸起区, 该区域内质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩的相关性只有0.378和0.094. 但是这也不能排除该事件的高温现象起源于太阳的可能性, 因为在该区域O^7/O^6比值和⟨Fe⟩曲线都明显地增加, 只不过在19日21:00UT附近有一个下凹区. 回头看这个事件的温度曲线可以发现几乎在同样的位置也有一个下凹区. 这表明该事件局部高温区的质子温度和O^7/O^6比值与⟨Fe⟩存在相关性. 另外, 磁云内部温度会受到传播效应的影响而发生很大变化. 磁云在由太阳到地球附近的传播过程中, 由于其内部具有较高的压强而快速膨胀, 这会造成其内部的质子温度快速下降. 而磁云内部各处的膨胀速度并不一定一致, 以至于磁云

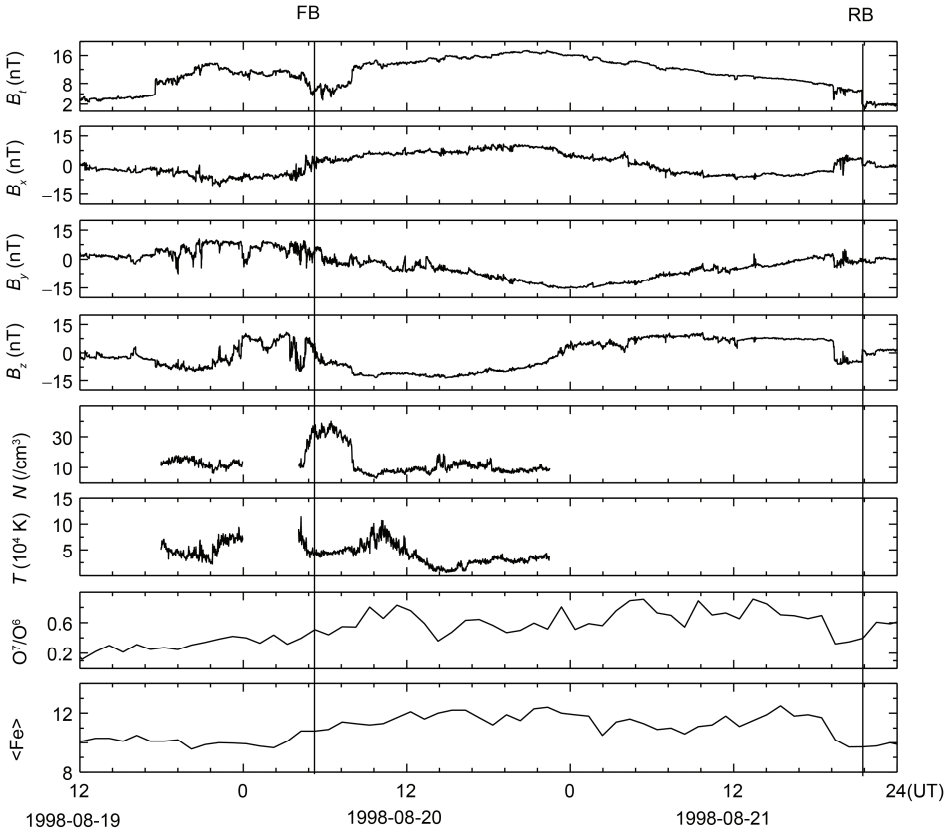

图 2　1998 年 8 月 19~21 日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数

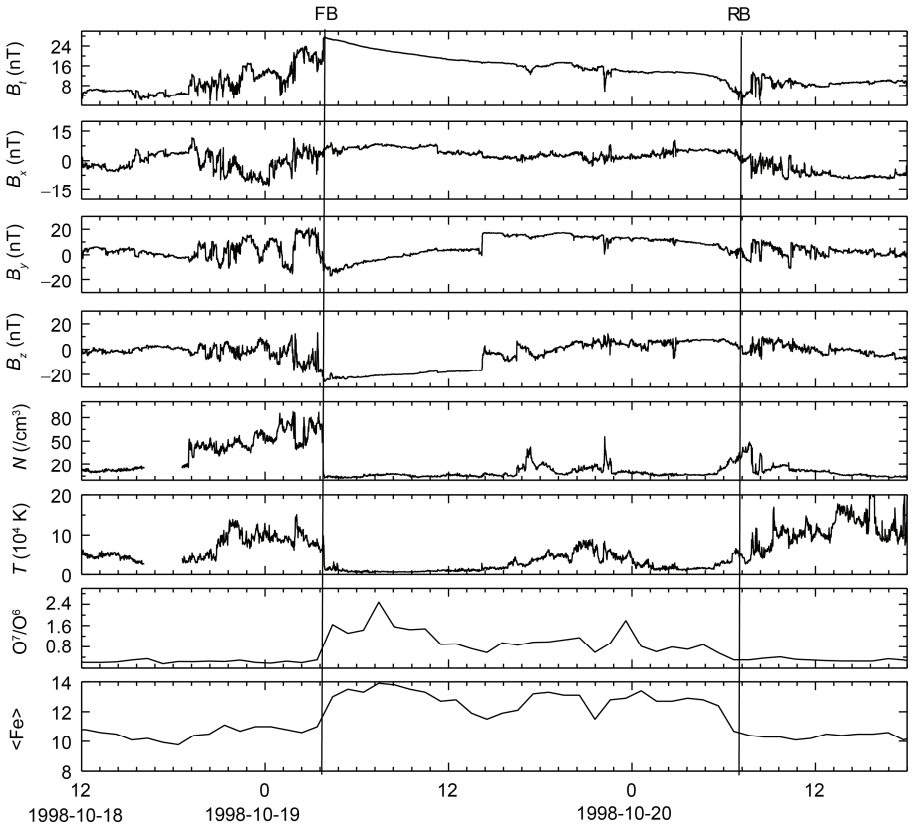

图 3　1998 年 10 月 18~20 日磁云事件的太阳风磁场和等离子体参数

内各部分温度的变化情况并不一致而使其不能保持原来的温度曲线轮廓, 如果氧和铁元素的电离成份是“冻结”的, 磁云内O^7/O^6比值与⟨Fe⟩的高低不会因为磁云的膨胀而发生变化. 所以, 该磁云事件内的高温现象也可能起源于太阳, 也可能有其他的起因. 另外, 在10月19日03:00~12:00UT之间有一个很明显的O^7/O^6比值和⟨Fe⟩曲线的凸起区, 但是在对应时间段并没有观测到质子温度升高的现象, 这有可能是因为该区域磁压更强导致这部分区域膨胀更为明显, 进而使其温度下降较快所致.

表1给出了14个内部具有明显高温现象的磁云事件中高温区内质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩的相关性. 由表1可以看出: (1) 同一磁云事件高温区域内质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩的相关性并不一致; (2) 有9个磁云事件高温区域内表现出质子温度和O^7/O^6比值(或⟨Fe⟩)具有较好的相关性(相关系数大于0.6), 其中6个事件和O^7/O^6比值相关, 3个事件和⟨Fe⟩相关; (3) 有5个磁云事件高温区域内质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩都没有明显的相关性.

4　讨论和初步结论

在ICME内部经常观测到反常的等离子成份特征, 如氦丰度的增加, 铁、氧和碳元素的高阶电离成份的增加等. 这些反常的等离子体成份可能包含了太阳风源区CME形成环境的“痕迹”. 如ICME内部高电离的铁和氧被认为是太阳上和CME相关的耀斑加热的结果(Reinard, 2005). 如果磁云在刚从太阳上被抛出的时候就存在局部高温区, 那么该区域应该保留有铁和氧等重元素的高价电离成分的“痕迹”. 我们利用ACE卫星数据检查了自1998年2月至2008年12月期间的74个事件, 发现14个磁云事件的内部具有明显的局部质子高温区. 通过分析这些事件内部质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩相关性发现: 大部分磁云事件高温区域内的质子温度和O^7/O^6比值或⟨Fe⟩具有一定的相关性(相关系数大于0.6), 在同一个磁云事

件内O^7/O^6比值曲线和⟨Fe⟩曲线往往不一致; 少部分磁云事件高温区域内质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩都没有明显的相关性. 这表明部分磁云内部的高温现象源于太阳, 至于O^7/O^6比值曲线和⟨Fe⟩曲线同一事件内会相差很大, 这些差别可能是在CME形成初期就存在, 因为CME的形成过程和环境都很复杂, 冻结机制虽然能够很好地适用于冕洞中的快速太阳风流, 但是不一定很好地适用于CME. 由于并不是所有磁云事件内高温区域的质子温度与O^7/O^6比值和⟨Fe⟩都存在明显的相关性, 这些事件内部的高温现象可能具有其他的成因, 如我们前期工作中提出的磁场重联, 还有等离子体波动都可能加热质子. 我们检查了这14个磁云事件内高温区域中ACE卫星观测到的磁场和等离子体数据, 只在表1中第1个磁云事件内1998年08月20日05:18~05:25UT和第10个事件内2005年05月29日16:28~16:33UT发现了磁场重联喷流结构, 由此可见这些高温现象的主要起因可能不是磁场重联. 至于这些事件是否是由等离子体波加热或者其他因素, 我们将在以后的工作中继续深入研究造成磁云内局部高温现象的原因.

参考文献

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

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

Burlaga L F, Skong R M, Smith C W, Webb D F, Zurbuchen T H, Reinard A. 2001. Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998–1999. J Geophys Res, 106: 20957– 20978

Bothmer V, Schwenn R. 1996. Signatures of fast CMEs in interplanetary space. Adv Space Res, 17: 319–322

Feng H Q, Wu D J, Chao J K, Lee L C, Lyu L H. 2010. Are all leading shocks driven by magnetic clouds? J Geophys Res, 115: A04107

Henke T, Woch J, Mall U, Livi S, Wilken B, Schwenn R, Gloeckler G, von Steiger R, Forsyth R J, Balogh A. 1998. Differences in the O^{7+}/O^{6+} ratio of magnetic cloud and non-cloud coronal mass ejections. Geophys Res Lett, 25: 3465–3468

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

Lepri S T, Zurbuchen T H, Fisk L A, Richardson I G, Cane H V, Gloeckler G. 2001. Iron charge distribution as an identifier of interplanetary coronal mass ejections. J Geophys Res, 106: 29231–29238

Lepri S T, Zurbuchen T H. 2004. Iron charge state distributions as an indicator of hot ICMEs: Possible sources and temporal and spatial variations during solar maximum. J Geophys Res, 109: A01112

Li H J, Feng X S, Xiang J, Zuo P B. 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

Marubashi K, 2000. Physics of interplanetary magnetic flux ropes: Towards prediction of magnetic storms. Adv Space Res, 26: 55–66

Nakagawa T, Matsuoka A. 2010. Fitting a toroidal force-free field to multispacecraft observations of a magnetic cloud. J Geophys Res, 115: A10113

Reinard A. 2005. Comparison of Interplanetary CME Charge State Composition with CME-associated Flare Magnitude. Astrophys J, 620: 501–505

Richardson I J, Cane H V. 2004a. The fraction of interplanetary coronal mass ejections that are magnetic clouds: Evidence for a solar cycle variation. Geophys Res Lett, 31: L18804

Richardson I J, Cane H V. 2004b. Identification of interplanetary coronal mass ejections at 1 AU using multiple solar wind plasma composition anomalies. J Geophys Res, 109: A09104

Wang Y M, Ye P Z, Wang S, Xue X H. 2003a. 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, Xiong M. 2003b. Theoretical analysis on the geoeffectiveness of a shock overtaking a preceding magnetic cloud. Sol Phys, 216: 295–310

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, Wang Y M, Wang S. 2007. Magnetohydrodynamic simulation of the interaction between two interplanetary magnetic clouds and its consequent geoeffectiveness. J Geophys Res, 112: A11103

Zuo P B, Wei F S, Feng X S, Yang F. 2007. The Relationship between the magnetic cloud boundary layer and the substorm expansion phase. Sol Phys, 242: 167–185