

对一个太阳风暴及其行星际和地磁效应的研究*

邱柏翰 李川[†]

(南京大学仙林校区天文与空间科学学院 南京 210046)

摘要 对一个爆发于2014年1月7日的太阳风暴进行了研究, 通过对太阳活动的多波段遥感观测—来自于太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)以及太阳和日球天文台(Solar and Heliospheric Observatory, SOHO), 分析了耀斑和日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME)的爆发过程. 通过地球同步轨道环境业务卫星(Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES)对高能质子以及日地L1点的元素高级成分探测器(Advanced Composition Explorer, ACE)对当地等离子体环境的就位观测, 分析了伴随太阳风暴的太阳高能粒子(solar energetic particle, SEP)事件和行星际CME (ICME)及其驱动的激波. 通过地面磁场数据分析了该太阳风暴对地磁场的影响. 研究表明: (1) 耀斑脉冲相的开始时刻和CME在日面上的抛射在时序上一致. (2) 高能质子主要源于CME驱动的激波加速, 并非源于耀斑磁重联过程. 质子的释放发生在CME传播到7.7个太阳半径的高度的时刻. (3) 穿过近地空间的行星际激波鞘层的厚度和ICME本身的厚度分别为0.22 au和0.26 au. (4) 行星际激波和ICME引起了多次地磁亚暴和极光, 但没有产生明显的地磁暴. 原因在于ICME没有包含一个规则的磁云结构或明显的南向磁场分量.

关键词 日地关系, 太阳: 耀斑, 太阳: 日冕物质抛射

中图分类号: P 182; **文献标识码:** A

1 引言

一个典型的空间天气过程是由太阳活动开始, 通过耀斑爆发和日冕物质抛射等形式向外传递能量和物质(比如全波段的电磁辐射、高能粒子、磁化等离子云等), 这些电磁辐射、高能粒子和等离子体物质在行星际空间传播并且和行星际介质、地磁场相互作用, 进而影响到整个日地之间的空间环境^[1-2], 这样一个剧烈的空间天气过程被称为太阳风暴. 太阳风暴是绝大多数空间天气的驱动源, 而由此产生的空间天气变化会影响到依赖于高空环境和在其中运行的空间飞行器所进行的活动(比如导航、通讯、深空探测

2014-06-23收到原稿, 2014-08-19收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303017)、江苏省自然科学基金项目(BK2012299)和973项目(2014CB744203)资助

[†]lic@nju.edu.cn

等), 也会对宇航员和高空飞行员的身体健康产生危害. 由空间天气导致的地磁场扰动还能影响到地面上的长距离电力和油气输运, 严重的太阳风暴甚至能够影响到在大气层之下、远离深空的普通人类正常的生产生活甚至生理健康.

太阳风暴中的耀斑和CME是最为显著的爆发现象, 二者的物理联系从耀斑触发说到CME触发说讨论了很久^[3-5]. Zhang等人利用SOHO/LASCO/EIT的观测对CME从开始、加速、传播的整个过程进行了运动学分析^[4], 并与耀斑的X射线流量做比较, 发现CME的初始缓慢抬升过程对应了耀斑的脉冲相之前的缓变上升相, CME的迅速加速过程对应了耀斑的脉冲相, 耀斑脉冲相结束后CME的加速过程也停止了. 他们的结论是二者不是简单的谁触发谁的问题, 而应该是紧密联系在一起, 都是日冕磁场能量释放过程的表现.

耀斑磁重联区和CME驱动的激波是太阳高能粒子(SEPs)的主要加速源. 目前认为小的脉冲型SEP事件来源于耀斑活动, 而大的缓变型事件主要是CME驱动的激波所加速. 但二者的区别并不明显, 尤其在一些大型事件中, 既包含脉冲型的成分也包含缓变型的成分. 因此, SEPs的加速源区问题仍是一个待解决的热点问题^[6-8].

当CME传播到行星际空间时, 其本身和由其驱动的激波可以引起近地空间环境的扰动(除此之外, 冕洞和共转相互作用区也对空间环境有重要影响^[9]). 尤其当它们与地磁场相互作用, 可以产生一系列地磁效应, 如极光、地磁亚暴、地磁暴等^[10]. 然而激波和ICME对地磁活动影响的重要性孰大孰小, 以及什么样的激波和ICME参数更有利于产生地磁亚暴或地磁暴, 这些问题还有待于进一步认证.

本文分析了一个爆发于2014年1月7日的太阳风暴. 从其太阳表面的产生、在行星际空间的传播以及对地磁场的影响整个过程做了分析, 以期能够对SEPs的加速源区、ICME和激波对地磁场影响的重要性等问题做出认证.

2 数据来源

文中对太阳活动的多波段遥感观测来自于太阳动力学天文台以及太阳和日球天文台. 其中SDO上的Atmospheric Imaging Assembly (AIA)提供了耀斑爆发的远紫外成像观测, SOHO上的Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO)日冕仪提供了CME的白光成像观测.

对太阳质子事件的探测来自于地球同步轨道环境业务卫星(GOES). 在地球同步轨道的高度, 地磁场对能量高于10 MeV的太阳质子影响较小. 此外, GOES卫星也提供了耀斑爆发的软X射线流量的数据.

对ICME和行星际激波的认证来自于日地L1点的元素高级成分探测器对等离子体环境的测量. 地磁场的测量数据来自于全球地磁场数据中心(World Data Center for Geomagnetism, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>).

3 耀斑和CME

2014年1月7日位于日面S12W08的太阳活动区11943在18:06UT—19:12UT爆发了一个X1.2级的耀斑. 图1显示了SDO/AIA在18:30UT左右耀斑峰值过后的4个波段的观

测(分别为1 700 Å、304 Å、171 Å和94 Å),其中1 700 Å 为光球的连续谱辐射,可以看出明显的增亮,在一定程度上反映了该耀斑是白光耀斑^[11]. 304 Å和171 Å 为色球和过渡区的中高温辐射,反映了耀斑过程中非热粒子撞击和加热低层大气的过程(尤其是304 Å). 而94 Å是耀斑活动区的高温谱线(特征温度为 6.3×10^6 K),可以明显看出一个耀斑后环的结构. 多波段的观测表明该耀斑是一个典型的双带耀斑,其爆发过程在各个温度和太阳的各个层次均有显著表现.

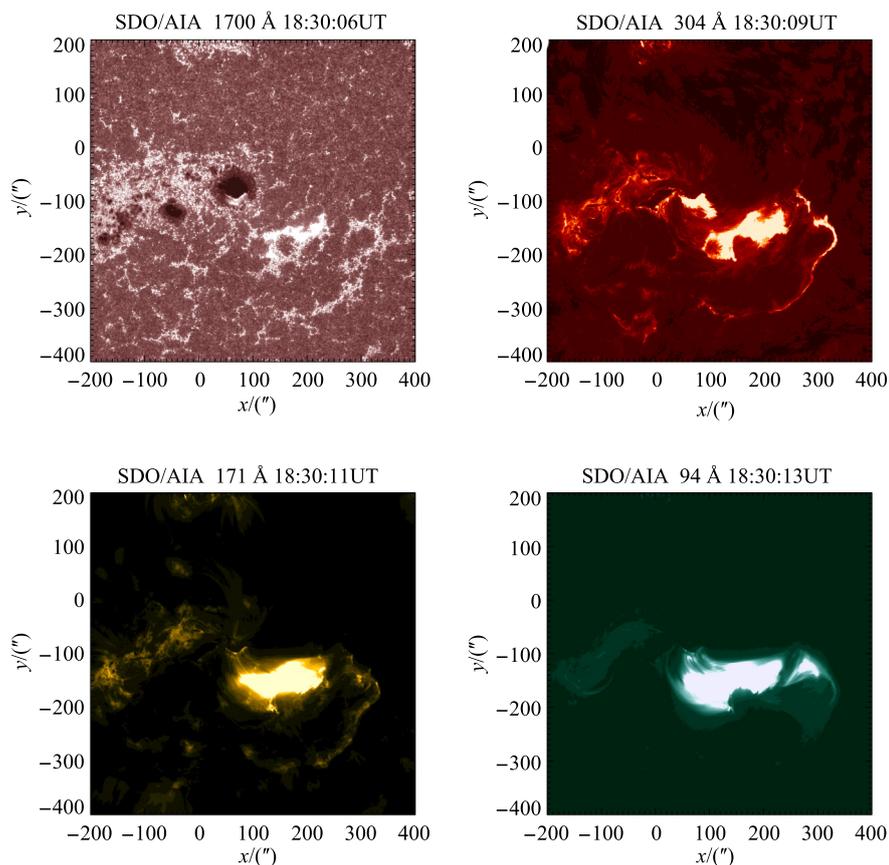


图1 来自SDO/AIA 4个波段(1 700 Å、304 Å、171 Å和94 Å)的耀斑观测

Fig. 1 The solar flare observations by SDO/AIA at the wavelengths of 1700 Å, 304 Å, 171 Å, and 94 Å

图2显示了GOES 15卫星观测的耀斑软X射线在上升阶段的流量曲线. 可以看出: 在脉冲爆发之前, 软X射线具有一些小幅度的流量波动. 从18:01UT (图中 T_1 表示)开始有缓慢增幅但是不足以证明是耀斑爆发, 更有可能是耀斑爆发前的预加热相. 在18:06UT (图中 T_2 表示)两个波段的软X射线流量强度都开始激增, 流量增长曲线斜率在这个时刻开始突变, 可以认为这个时刻应该是这次耀斑脉冲相开始的时刻. 这也是与以往判别耀斑开始时刻的方法所不同之处. 之前判断耀斑开始时刻, 往往以GOES观测到的软X射线流量高于背景10%作为标准. 这种判断适合于大样本的工作, 但涉及到每一个不同的耀斑, 该标准显得过于简单. 因为有许多耀斑在脉冲相开始之前都有一个初相(预加热相), 该初相可能持续几十分钟, 在此时间内流量可能已经超过背景的10%, 由此来判断

耀斑的脉冲开始时刻并不准确. 以斜率的突变作为标准, 对脉冲相开始的判断则比较可靠. 以此事件为例, 如以软X射线流量高于背景10%为标准, 则耀斑开始时刻为18:04UT, 与斜率突变判断的18:06UT有2 min的误差. 在18:23UT两个波段的软X射线流量均达到最大值, 这是耀斑峰值时刻.

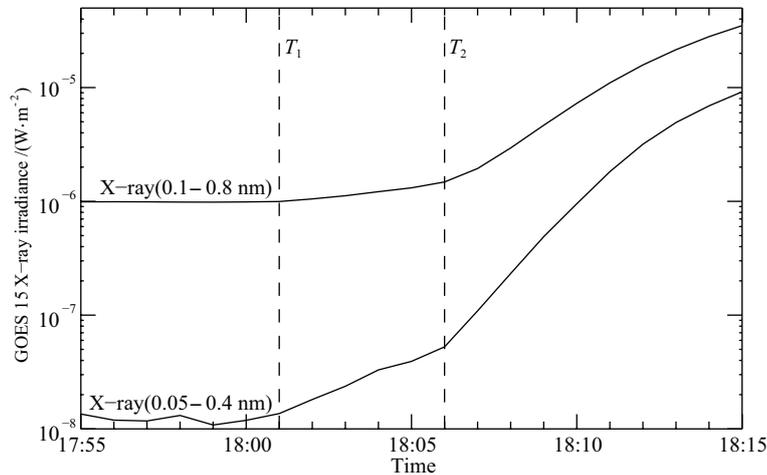


图2 GOES 15卫星观测的耀斑软X射线在两个波段范围(1~8 Å 和0.5~4 Å)内的流量曲线

Fig. 2 The temporal profiles of the soft X-ray emission in two ranges of waveband (1–8 Å and 0.5–4 Å) observed by GOES 15 on 2014 January 7

伴随着此次耀斑, SOHO/LASCO也观测到了一个晕状CME. 结合LASCO C2和C3的白光日冕仪观测, 我们计算了CME的速度和在日面上抛射的开始时间. 假设CME为一球状结构, 且该CME的源区接近日面中心, 根据观测到的时间-高度关系(参见图3), 我们可以得到该CME的速度约为2 100 km/s, 其在日面上的释放时间为18:09UT. 考虑到CME在最初阶段应有一个加速过程, 因此在日面上的释放时间要比18:09UT早一些. STEREO/COR2的数据显示, 它所观测到CME速度为2 396 km/s, 但是根据时间-高度图, CME离开太阳的时间也是18:10UT. 通过分析, 我们认为该CME在日面上的释放时间与耀斑脉冲相的开始时间是基本吻合的. 该结论从时序上暗示了耀斑和CME是同一个物理过程(日冕磁场能量释放)的不同表现形式^[3-5].

4 太阳质子事件

此次太阳风暴在行星际空间产生了大量的高能粒子. 图4显示了耀斑爆发后两天内GOES 15卫星观测到的软X射线和高能质子流量. 我们选取了6个能段(6.5、11.6、30.6、63.1、165和433 MeV)的粒子微分流量. 图中 T_3 表示耀斑的峰值时刻, T_4 表示行星际激波到达近地空间的时刻. 可以看出太阳风暴开始时, 各个能段的质子流量都快速上升, 之后高能段质子流量缓慢下降. 但是低能段质子流量维持在较高的水平, 直到行星际激波到达地球附近. 此时, 在6.5 MeV和11.6 MeV两个能段质子流量都有一个脉冲式上升. 这说明行星际激波对于低能质子仍有较强的加速作用, 但无法将质子加速到更高能段^[12].

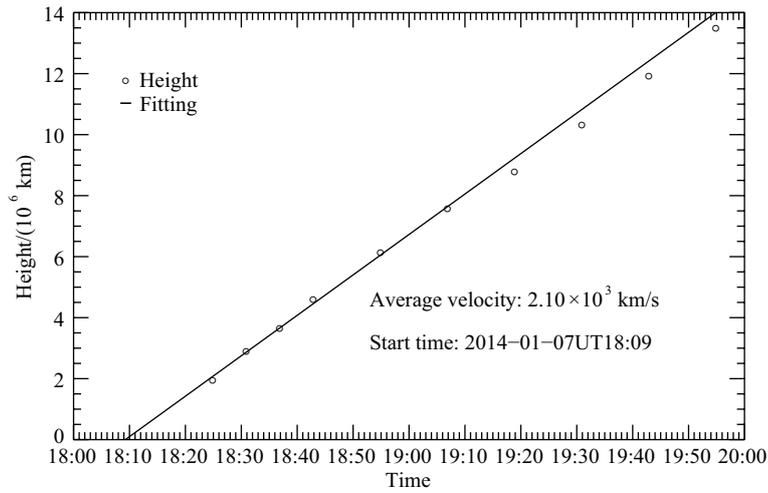


图3 SOHO/LASCO C2和C3观测到的CME的时间高度图

Fig. 3 The height versus time diagram of the CME observed by SOHO/LASCO C2 and C3

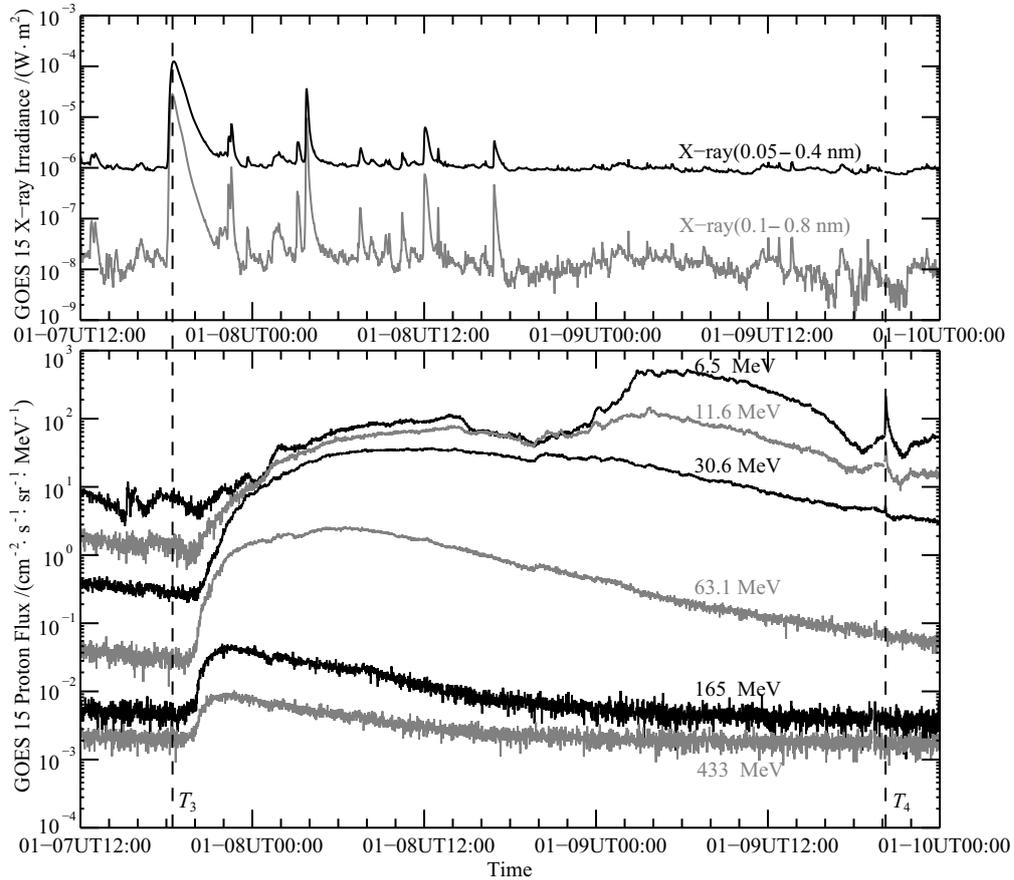


图4 GOES 15卫星观测到的两个波段的软X射线流量和6个能段的质子流量

Fig. 4 The temporal profiles of the soft X-ray emission at two wavelengths and the proton fluxes at six energy bands observed by GOES 15

利用与图2中判断耀斑开始时刻相同的方法, 我们利用最高能段(433 MeV)的质子流量来判断质子在卫星位置的开始时刻(因为高能段的质子到达地球所需时间比低能段质子要少), 从而计算质子在太阳上的释放时间. 通过对原始数据做高斯平滑处理以及对曲线斜率的计算(方法与之前判断软X射线爆发相同), 我们得到了质子在卫星位置的开始时刻为18:58UT. 根据相对论情况下质子的动能表达式 $E_k = m_0c^2(\gamma - 1)$, 其中 γ 为洛伦兹因子, 可以得到能量为433 MeV的质子速度为 $0.72c$. 假设质子沿着行星际的磁力线做无散射传播, 根据Parker太阳风模型^[13], 在太阳风速度为380 km/s的情况下(ACE卫星观测数据), 行星际磁力线的长度计算为1.18 au. 可以得到质子在行星际空间的传播时间约为13.7 min, 因此质子在太阳上的释放时间约为18:58UT 提前13.7 min, 即18:44UT.

比较耀斑在太阳上的开始时间18:06UT提前8.3 min即17:58UT, 以及耀斑的峰值时间为18:23UT提前8.3 min即18:12UT, 可以发现质子在太阳上的释放时间远远落后于耀斑的开始和峰值时间. 因此, 高能质子的加速并非来自于耀斑的爆发, 而很有可能来自于CME驱动的激波在高层日冕中的加速. 根据图3中CME的时间-高度图, 我们可以计算出质子在太阳上释放的时刻对应了CME传播到7.7个太阳半径的高度时. 这与Li 等人的结果比较吻合^[14]. 最早Kahler曾分析了GLE (ground level enhancement)事件中高能质子(高于470 MeV)的流量曲线, 并将其与CME的传播高度进行了比较, 发现质子的峰值流量发生在CME传播到5到15个太阳半径的距离^[15]. 最近Gopalswamy等人利用最新的观测数据发现GLE事件开始时刻对应了CME传播到平均约3.09个太阳半径时^[16]. 而对于一般的非GLE事件的太阳质子事件, 我们发现质子流量(高于10 MeV)的上升时刻则比较晚, 对应了CME传播到约7.9个太阳半径^[14]. 至于为什么激波加速在此范围内比较有效, 目前没有明确的答案, 这很可能与太阳大气背景参数、日冕磁场和密度模型、激波的速度和结构等相关.

5 行星际环境和地磁场扰动

在太阳风暴爆发后的50 h, CME及其驱动的激波到达了近地空间. 它们对行星际等离子体环境的扰动首先被日地 $L1$ 点的ACE卫星观测到, 紧随其后的地磁场扰动也被地面磁场的探测记录到. 图5从上到下分别显示了在GSE (Geocentric Solar Ecliptic)坐标系下行星际磁场强度及其3个分量的强度、太阳风速、质子温度、极光电集流(aurora electrojet, AE)指数和地磁暴指数(symmetric horizontal component, SYM-H).

由图5可以看到, CME驱动的激波波前在2014年1月9日19:46UT到达 $L1$ 点, 之后ACE观测到的行星际磁场强烈扰动并明显增强, 等离子体速度(太阳风速)也有明显增加, 由于激波的加热质子温度也明显上升. 在1月10日17:12UT, 激波鞘层通过卫星, 行星际磁场、等离子体速度和温度都有明显突变, 这时候ICME本身到达卫星. 判断ICME到达的另外一个判据是比较等离子体实际温度和期望值^[17-18], 等离子体温度的期望值可以表示为 $T_{\text{exp}} = 2 \times (0.031v - 5.1)^2$, 其中 v 为太阳风速度. 由此, 我们判断在1月10日17:12UT到22:56UT期间, 是ICME本身通过卫星的时间.

根据CME在日面上的抛射时间(1月7日18:09UT), 以及行星际激波和ICME到达 $L1$ 点的时间, 可以估算出行星际激波以及ICME本身在日地空间传播的平均速度分别为833 km/s 和683 km/s. 然后可以计算出行星际激波鞘层的厚度为0.22 au, ICME本

身的厚度为0.26 au. Zhang等人曾经对1996到2005年之间引起强地磁暴的行星际激波和ICME做过统计研究^[19], 发现激波鞘层和ICME的平均厚度分别为0.13 au和0.37 au.

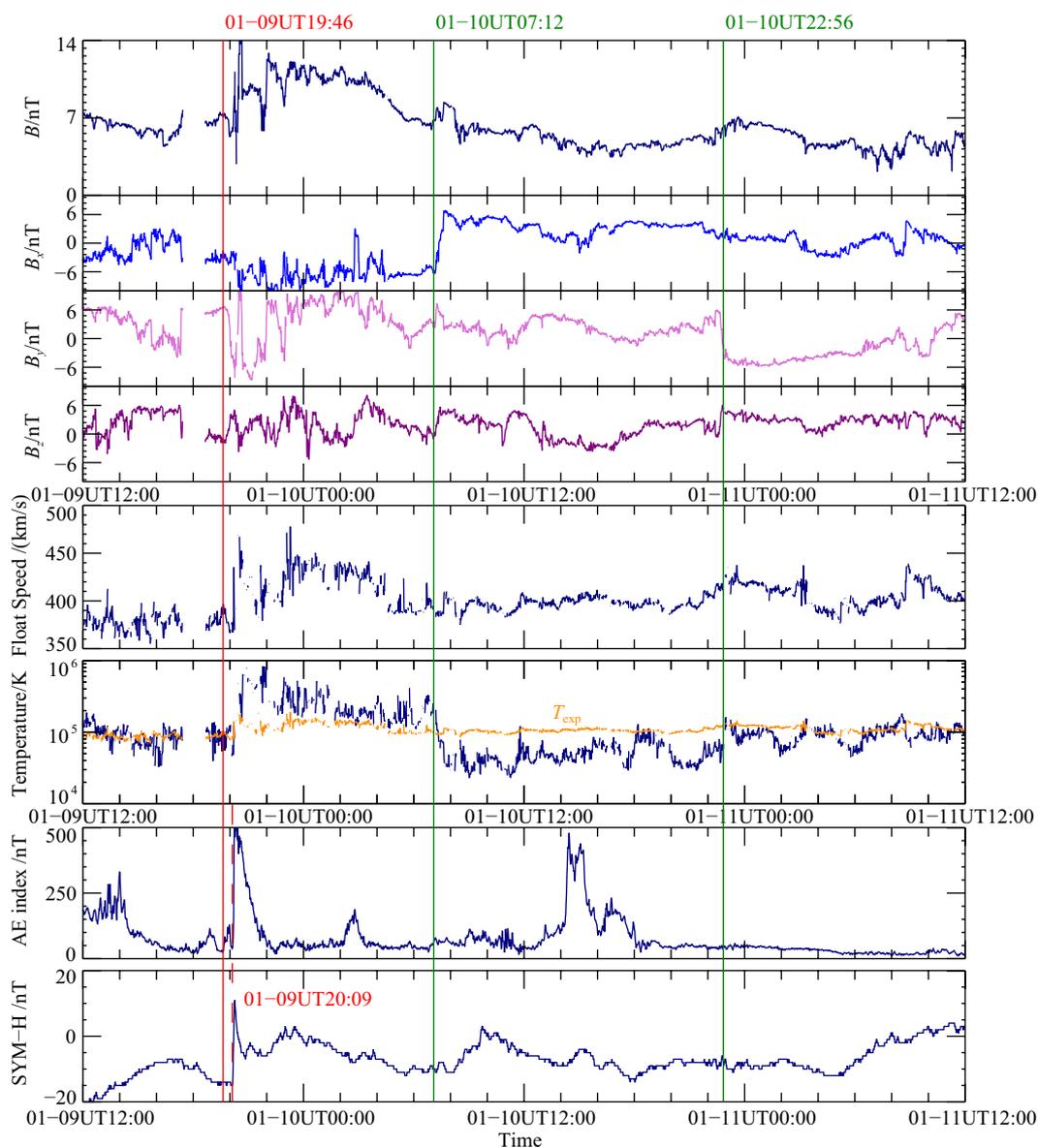


图5 行星际等离子体环境参数及地磁指数的变化. 红色垂直线表示行星际激波到达日地 $L1$ 点的时刻, 红色虚线表示地磁扰动开始的时刻, 两条绿色竖线表示CME通过近地空间的时刻.

Fig. 5 The temporal profiles of the interplanetary ambient plasma parameters and geomagnetic index. The red vertical line indicates the time of the interplanetary shock arriving at $L1$, the red dashed line indicates the commencement of geomagnetic disturbance, and the two green vertical lines indicate the passing through times of the CME, respectively.

通过AE指数和SYM-H指数的变化, 我们可以分析行星际激波和ICME对地磁场的扰动. 当激波到达地球的时候(1月9日20:09UT), 对向阳面地磁场会有明显的挤压, 首先表现出来的就是地面磁场水平分量的脉冲型增强, 因此SYM-H指数明显上升. 该扰动也会引起地磁尾的磁重联, 从而引起地磁亚暴和极光, 因此AE指数明显上升. AE和SYM-H指数在20:16UT均达到最大值.

当ICME本身通过地球磁层时, 其与地磁场的相互作用会进一步产生地磁亚暴, 因此可以看到AE指数在1月10日14:20UT显著增强. 当然我们也不能排除其他引起该地磁亚暴的可能性, 如行星际共转相互作用区或其他太阳风暴. 由于ICME相对于激波间断面对向阳面地磁场的压力较弱, 因此ICME到达地球时, 仅引起SYM-H指数的缓慢上升. 需要注意的是该ICME本身并没有引起显著的地磁暴, 因为SYM-H指数没有明显的降低而是在0附近扰动. 原因在于该ICME并没有一个明显的磁云或磁通量绳的结构, 这是因为磁场3个分量的变化都在0附近扰动, 没有规律性的变化. 其次, ICME中 B_z 分量没有明显的南向, 不能与向阳面的地磁场发生磁重联, 引起地磁暴.

6 总结

我们对一个爆发于2014年1月7日的太阳风暴进行了研究, 分析了耀斑和CME的爆发过程以及伴随该爆发的SEP事件, 并且分析了2 d后行星际激波和ICME到达近地空间, 对行星际等离子体环境的扰动以及对地磁场产生的影响, 这对于理解太阳风暴引起空间天气的物理过程有参考意义. 我们的研究结果表明:

(1) 通过对耀斑软X射线上阶段分析, 判断耀斑脉冲相的开始时刻为1月7日18:06UT. 通过对CME的时间-高度分析, 判断CME在日面上的抛射时间为18:09UT. 考虑到误差, 耀斑和CME在时序上是一致的, 在一定程度上表明二者是同一个物理过程(磁场能量释放)的不同表现形式.

(2) 计算得到的高能质子在太阳上的释放时间为18:44UT, 比耀斑的开始时间和峰值时间都要晚, 因此高能质子的加速并非来自于耀斑的磁重联过程, 而是来自于CME驱动的激波. 高能质子的释放时间与CME传播到7.7个太阳半径的时刻吻合.

(3) 判断出了行星际激波和ICME到达和通过近地空间的时间, 并计算得到了行星际激波和ICME通过近地空间的径向厚度分别为0.22 au和0.26 au.

(4) 该太阳风暴引起了一系列地磁亚暴和极光, 但没有产生明显的地磁暴. 原因在于ICME本身并非一个规则的磁云或磁通量绳结构, 同时也不包含明显的南向磁场分量.

致谢 文中所用数据来自于SDO、SOHO、GOES和ACE卫星以及World Data Center for Geomagnetism, 一并感谢.

参考文献

- [1] Wang H N, Ai G X, Wang J X. SpWea, 2012, 9: 8
- [2] Wang J X, Ji H S. ScChD, 2013, 56: 1091
- [3] Harrison R A. A&A, 1995, 304: 585
- [4] Zhang J, Dere K P, Howard R A, et al. ApJ, 2001, 559: 452
- [5] Wang H, Qiu J, Jing J, et al. ApJ, 2003, 593: 564

- [6] Aschwanden M J. SSRv, 2012, 171: 3
- [7] Miroshnichenko L I, Vashenyuk E V, Perez-Peraza J A. Ge&Ae, 2013, 53: 541
- [8] Li C, Firoz K A, Sun L P, et al. ApJ, 2013, 770: 34
- [9] 罗葆荣, 段长春, 曹莹, 等. 天文学报, 1997, 38: 4
- [10] Akasofu S I. SSRv, 2011, 164: 85
- [11] Fang C, Chen P F, Li Z, et al. RAA, 2013, 13: 1509
- [12] Le G M, Li C, Yang X X, et al. SoPh, 2014, submitted
- [13] Parker E N. ApJ, 1958, 128: 664
- [14] Li C, Miroshnichenko L I, Fang C. RAA, 2014, in press
- [15] Kahler S W. ApJ, 1994, 428: 837
- [16] Gopalswamy N, Xie H, Yashiro S, et al. SSRv, 2012, 171: 23
- [17] Lopez R E, Freeman J W. JGR, 1986, 91: 1701
- [18] Richardson I G, Cane H V. JGR, 1995, 100: 23397
- [19] Zhang J, Poomvises W, Richardson I G. GeoRL, 2008, 35: 02109

The Study of a Solar Storm and Its Interplanetary and Geomagnetic Effects

QIU Bai-han LI Chuan

(School of Astronomy and Space Science, Nanjing University Xianlin Campus, Nanjing 210046)

ABSTRACT We present a detailed study of a solar storm occurred on 2014 January 7. By using the remote-sensing solar observations from the Solar Dynamics Observatory (SDO) and the Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), the eruptions of the solar flare and the coronal mass ejection (CME) are investigated. Based on the particle measurement from the Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) and the in-situ plasma measurement from the Advanced Composition Explorer (ACE), the solar energetic particle (SEP) event, the interplanetary CME (ICME), and its driven shock are analyzed. The influence of the solar storm on the geomagnetic fields is also analyzed. The results show that: (1) The impulsive eruption of the solar flare and the lift of the CME are temporally in accordance with each other. (2) The solar protons are mainly accelerated by the CME-driven shock when the CME travels to 7.7 solar radius, rather than by the magnetic reconnection in the flare. (3) The widths of the interplanetary shock sheath and the ICME itself are derived to be 0.22 AU and 0.26 AU, respectively. (4) The interplanetary shock and the ICME give rise to substorms and aurora, whereas no obvious geomagnetic storm is detected. The reason is that the ICME does not include a structure of the magnetic cloud (MC) or southward magnetic fields.

Key words solar-terrestrial relations, sun: flares, sun: coronal mass ejections (CMEs)