

用银河宇宙线判定几个引起特大磁暴 CME 的运动方向^{*}

乐贵明 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用位于南北极尖区位置的 McMurdo 和 Thule 台站的宇宙线强度的观测数据, 分析了几个引起特大磁暴 CME 的来向. 分析结果表明, 所选的与 4 个特大磁暴相关的 CME 基本是朝正对磁层顶的方向运动并与磁层作用的. 通过对引起第 23 周两个特大磁暴的 CME 特征分析对照, 发现 CME 的来向是影响磁暴强弱的一个因素. 同样条件下, 运动方向偏向地球一侧的 CME 引起的磁暴比正对地球的 CME 引起的磁暴要弱.

关键词 银河宇宙线; CME; 地磁暴

1 引言

特大地磁暴是灾害性空间天气中最为关注的一类空间天气, 因为这类磁暴引起的日地扰动和地球物理效应是非常强的, 如 1991 年和 1989 年的特大磁暴^{[1]-[3]}, 它们造成的危害很大. 现在对磁暴的研究很多, 也得出了一些非常重要的结论, 即 CME 是日地扰动的主要肇事者^{[4]-[7]}. CME 到达磁层前形成的行星际磁场南向分量的大小和持续时间是影响磁暴强弱非常重要的一个因素^[8]. 最新的统计研究则表明^[9], 南向分量可以是 CME 本身携带的, 也可以是 CME 与背景太阳风相互作用形成的. 这些研究使我们对磁暴规律有更深刻的认识, 但是, 目前磁暴强弱的规律还没有完全揭示, 还有很多令人困惑的现象没有解决. 正如某些学者指出的那样, 除了行星际的物理条件是影响地磁暴强弱的因素外, 磁层本身的状态也是影响磁暴强弱的一个因素^[8], 因此, CME 和磁暴之间关系的研究远未结束. 银河宇宙线不仅影响空间天气^{[10]-[12]}, 而且银河宇宙线可以用来进行空间天气的监测和研究^{[13],[14]}. 银河宇宙线在 CME 的监测和研究上有独到之处, 过去我们利用银河宇宙线分析过 1997 年 1 月的 CME 特征, 主要分析了 CME 事件期间广州宇宙线台站强度的变化特征^[15]以及磁暴变化前广州宇宙线台站记录的宇宙线强度的频谱变化^[16], 利用广州宇宙线台站的观测数据我们还分析了 1991 年 3 月的 CME 运动方向和其他部分特征^[17]. 本文利用银河宇宙线强度受 CME 影响的变化特征, 我们集中分析了几个引起特大磁暴的 CME 的运动来向, 发现有些 CME 的来向是正对磁层顶的. 本文通过对引起 2000 年 7 月的特大地磁暴与引起 2001 年 3 月的特大地磁暴的 CME 对银河宇宙线影响的比较, 发现 CME 的来向是影响磁暴强弱的一个因素. 同样条件下, 偏离磁层顶方向越大

^{*} 国家 863 项目 (228144), 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000078408) 共同资助
2003-05-18 收到原稿, 2003-10-25 收到修定稿

的 CME 引起的地磁暴相对要弱. 利用银河宇宙线强度的变化特征来判断引起特大地磁暴 CME 的来向, 以及 CME 的来向影响地磁暴的强弱是研究磁暴的一种新的探索.

2 数据分析

地面的两个银河宇宙线台站 McMurdo 和 Thule 台站分别位于南北半球, McMurdo 台站的位置是 77.9°S, 166.6°E, 而 Thule 台站的位置为 76.50°N, 68.7°W. 这两个宇宙线观测台站都处在磁力线开放的区域, 两个台站的截止刚度都为零, 行星际空间中的一部分带电粒子可以沿着磁力线直接到达这两个观测台站, 因此, 行星际引起的扰动很容易在这两个台站观测到. 由于两个台站的位置分别处在南北半球, 截止刚度都为零. 如果两个台站所受的扰动相同或接近, 则两个台站记录的银河宇宙线强度的变化程度应该接近. 如果 CME 是正对磁层顶运动, 那该 CME 相对这两个宇宙线观测台站来说几乎是对称的, 因此, 两个宇宙线台站观测到的宇宙线强度的变化应该近似相等. 所以, 利用这两个台站观测的宇宙线强度变化的数据可以粗略地判断在行星际传播的 CME 是正对磁层顶还是偏向地球的某一侧, 即是偏向地球的南半球还是偏向地球的北半球. 另外, 由于在 Forbush 下降期间两个台站宇宙线强度的变化都只有纯粹的 Forbush 下降, 没有暴时增加^[12], 因此, 还可以利用 Forbush 下降的程度来进一步判断 CME 的有关特征. 两个台站每天都有一段时期处在极间区位置, 因此, 本文中我们称这两个台站为极间区台站.

在分析宇宙线强度的变化时, 我们采用的方法是计算宇宙线强度变化的程度, 即

$$\text{变化程度} = \frac{\text{实际计数率} - \text{平均计数率}}{\text{平均计数率}} \quad (1)$$

其中, 平均计数率为磁静日 1 天或 2 天宇宙线计数率的平均值. 计算中用的数据* 是宇宙线台站的小时平均计数率.

我们选的第一个事件为 1980 年 12 月 19 日事件, 依据磁暴报告**, 1980 年 12 月 19 日发生的磁暴为急始型磁暴, 磁暴的急始为 0457 UT, 磁暴的主相开始时间为 1300 UT, 磁暴期间 *Dst* 的极值为 -240 nT, 这是一次很强的地磁暴, 如图 1(a) 所示, 极间区两个宇宙线台站记录到的宇宙线强度的变化如图 1(b) 所示.

从宇宙线强度变化的比较图 1(b) 可以看到, 除了宇宙线强度下降到最大值的时间略有差异外, 两个台站记录的宇宙线强度变化在磁暴前后还是非常接近的. 说明引起这次磁暴的 CME 是正对着磁层顶运动并与磁层相互作用的.

第二个事件为 1982 年的特大磁暴, 如图 2 所示, 图 2(a) 为 *Dst* 指数的变化曲线. 从磁暴报告**看, 这次磁暴为急始型地磁暴, 磁暴的急始为 1982 年 7 月 13 日 1618 UT, *Dst* 的极值为 -325 nT, 这是一次特大磁暴. *Dst* 指数的变化情况如图 2(a) 所示, 极间区两个宇宙线台站记录到的宇宙线强度的变化如图 2(b) 所示.

从图 2(a) 和 2(b) 我们可以看到, 在磁暴发生前后的过程中, 两个宇宙线台站记录到的银河宇宙线强度的变化幅度非常接近, 说明 CME 对南北极尖区宇宙线台站记录的银河宇宙线强度的影响是非常接近的, 反映出 CME 几乎是正对着磁层顶运动的.

* <ftp://ftp.bartol.udel.edu/pyle>

** 取自 <http://www.geomag.ac.cn>

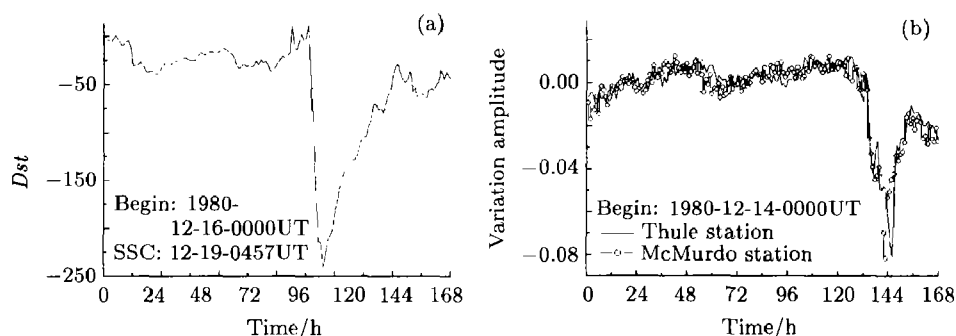


图 1 (a) 1980 年 12 月 19 日前后 Dst 指数, (b) 两个台站的银河宇宙线强度变化

Fig.1 (a) The Dst index around Dec. 19, 1980; (b) The variation of cosmic ray intensity at two station

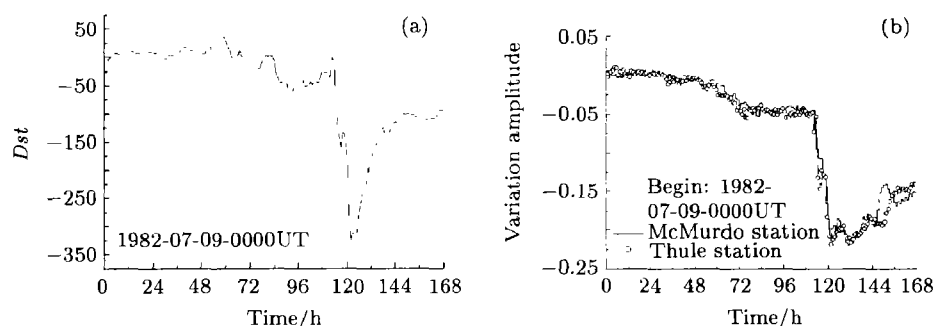


图 2 (a) 1982 年 7 月 13 日前后 Dst 指数, (b) 两个台站宇宙线强度的变化

Fig.2 (a) The Dst index around Jul. 13, 1982; (b) The variation of cosmic ray intensity at two station

在 2002 年 11 月 4 日位于日面位置 6°N , 18°W 的活动区 9684 在 1620 UT 太阳产生了一个 X1.0 的 X 射线大耀斑, 与此太阳耀斑相关的一个全晕 CME 到达磁层后引起了强烈的地磁暴, 这是一个典型的急始型地磁暴, 磁暴的急始为 2001 年 11 月 6 日 0150 UT. 2001 年 11 月 6 日开始的磁暴的 Dst 指数曲线如图 3(a) 所示, Dst 的极值为 -277 , 南北极尖区两个宇宙线台站记录的银河宇宙线强度的变化如图 3(b) 所示.

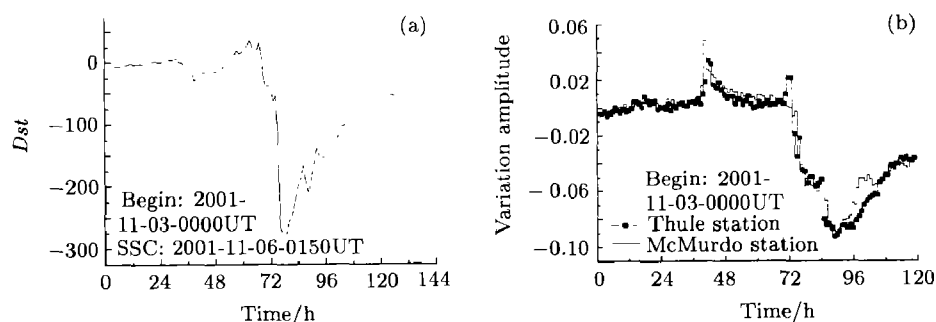


图 3 (a) 2001 年 11 月 3—9 日的 Dst 指数, (b) 2001 年 11 月 3—8 日宇宙线强度变化

Fig.3 (a) The Dst index during Nov.3–9, 2001; (b) The variation of cosmic ray intensity of at two station

从图 3(b) 可以看到, 在 11 月 4 日两个台站记录的银河宇宙线强度同时有一突增, 这是由于部分相对论的高能太阳质子到达地面使地面台站记录到的宇宙线强度增高所致. 在质子事件之后, McMurdo 台站在磁暴发生前的 3 h 出现了一次陡增, 这可能是由于 CME 对宇宙线的影响引起的. 在这之后两个台站记录的银河宇宙线强度出现了 Forbush 下降. 磁暴前和磁暴发生过程中除个别时间两个台站记录的宇宙线强度有差别外, 大部分时间两个台站银河宇宙线强度的变化非常接近, 这同样说明引起这次磁暴的 CME 也是正对着磁层顶运动的, 并最后与磁层作用引起磁暴.

2001 年 3 月 29 日位于日面 20°N , 19°W 位置的活动区 9393 在 1032 UT 产生了一个 X1.7 的耀斑, 伴随该耀斑产生了一个全晕的 CME, 该 CME 朝着地球方向运动. CME 到达磁层后在 2001 年 3 月 31 日引起了一个非常强的磁暴, 这是第 23 周到目前为止最强的一次地磁暴. 这次磁暴事件是由 CME 引起的, CME 到达拉格朗日点 ACE 卫星处的时间为 31 日 0023 UT, 到达磁层的时间为 31 日 0051 UT(摘自 SEC 的有关报告), 行星际磁场南向分量在两个时段出现较大的值, 第一个时段为 0200—0700 UT, 行星际磁场南向强度的极值为 -42.5 nT (小时均值). 在该时段后, 行星际磁场的 z 分量指向北(持续 6 h). 在这之后, 又开始出现另一个时段的强行星际南向分量, 极值为 -30.3 nT (小时均值). 太阳风到达 1 AU 时的最大速度低于 750 km/s (根据 ACE 卫星的太阳风观测数据), Dst 指数的极值为 -358 nT (出现时间为 31 日 0800 UT), 是第 23 太阳活动周到目前为止最大的地磁暴. 在这次磁暴事件发生前后几天的时间内, 地磁指数 Dst 及南北极尖区两个宇宙线台站记录的银河宇宙线强度的变化分别如图 4(a) 和 4(b) 所示.

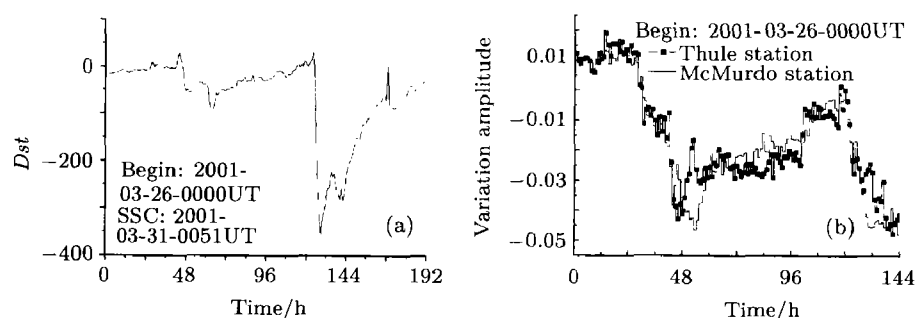


图 4 (a) 2001 年 3 月 31 日左右的 Dst 指数, (b) 2001 年 3 月 26 日的宇宙线强度变化
Fig.4 (a) The Dst index around Mar. 31, 2001; (b) The variation of cosmic ray intensity of at two station

从图 4(b) 可以看到, 从 2001 年 3 月 27 日开始到 29 日有一个磁暴, 受其影响银河宇宙线强度出现了 Forbush 下降. 从 28 日起, 宇宙线强度都开始缓慢回升, 在 30 日晚些时候宇宙线强度再次出现 Forbush 下降, 这次 Forbush 下降是由于造成 31 日特大磁暴的 CME 引起的, 我们看到磁暴前后南北两个宇宙线台站记录的宇宙线强度的增加和宇宙线强度的下降也是非常接近的, 它反映出这次 CME 几乎是正对着磁层方向运动的.

23 周最引人注目的一次日地扰动事件是 2000 年 7 月 15 日的大磁暴, 这次磁暴发生前的 7 月 14 日有一个很强的质子事件. 这次日地事件是由位于太阳日面位置 18°N , 9°W 活动区 9077 在 7 月 14 日 1024 UT 产生的 X5.7 级 X 射线耀斑相伴的 CME 事件引起的.

CME 离开日冕的初始速度超过 1750 km/s , 到达 1 AU 附近时的速度超过 1000 km/s , 比引起 2001 年 3 月 31 日特大磁暴的 CME 到达 1 AU 的速度要高. 这次 CME 携带的 (或形成的) 最大南向磁场强度超过 50 nT , 比引起 2001 年 3 月 31 日特大磁暴的 CME 携带的 (或形成的) 最大南向磁场强度也要高, 因此, 这次 CME 应该比 2001 年 3 月 31 日的 CME 具有形成更大磁暴的条件. 但是, 这次磁暴却不如 2001 年 3 月 31 日的磁暴那么强, 如图 5(a) 所示, Dst 的极值为 -300 nT , 而 2001 年 3 月 31 日 Dst 的极值为 -358 nT 如图 4(b) 所示. 具体原因目前还不清楚, 可以对在 2000 年 7 月 15 日前后极尖区两个宇宙线台站记录到的银河宇宙线强度受 CME 影响的情况进行比较, 如图 5(b) 所示.

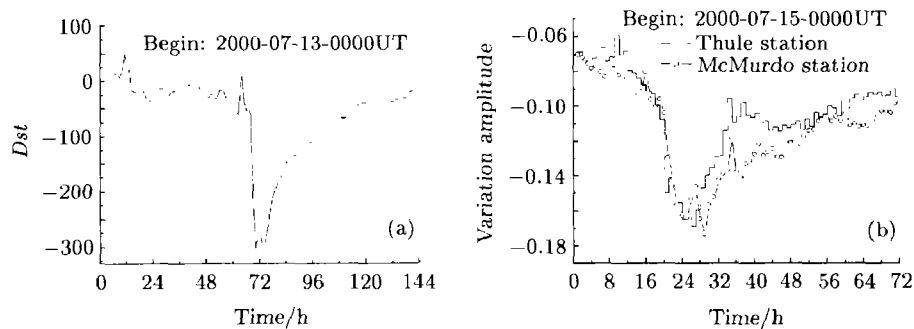


图 5 (a) 2000 年 7 月 13—18 日 Dst , (b) 2000 年 7 月 15—17 日宇宙线强度变化

Fig.5 (a) The Dst index during Jul. 13—18, 2000; (b) The variation of cosmic ray intensity of at two station

从 2000 年 7 月 15 日到 2000 年 7 月 17 日之间南北极尖区两个宇宙线台站记录到的宇宙线强度的变化可以看到, 两个台站的宇宙线强度变化存在一定的差异, 这很可能是由于 CME 在略偏离磁层顶的位置与磁层相互作用. 在银河宇宙线的下降过程中, 南半球的 McMurdo 台站记录的银河宇宙线强度下降到最低点的时间要晚于 Thule 台站, 而且 McMurdo 台站记录到的银河宇宙线强度下降的最大幅度比 Thule 台站记录到的宇宙线强度下降的最大幅度要更大一些, 因此, CME 对南半球 McMurdo 台站的影响更大, 说明 CME 可能是稍稍偏向地球的南半球. 从银河宇宙线强度的恢复过程中看, 北半球的 Thule 台站记录的银河宇宙线强度上升速度比南半球 McMurdo 台站记录的银河宇宙线强度上升速度更快, 这更符合 CME 偏向地球南半球的特点. 这次 CME 偏向地球一侧 (偏向南半球) 而不是正对地球很可能是这次 CME 引起的磁暴强度低于 2001 年 3 月 31 日的磁暴强度的原因之一.

3 结果与讨论

通过以上分析可以看到, 引起 1980 年 12 月 19 日, 1982 年 7 月 13 日, 2001 年 11 月初和 2001 年 3 月 31 日的特大磁暴的 CME 基本上都是正对磁层顶运动的. 2000 年 7 月 15 日到达地球引起特大磁暴的 CME 稍稍偏离了磁层顶的位置与磁层相互作用. 通过 2001 年 3 月 31 日和 2000 年 7 月 15 日的磁暴之间的比较, 我们发现 CME 的来向是影响磁暴强弱的一个因素. 同样条件下, 正对磁层顶运动的 CME 引起的磁暴比偏离磁层顶运

动的 CME 引起的磁暴要强。

利用位于南北半球的 McMurdo 和 Thule 两个台站宇宙线强度的变化可以粗略地判断 CME 的来向是银河宇宙线进行磁暴研究的一个方面,也是一种探索性研究。从前面几个事件我们看到,尽管在磁暴前后两个台站的宇宙线强度变化还有一些小的差别,可能是 CME 结构的不对称性或不均匀特征引起的,但观测结果的接近程度还是令人非常满意的。尽管 CME 与地磁暴之间关系的研究已经取得了很大的进展,但是,相当多的问题还没有解决。随着观测数据的积累,观测数据精度的提高,我们对地磁暴形成的规律的认识一定会越来越深刻。

参 考 文 献

- [1] Batista I S *et al.* Ionospheric effects of the March 13, 1989, magnetic storm at low and equatorial latitudes. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:13 943—13 952
- [2] Vampola A L. Effects of the March-June 1991 magnetic storms period on magnetospheric electrons. *Solar-Terr. Predicons-IV*, 1992, **2**:703
- [3] Smart D F, Shea M A. Solar-interplanetary circumstances associated with the major events in March and June 1991 and comparison with similar events of previous solar cycles. *Adv. Space Res.*, 1996, **17**(2):147—150
- [4] Wang Jialong. Solar coronal mass ejection in space weather. *Prog. Geophys.*, 1999, **14**(supp):8—19. in Chinese (王家龙. 日冕物质抛射——空间天气的扰动源. 地球物理学进展, 1999, **14**(增刊):8—19)
- [5] Gosling J T. Coronal mass ejections: overview. In: Crooker T N *et al.* ed. *Coronal Mass Ejection*, Geophys. Monograph 99, 1997
- [6] Webb D F. Coronal mass ejections: origins, evolution, and role in space weather. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(6):1 795—1 806
- [7] Simon P Plunkett, Wu Shi Tsan. Coronal Mass Ejection (CMEs) and their Geoeffectives. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(6):1 807—1 817
- [8] Gao Yufen *et al.* Relations between IMF B_s events and intense magnetic storm, *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):136—143. in Chinese (高玉芬等. 强地磁暴与行星际磁场南向分量. 空间科学学报, 2001, **20**(2):136—143)
- [9] Vennerstroem S. Interplanetary source of magnetic storms: A statistical study. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12):29 175—29 184
- [10] Van Allen, Dynamics J A. Compositions and origins of geomagnetically trapped radiation. *Space Sci.*, 1963, 226
- [11] Bazilevskaya G A. Observations of variability in cosmic rays. *Space Sci. Rev.*, 2000, **94**:25—38
- [12] Ye Zonghai, Zong Qiugang. The global distribution of the ionization in the ionosphere D-region by galactic cosmic ray. *Chin. J. Space Sci.*, 1989, **9**(2):296—304. in Chinese (叶宗海, 宗秋刚. 银河宇宙线在电离层 D 层中电离的全球分布. 空间科学学报, 1989, **9**(2):296—304)
- [13] Xue Shunsheng, Zhang Gongliang, Xiao Shaoyu. The corotating variation of the North-south anisotropy of cosmic rays. *Chin. J. Space Sci.*, 1989, **9**(2):155—160. in Chinese (薛顺生, 章公亮, 肖少俞. 宇宙线南北各向异性的共转变化. 空间科学学报, 1989, **9**(2):155—160)
- [14] Kudela K *et al.* Cosmic rays in relation to space weather. *Space Sci. Rev.* 2000, **93**(1):153—174
- [15] Le Guiming *et al.* The variational properties of galactic cosmic rays' intensities observed at Guangzhou station during Jan. 7—10, 1997. *Chin. J. Space Sci.*, 2002, **22**(4):309—313. in Chinese (乐贵明等. 1997 年 1 月 7—10 日广州台站银河宇宙线强度变化特征. 空间科学学报, 2002, **22**(4):309—313)
- [16] Le Guiming *et al.* The monitor of the CME in March 1991 by cosmic rays. *Chin. J. Geophys.*, 2003, **46**(2):209—214. in Chinese (乐贵明等. 银河宇宙线对 1991 年 3 月日冕物质抛射的监测. 地球物理学报, 2003, **46**(2):209—214)

- [17] Ye Zonghai, Sun Xiaoqing. Storm-time increase in cosmic ray intensity and its characters. *Chin. J. Space Sci.*, 1992, 12(4):270—278. in Chinese (叶宗海, 孙小青. 宇宙线暴时增加及其特征. 空间科学学报, 1992, 12(4):270—278)

THE DETERMINATION OF TRAVLING DIRECTION OF SEVERAL CMEs CAUSING SEVERE GEOMAGNETIC STORM

LE Guiming YE Zonghai

(Center for Space and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

Coronal Mass Ejections (CMEs) are important factors for the space weather. The geomagnetic storms with sudden commencement are caused by CMEs. CMEs with the south direction of $B_z > 10$ nT and high traveling speed can often cause intensive magnetic storm. But many problems keep unsolved on the relationship between a CME and the intensity of the relative geomagnetic storm. In this paper, the traveling directions of several coronal mass ejections causing severe geomagnetic storm are investigated by using the galactic cosmic ray data observed at McMurdo and Thule neutron monitor. If a CME's traveling direction straightly towards to magnetopause, then the variation in galactic cosmic ray intensity observed at the two stations should be almost the same. Several selected CME events are analyzed. The results show that the direction of the CME related to the geomagnetic storm on Dec.19, 1980 was almost dead against magnetopause, the situation was the same for the CMEs related to the geomagnetic storms on Jul.13, 1982, Nov.6, 2001 and Mar.31, 2001. The traveling direction of the CME related to the geomagnetic storm on Jul.15, 2000 is slightly directed to south of the earth. By comparing the intensity of the geomagnetic storm on March 31, 2001 and July 15, 2000 and comparing the disturbed solar wind driven by corresponding CME, it is thought that the traveling direction of a CME is a factor having impact on the intensity of the geomagnetic storm caused by the CME. For a CME, the more deflection of its traveling direction towards the magnetopause, the weaker the geomagnetic storm caused by it.

Key words Galactic cosmic ray, CME, Geomagnetic storm