

近地磁尾准无碰撞磁重联事件^{*}

周国成¹ 蔡春林¹ Henri Reme² Andre Balogh³ 曹晋滨¹ 王德驹¹

¹(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

²(Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, France)

³(The Blachett Laboratory, Imperial College, London, U.K.)

摘 要

综合分析了 Cluster II-C1 飞船在 2001 年 9 月 15 日飞越地球磁尾等离子体片区的等离子体和磁场观测资料. 结果表明, 约在 0340—0440 UT 时间期间, 资料多次呈现出较强的尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$), 明显的南向磁场分量 ($B_{ZGSM} < 0$), 以及明显的晨-昏向磁场分量 B_{YGSM} 等特征. 由此可以推断, 在磁尾等离子体片中, 在径向方向 $X_{GSE} > -18.6 R_e$ 范围内, 可能发生了多次磁重联事件, 整个事件持续期约 1 h. 磁重联事件的观测特征与准无 (或半) 碰撞磁重联理论的基本图像符合一致, 因此这些事件应当是准无碰撞磁重联事件.

关键词 Cluster II 飞船; 磁尾; 磁重联事件

1 引言

较早的飞船观测已表明, 在地球磁尾径向距离约为 $20 R_e$ 以远的区域, 有南向磁场的快速尾向等离子体流常常联系着亚暴的开始. 这些等离子体流被认为是在观测位置的地球向一边发生了磁重联的标志^{[1]—[3]}. 后来, Geotail 飞船观测又为联系着亚暴开始的磁重联过程增加了一些新的证据. 比如, Nagai 等^[4]和 Nagai 和 Machida^[5]的研究表明, 在亚暴开始 (由地面中纬度 Pi2 脉动, 或中纬度正弯扰来识别) 后, 有南向磁场的快速尾向等离子体流多数是在磁尾径向距离约为 $20 R_e$ 以远区域, 而有北向磁场的快速尾向等离子体流只是在磁尾约为 $30 R_e$ 以内区域, 因而认为联系着亚暴开始的磁尾磁重联最经常地发生在磁尾径向距离 $20—30 R_e$ 范围内, 后来的许多研究也证实了这个结论^{[6]—[10]}. 同时, 这种观测结论与电阻 MHD (磁流体力学) 驱动磁重联理论^{[11]—[14]}是一致的, 通常这种磁重联理论把磁重联层划分为入流区、出流区和扩散区. 电阻 MHD 驱动磁重联理论适用的尺度范围远大于离子惯性长度, 即在入流区和出流区是适用的.

在磁重联扩散区, 在离子惯性长度和电子惯性长度之间范围内, 可适用的磁重联理论是所谓 Hall MHD 驱动磁重联理论, 或准无 (或半) 碰撞磁重联理论, 或磁重联的二流体模型. 这是近年来迅速发展起来的新的磁重联理论^{[15]—[27]}. 新的驱动磁重联理论认为, 入流电子伴随磁场可流入扩散区, 而离子因磁“冻结”条件被破坏不能再伴随磁场和电子到达扩散区而停留在离中间平面一个离子惯性长度附近, 电子和离子的相对运动便产生了

^{*} 国家自然科学基金 (40174042, 40074043)、国家杰出青年科学基金 (40025413) 和双星重大项目资助, 中国 Cluster II 数据和研究中心提供了所用的观测数据
2002-09-17 收到原稿, 2002-10-28 收到修定稿

所谓 Hall 电流. 在磁重联区附近, Hall 电流系便产生了所谓磁重联平面外磁场分量的四极结构^{[28],[29]}. 同时, 电子和离子的相对运动还会产生方向指向中间平面的电场^[30]. 这些被称为 Hall 效应. 在高 β 等离子体中, Hall MHD 驱动磁重联理论还包括电子压力效应, 或等效离子回旋 (或 Larmor) 半径效应. 对于 Hall MHD 驱动磁重联理论已开展了大量的混合数值模拟研究工作^{[31]–[38]}, 模拟结果与上述 Hall MHD 驱动磁重联理论的物理图像基本一致.

Nagai 等^[30] 详细考察了 Geotail 飞船 1996 年 1 月 27 日、2 月 18 日和 12 月 10 日在地球磁尾径向距离约 $25–29 R_e$ 范围穿越等离子体片的等离子体和磁场资料, 寻找到 3 次事件符合磁重联平面外磁场分量的四极结构、指向中间平面的电场以及电子和离子去耦合等图像, 从而用观测资料证实了磁尾径向距离约 $25–29 R_e$ 附近准无 (或半) 碰撞驱动磁重联的存在.

所谓无碰撞磁重联理论还应包括电子惯性效应, 它适用的尺度范围可延伸到小于电子惯性长度, 目前主要开展了一些粒子模拟研究^{[18],[39]–[43]}. 无碰撞驱动磁重联理论的完整图像还有待于新的观测资料来证实.

Deng 和 Matsumoto^[44] 用 Geotail 飞船 1997 年 1 月 10 日穿越地磁层顶的磁场和电磁模波观测资料, 寻找到了符合 Hall 电流系统和哨声模波存在图像的磁重联事件, 为以哨声模波为媒介引起准无碰撞驱动磁重联的理论提供了第一个空间观测证据^[45] 和有利的支持. Oieroset 等^[46] 报告了 Wind 飞船 1999 年 4 月 1 日在磁尾约 $60 R_e$ 附近与一个 10 h 的准稳态磁重联事件相遇的观测, 飞船从地向出流区进入离子扩散区, 再进入尾向出流区, 观测到速度可达约 400 km/s 的质子地向流变为尾向流的转变, 40% 的 Hall 磁场和能量 < 300 eV 的电子束流, 以及频率在低混杂共振频率和离子回旋频率之间的波等资料, 这些观测与准无碰撞驱动磁重联的理论预测基本一致.

本文关注的焦点问题是, 在地球磁尾等离子体片区径向距离约为 $20 R_e$ 范围内, 能否找到磁重联或准无碰撞磁重联的观测证据. 最近, Cluster II-C1 飞船, 在飞越地球磁尾期间 2001 年 9 月 15 日 0340–0440 UT 时段内, 它的空间位置为 X_{GSE} 从 $-18.76 R_e$ 到 $-18.61 R_e$, Y_{GSE} 从 $3.89 R_e$ 到 $4.11 R_e$, Z_{GSE} 从 $-0.2 R_e$ 到 $-0.8 R_e$, 即它是在磁尾赤道平面的南侧附近和黄昏—子夜时区内. 由于 Cluster II-C1 飞船的远地点约为 $19.6 R_e$, 轨道周期约为 57 h, 因此该时间段内 Cluster II-C1 飞船几乎是在等离子体片内远地点附近. Cluster II 是由 4 个飞船组成的星簇, 由于在所考察时间范围内 Cluster II-C2 和 C4 飞船上 CIS-HIA 仪器没有资料, 而 C1 和 C3 飞船的 CIS-HIA 仪器资料也很接近, 因此这里只分析 C1 飞船的资料. 另外, C1, C2 和 C4 飞船的磁场资料很接近, 但它们与 C3 飞船的磁场资料有一定的差别. C1 与 C3 飞船之间的距离在 GSE 坐标中的投影分别为 ΔX 为 $822 \rightarrow 950$ km, ΔY 为 $-1280 \rightarrow -1271$ km, ΔZ 为 $1094 \rightarrow 1017$ km, C3 飞船在前, C1 飞船在后 (我们将另文讨论这些差别). 本文综合分析了 Cluster II-C1 飞船的 FGM (通量闸磁强计)^[47]、CIS (Cluster 离子谱仪)-HIA 仪器 (热离子分析器, 和单位电荷的能量范围约为 5 eV–32 keV)^[48] 测量到的 4 s 采样资料. 结果表明, 在磁尾等离子体片中 $X_{GSE} > -18.6 R_e$ 范围内 2001 年 9 月 15 日 0340–0440 UT 时段内可能发生了多次磁重联事件, 整个事件持续期约 1 h. 磁重联事件的观测特征与准无 (或半) 碰撞磁重联理论的基本图像符合一致.

2 等离子体和磁场的观测特征和判断

2.1 尾向热离子流

根据 Cluster II-C1 飞船-PP(主参数, 每 4 s 采样)-CIS(Cluster 离子谱仪)-HIA 仪器(热离子分析器)的观测资料(图 1), 在约 0340—0440 UT 期间, HIA 仪器明显地观测到 6 次较大的尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$) 事件, 每次尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$) 事件的持续时间在约 3—10 min 之间, 其中的点曲线为 4 s 采样资料的 60 s 滑动平均值. 在图 1 中标号为 1, 2, 3, ... 的竖直虚线所示的时刻附近, 热离子流速分量 $|V_{XGSM}|$ 的峰值(实曲线)高达约 400—750 km/s(见表 1 所列). 当 $|V_{XGSM}|$ 最大时, V_{YGSM} 或接近 0, 或接近较小的峰值, 而 $V_{ZGSM} \leq 0$. 在 4 s 采样资料(实曲线)中还出现许多小的快变化, 60 s 滑动平均值(点曲线)也明显地显示出多次尾向离子流特征.

由 HIA 仪器观测到的离子密度 n_i 约为 $0.4/\text{cm}^3$, 可以估计离子的惯性长度约为 360 km. 离子平行温度约从 50×10^6 K 缓慢而平稳地下降到约 20×10^6 K, 而离子垂直温度约在 40×10^6 K 到约 60×10^6 K 之间变化. 这些资料(文中没有给出)也表明, 飞船位置是在磁尾等离子体片内.

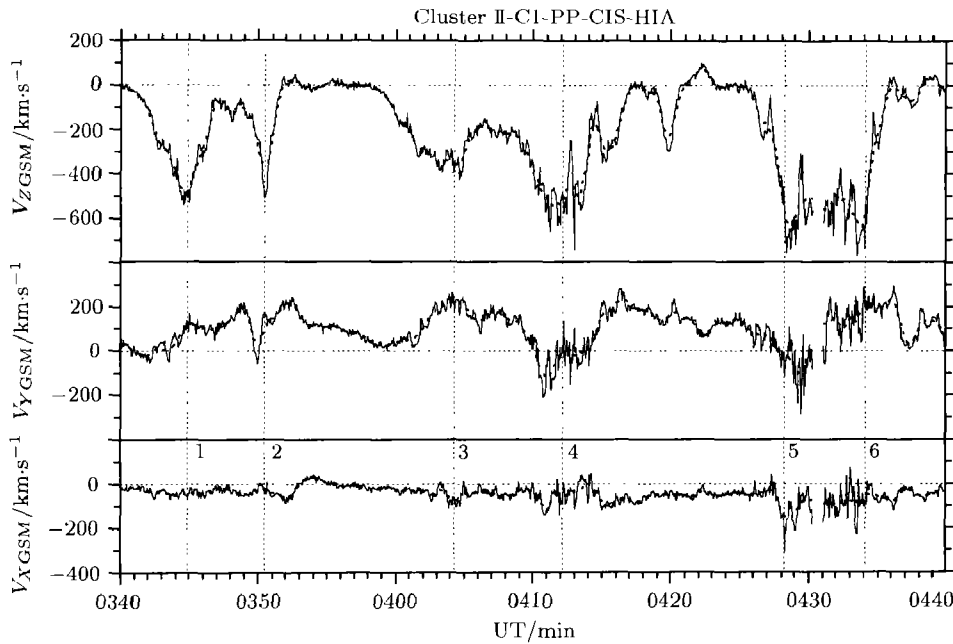


图 1 在 2001 年 9 月 15 日 0340—0440 UT 期间 Cluster II-C1 飞船-PP(主参数, 每 4 s 采样)-CIS(Cluster 离子谱仪)-HIA(热离子分析器)测量的离子流速在 GSM 坐标系中的分量 (V_{XGSM} , V_{YGSM} , V_{ZGSM}) 随时间的变化, 其中的点曲线为 4 s 采样资料的 60 s 滑动平均值
Fig.1 Components (V_{XGSM} , V_{YGSM} , V_{ZGSM}) of ion flow velocity in the GSM system vs the UT time in the interval of 0340—0440 UT on September 15, 2001, which were observed by Cluster II-C1-PP-CIS-HIA, in which the dotting curves are the sliding average of data for a minute

2.2 磁场南向和晨-昏向分量

Cluster II-C1 飞船 -FGM(通量闸磁强计) 测量的磁场 3 分量 ($B_{XGSM}, B_{YGSM}, B_{ZGSM}$) 和总磁场强度 (B_T) 资料如图 2 所示. 必须指出, 观测到的磁场 $\mathbf{B} = \mathbf{B}^0 + \mathbf{B}'$, 其中 $\mathbf{B}^0$ 为缓变的背景磁场, $\mathbf{B}'$ 为稍快变化的 (或事件的) 磁场.

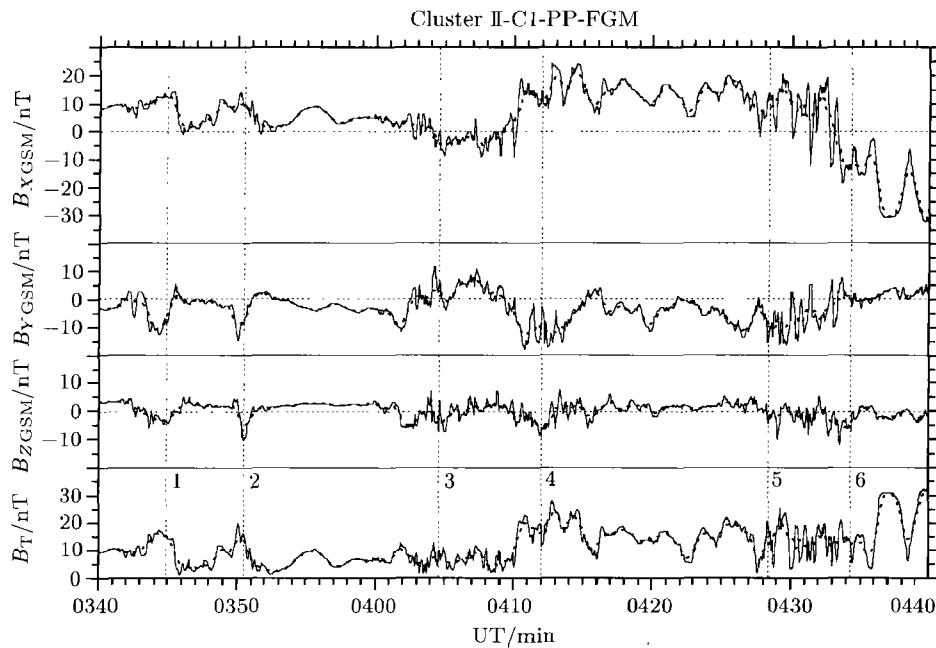


图 2 在 2001 年 9 月 15 日 0340—0440 UT 期间 Cluster II-C1 飞船-PP(主参数, 每 4s 采样)-FGM(通量闸磁强计) 测量的磁场强度在 GSM 坐标系中的分量 ($B_{XGSM}, B_{YGSM}, B_{ZGSM}$) 和总强度 (B_T) 随时间的变化, 其中的点曲线为 4s 采样资料的 60s 滑动平均值

Fig.2 Components ($B_{XGSM}, B_{YGSM}, B_{ZGSM}$) and the total intensity (B_T) of magnetic field in the GSM system vs the UT time in the interval of 0340—0440 UT on September 15, 2001, which were observed Cluster II-C1-PP-FGM, in which the dotting curves are the sliding average of data for a minute

可以看出, 在约 0341 UT, $B_{XGSM} \approx B_{XGSM}^0 \approx 10 \text{ nT}$, $B_{YGSM} \approx B_{YGSM}^0 \approx -3 \text{ nT}$, $B_{ZGSM} \approx B_{ZGSM}^0 \approx 3 \text{ nT}$. 在出现较大的尾向离子流期间的约 0341—0347 UT 期间, 磁场 Z 分量出现明显的下降变化 (出现负的 B'_{ZGSM}) 与尾向离子流出现在同一时间段内. 磁场 X 分量在缓慢上升的背景磁场上出现下降变化, 磁场 Y 分量也出现较大的变化. 在约 0343 UT 附近, 对应着尾向离子流的第一个峰值 $V_{XGSM} \approx -500 \text{ km/s}$, 而相应的 $B_{XGSM} \approx 13 \text{ nT}$, $B_{YGSM} \approx -8 \text{ nT}$, $B_{ZGSM} \approx -4 \text{ nT}$. 对应于尾向离子流速 6 个峰值时的磁场值如表 1 所列, 它们都对应着 6 个 $-B_{ZGSM}$ 分量. 60s 滑动平均值 (点曲线) 也多次明显地显示出类似的特征. 表 1 列出了 11 个典型时间离子流速和磁场三分量的值, 其中, 标号 1—6 表示尾向离子流速峰值时间, a—e 表示尾向离子流速峰值前后尾向离子流近乎消失的某个时间 (见表 1. 图 1 和 2 中没有标出).

2.3 准无碰撞磁重联

在出现较大的尾向离子流速时, $-B_{ZGSM}$ 和 $-B_{YGSM}$ 都是磁重联的标志. $-B_{ZGSM}$

表 1 2001 年 9 月 15 日 0340—0440 UT 期间尾向离子流峰速度时 (1—6)

和峰速度之间最小速度时 (a—e) 的离子流速和磁场资料

Table 1 Ion bulk velocity and magnetic field data at peak velocities (1—6) of tailward ion flow and at minimum velocities (a—e) among peaks in the interval of 0340—0440 UT on September 15, 2001

标号	时间 (UT)	V_{XGSM} (km/s)	V_{YGSM} (km/s)	V_{ZGSM} (km/s)	B_{XGSM} (nT)	B_{YGSM} (nT)	B_{ZGSM} (nT)
1	~ 0345	-500	+120	-50	+13 (N)	-8 (I 区)	-4
2	~ 0351	-500	+160	-40	+7 (N)	-8 (I 区)	-10
3	~ 0404	-400	+220	-80	-3 (S)	+3 (IV 区)	-5
4	~ 0412	-600	0	-50	+10 (N)	-15 (I 区)	-8
5	~ 0428	-750	-30	-160	+13 (N)	-10 (I 区)	-3
6	~ 0434	-650	+220	-80	-13 (S)	+2 (IV 区)	-5
判断		强尾向离子流		弱南向离子流	南 (S) 北 (N) 半区	Hall 电流 磁场区内	南向磁场分量
a	0340	0	+30	-25	+8 (N)	-3 (B_{YGSM}^0)	+3
b	0348	-75	+120	-25	+6 (N)	-1 (B_{YGSM}^0)	+2
c	0353	0	+220	-60	+1 (N)	+2 (II)	+1
d	0421	0	+150	-50	+17 (N)	-3 (B_{YGSM}^0)	+2
e	0436	+20	+250	-100	-8 (S)	0	0
判断		几乎无尾向、地向流		弱南向离子流		Hall 电流 磁场区外	北向磁场分量

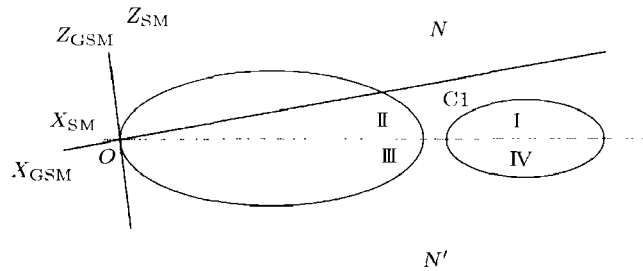


图 3 在 GSM 和 SM 坐标系 X-Z 平面内磁尾磁重联位形和 C1 飞船位置投影的示意图

Fig.3 Schematic illustration of the magnetic reconnection configuration in the magnetotail and the projective position of Cluster II-C1 spacecraft in the GSM and SM X-Z plane

表示在飞船的向地球一边发生了磁重联, 而负 B_{YGSM} 是处在磁重联中性线尾向一边北半区 (I 区, 如图 3 所示) 的 C1 飞船观测到 Hall 电流系的标志. 图 3 绘出了地心太阳磁层坐标系 (GSM)(实直线) 和太阳磁坐标系 (SM)(虚直线) 中部分磁重联磁力线和 Cluster II-C1 飞船位置的示意图, 它是近地磁尾磁重联的基本位形, 其中直线 NN' 通过磁重联中性点 (线) 且平行于 Z_{SM} 轴, 而且直线 NN' 和 X_{SM} 轴把 $X_{SM}-Z_{SM}$ 平面划分为 I, II, III, IV 区. 根据前述的准无碰撞磁重联理论, 在磁重联中性点 (线) 附近, Hall 电流会产生磁重联平面外磁场 B_{YGSM} , 并且它的极性构成四极结构, 即在 I 和 III 区, $B_{YGSM} < 0$; 而在 II 和

IV 区, $B_{YGSM} > 0$. 由于在离电流片中间平面约 360 km 的范围内即为离子惯性区, 当飞船靠近该区时应能观测到 Hall 电流产生的磁场 B_{YGSM} .

从图 1—3 和表 1 可以得出如下几点判断.

(1) 图 1 和 2 中标号为“1, 2, 4, 5”的事件表现出较强的尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$) 和明显的地向 ($B_{XGSM} > 0$)、晨向 ($B_{YGSM} < 0$) 及南向 ($B_{ZGSM} < 0$) 磁场分量, 它们与磁重联尾向出流区 ($V_{XGSM} < 0, B_{ZGSM} < 0$) 和 Hall 电流磁场四极结构中 I 区的特征 ($B_{XGSM} > 0, B_{YGSM} < 0, B_{ZGSM} < 0$) 完全一致.

(2) 图 1 和 2 中标号为“3, 6”的事件表现出较强的尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$) 和明显的尾向 ($B_{XGSM} < 0$)、昏向 ($B_{YGSM} > 0$) 及南向 ($B_{ZGSM} < 0$) 磁场分量, 它们与磁重联尾向出流区 ($V_{XGSM} < 0, B_{ZGSM} < 0$) 和 Hall 电流磁场四极结构 IV 区的特征 ($B_{XGSM} < 0, B_{YGSM} > 0, B_{ZGSM} < 0$) 完全一致. 飞船 C1 从 I 区进入 IV 区符合其轨道运行方向 (如时间从 1 $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ 3, 或 4 $\rightarrow$ 5 $\rightarrow$ 6), 但飞船 C1 从 IV 区返回 I 区 (如时间从 3 $\rightarrow$ 4, 5, 与其轨道运行方向反向) 则可能是中间平面 (X_{SM} - Y_{SM} 平面) 向 $-Z_{SM}$ 方向一次快速摆动引起的.

(3) 表 1 中标号为 a, b, c, d 的时间, 观测到弱的 X 向离子流 ($|V_{XGSM}| \leq 75$ km/s), 弱的南向离子流 ($V_{ZGSM} \leq 100$ km/s), 地向 ($B_{XGSM} > 0$) 和北向 ($B_{ZGSM} \geq 0$) 磁场分量, 以及不明显的 Hall 电流磁场 ($B'_{YGSM} \approx 0$) 等特征是与北边入流区的图像符合一致. 而标号 e 时间 (0436 UT) 的观测特征与南边入流区的图像符合一致, 表明飞船 C1 已离开磁重联区.

(4) 时间从 a $\rightarrow$ 1 $\rightarrow$ b $\rightarrow$ 2 $\rightarrow$ c $\rightarrow$ (3, 4) $\rightarrow$ d $\rightarrow$ 5, 或 6 $\rightarrow$ d 等时刻的观测特征表明, 磁重联中性点 (线) 在 X_{GSM} 或 X_{SM} 方向多次往返运动, 或发生了多次磁重联.

3 结论

综上所述, 在 2001 年 9 月 15 日约 0340—0440 UT 期间, Cluster II-C1 飞船在穿越地磁尾等离子体片轨道段 (即径向距离 $-18.61R_e > X_{GSE} > -18.76R_e$ 范围内) 上, 观测到明显的南向磁场分量 ($B_{ZGSM} < 0$), 较强的尾向离子流 ($V_{XGSM} < 0$), 以及明显的晨-昏向磁场分量 B_{YGSM} 等. 这些观测特征表明, 在 Cluster II-C1 飞船的地球向一边磁尾径向距离 $X_{GSE} > -18.6R_e$ 范围内可能发生了多次磁重联事件, 每次事件持续时间约为 3—10 min, 整个事件持续期约 1 h. 事件的观测特征与准无 (或半) 碰撞磁重联理论的基本图像符合一致, 因此这些事件应当是准无碰撞磁重联事件.

在上述不同的特征尺度范围内, 磁重联区等离子体的色散性质有着显著的差别. 在电阻 MHD 驱动磁重联理论适用的尺度范围 (远大于离子惯性长度), 起重要作用的波模是无色散的 Alfvén 波. 在 Hall MHD 驱动磁重联理论也能适用的小尺度范围 (离子和电子惯性长度之间), 无色散的 Alfvén 波将被强烈地变为色散性的哨声模波^{[18],[20]}. 在高 β 等离子体中 (在地磁尾等离子体片区, $\beta > 1$), 电子压力效应或等效离子 Larmor 半径效应把动力 Alfvén 波引入磁重联区等离子体系统^[18]. 因此, 动力 Alfvén 波和哨声模波也应是准无碰撞磁重联扩散区的重要波模和标志. 在无碰撞磁重联理论才能适用的更小尺度范围 (小

于电子惯性长度), 重要的波模将是色散性的但群速度接近于零的电子回旋波^[20], 还有其他的非线性结构. 有关准无(或半)碰撞磁重联扩散区等离子体波及非线性结构的观测特征今后还需进一步分析.

参 考 文 献

- [1] Hones E W Jr. Transient phenomena in the magnetotail and their relation to substorms. *Space Sci. Rev.*, 1979, **23**:393—410
- [2] Hones E W Jr. Plasma flow in the magnetotail and its implications for substorm theories. In: Akasofu S-I ed., *Dynamics of the Magnetosphere*, Norwell, Mass.: D Reidel, 1980, 545—562
- [3] Nishida A. Reconnection in Earth's magnetotail: An overview. In: Hones E W Jr ed. *Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasma*, Geophysical Monograph, AGU, Washington, D.C., 1984, **30**:159—167
- [4] Nagai T, Fujimoto M, Saito Y, Machida S, Terasawa T, Nakamura R, Yamamoto T, Mukai T, Nishida A, Kokubun S. Structure and dynamics of magnetic reconnection for substorm onsets with Geotail observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:4419—4440
- [5] Nagai T, Machida S. Magnetic reconnection in the near-Earth magnetotail. In: Nishida A, Baker D N, Cowley S H W ed. *The Earth's Magnetotail: New Perspectives*, Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C., 1998, **105**:211—224
- [6] Ieda A, Machida S, Mukai T, Saito Y, Yamamoto T, Nishida A, Terasawa T, Kokubun S. Statistical analysis of the plasmoid evolution with Geotail observations. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:4453—4465
- [7] Machida S, Miyashita Y, Ieda A, Nishida A, Mukai T, Saito Y, Kokubun S. Geotail observations of flow velocity and north-south magnetic field variations in the near and mid-distant tail associated with substorm onsets. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**:635—638
- [8] Ueno G, Machida S, Mukai T, Saito Y, Nishida A. Distribution of X-type magnetic neutral lines in the magnetotail with Geotail observations. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**:3341—3344
- [9] Baumjohann W, Hesse M, Kokubun S, Mukai T, Nagi T, Petrukovich A. Substorm dipolarization and recovery. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**:24 995—25 000
- [10] Miyashita Y, Machida S, Mukai T, Saito Y, Tsuruda K, Hayakawa H, Sutcliffe P R. A statistical study of variations in the near and mid-distant magnetotail associated with substorm onsets: Geotail observations. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:15 913—15 930
- [11] Parker E N. Sweet's mechanism for merging magnetic field in conducting fluids. *J. Geophys. Res.*, 1957, **62**:509—517
- [12] Sweet P A. The neutral point theory of solar flares. In: B Lehnert ed. *Electromagnetic Phenomena in Cosmic Physics*, 1958. 135
- [13] Petschek H E. Magnetic field annihilation. In: AAS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flare. *NASA Spec. Pub.*, 1964, Sp-50, 425—439
- [14] Lee L C. A review of magnetic reconnection: MHD models. In: Song P *et al.* ed. *Physics of the Magnetopause*, Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C., 1995, **90**:139—153
- [15] Drake J F, Lee Y C. Kinetic theory of tearing instabilities. *Phys. Fluids*, 1977, **20**:134—142
- [16] Drake J F, Kleva R G. Collisionless reconnection and the sawtooth crash. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**:1468—1471
- [17] Drake J F, Kleva R G, Mandt M E. The structure of thin current layers: implications for magnetic reconnection. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**:1251—1254
- [18] Drake J F. Magnetic reconnection: A kinetic treatment. In: Song P *et al.* ed. *Physics of the Magnetopause*, Geophysical Monograph, AGU, Washington, D. C., 1995, **90**:155—165
- [19] Drake J F, Biskamp D, Zeiler A. Breakup of the electron current layer during 3-D collisionless magnetic reconnection. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**:2921—2924

- [20] Biskamp D. Magnetic reconnection in plasma. In: Pino E M de G D, Peratt A L, Tanco G A M, Chian A C-L ed. Advanced Topics on Astrophysical and Space Plasmas, Belgium: Kluwer Academic Publishers, 1997, 165—207
- [21] Biskamp D, Schwarz E, Drake J F. Two-fluid theory of collisionless magnetic reconnection. *Phys. Plasmas*, 1997, **4**:1002—1009
- [22] Ma Z W, Bhattacharjee A. Fast impulsive reconnection and current sheet intensification due to electron pressure gradients in semi-collisional plasmas. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**:1673—1676
- [23] Ma Z W, Bhattacharjee A. Sudden enhancement and partial disruption of thin current sheets in the magnetotail due to Hall MHD effects. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3277—3280
- [24] Ma Z W and Bhattacharjee A. Hall magnetohydrodynamic reconnection: The geospace environment modeling challenge. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:3773—3782
- [25] Zhou G C, Cai C L, Cao J B, Zhang Y T, Chen T, Wang D J. Modified magnetohydrodynamic model of magnetic reconnection. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**:461—468
- [26] Cai C L, Zhou G C, Cao J B, Wang D J. Difference between the ion gyroviscous effect and Hall magnetohydrodynamic effect in the magnetic reconnection. *Chin. Phys. Lett.*, 1999, **16**:856—858
- [27] Wang X G, Bhattacharjee A, Ma Z W. Collisionless reconnection: Effects of Hall current and electron pressure gradient. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**:27 633—27 648
- [28] Sonnerup B U O. Magnetic field reconnection. In: Lanzerotti L T *et al* ed. Solar System Plasma Physics, North-Holland, New York, 1979, **3**:45—108
- [29] Terasawa T. Hall current effect on tearing mode instabilities. *Geophys. Res. Lett.*, 1983, **10**:475—478
- [30] Nagai T, Shinohara I, Fujimoto M, Hoshino M, Saito Y, Machida S, Mukai T. Geotail observations of the Hall current system: Evidence of magnetic reconnection in the magnetotail. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:25 929—25 949
- [31] Lin Y, Swift D W. A two-dimensional hybrid simulation of the magnetotail reconnection layer. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:19 859—19 870
- [32] Kuznetsova M M, Hesse M, Winske D. Ion dynamics in a hybrid simulation of magnetotail reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:27 351—27 373
- [33] Kuznetsova M M, Hesse M, Winske D. Kinetic quasi-viscous and bulk flow inertia effects in collisionless magnetotail reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:199—213
- [34] Nakamura M S, Fujimoto M, Maezawa K. Ion dynamics and resultant velocity space distributions in the course of magnetotail reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:4531—4546
- [35] Lottermoser R F, Scholer M, Matthews A P. Ion kinetic effects in magnetic reconnection: Hybrid simulations. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:4547—4559
- [36] Shay M A, Drake J F, Denton R E, Biskamp D. Structure of the dissipation region during collisionless magnetic reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:9165—9176
- [37] Scholer M, Lottermoser R F. On the kinetic structure of the magnetotail reconnection layer. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**:3281—3284
- [38] Shay M A, Drake J F, Rogers B N, Denton R E. The scaling of collisionless, magnetic reconnection for large systems. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**:2163—2166
- [39] Ding D Q, Lee L C, Swift D W. Particle simulation of driven collisionless magnetic reconnection at the dayside magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:8257—8267
- [40] Horiuchi R, Sato T. Particle simulation study of driven magnetic reconnection in a collisionless plasma. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**:3587—3597
- [41] Horiuchi R, Sato T. Particle simulation study of collisionless driven reconnection in a sheared magnetic field. *Phys. Plasmas*, 1997, **4**:277—289
- [42] Hesse M, Winske D. Electron dissipation in collisionless magnetic reconnection. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:26 479—26 486
- [43] Hesse M, Schindler K, Birn J, Kuznetsova M. The diffusion region in collisionless magnetic reconnection. *Phys. Plasmas*, 1999, **6**:1781—1795

- [44] Deng X H, Matsumoto H. Rapid magnetic reconnection in the Earth's magnetosphere mediated by whistler waves. *Nature*, 2001, **410**:557—560
- [45] Drake J F. Magnetic explosions in space. *Nature*, 2001, **410**:525—526
- [46] Oieroset M, Phan T D, Fujimoto M, Lin R P, Lepping R P. In situ detection of collisionless reconnection in the Earth's magnetotail. *Nature*, 2001, **412**:414—417
- [47] Balogh *et al.* The Cluster magnetic field investigation. *Space Sci. Rev.*, 1997, **79**:65—91
- [48] Reme *et al.* The Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. *Space Sci. Rev.*, 1997, **79**:303—350

QUASI-COLLISIONLESS MAGNETIC RECONNECTION EVENTS IN THE NEAR-EARTH MAGNETOTAIL

ZHOU Guocheng¹ CAI Chunlin¹ Henri REME² Andre BALOGH³
CAO Jinbin¹ WANG Deju¹

¹(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²(Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, France)

³(The Blachett Laboratory, Imperial College, London, U. K.)

Abstract

Hot ion ($\sim 5\text{ eV/e} - 32\text{ keV/e}$) and magnetic field data observed by Cluster II-C1 CIS/HIS and FGM during the magnetotail plasma sheet crossing on September 15, 2001 are analyzed in this paper. In the interval of 0340—0440 UT, fast tailward ion flows ($V_{X\text{GSM}} < 0$) were observed, which were associated with the enhancements of southward and dusk-downward magnetic fields ($B_{Z\text{GSM}} < 0$ and $B_{Y\text{GSM}} < 0$ or > 0). It can be inferred from these observations that magnetic reconnection events took place at $X_{\text{GSE}} > -18.6R_e$ within the plasma sheet in the interval of 0340—0440 UT on September 15, 2001. The characteristics for these events are consistent with the physical pictures of theory for a quasi-collisionless magnetic reconnection. Hence these events should be called as quasi-collisionless magnetic reconnection events.

Key words Cluster II spacecraft, Geomagnetic tail, Magnetic reconnection event