

Huang Z Y, Pu Z Y, Xiao C J. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/RAPID observations on January 26, 2001. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(2):181~189

2001 年 1 月 26 日高纬磁层顶通量管事件的观测研究

黄宗英¹ 濮祖荫^{1*} 肖池阶¹ 宗秋刚² 傅绥燕¹ 谢伦¹ 史全岐¹
曹晋滨³ 刘振兴³ 沈超³ 史建魁³ 路立³ 王隼权³ 陈涛³
T Fritz² K-H Gassmeier⁴ P Daly⁵ H Rème⁶

1 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

2 Boston University, USA

3 中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100080

4 IGM, Technische University Braunschweig, Germany

5 Max-Planck-Institute für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, Germany

6 CESR, Toulouse, France

摘要 2001 年 1 月 26 日 11:10~11:40UT, Cluster 卫星簇位于午后高纬磁鞘边界层和磁鞘区,此时行星际磁场 B_z 为南向. 本文对在此期间观测到的多次磁通量管事件作了详细的研究,获得一系列的新发现:(1)高纬磁鞘边界层磁通量管的出现具有准周期性,周期约为 78s,比目前已知的磁层顶向阳面 FTE 的平均周期(8~11min)小得多.(2)这些通量管都具有强的核心磁场;其主轴多数在磁场最小变化方向,少数在中间变化方向,有些无法用 PAA 判定其方向(需要用电流管 PAA 确定),这与卫星穿越通量管的相对路径有关.(3)每个事件都存在很好的 HT 参考系,在 HT 参考系中这些通量管是准定常态结构;所有通量管都沿磁层顶表面运动,速度方向大体相同,都来自晨侧下方. 通量管的径向尺度为 $1\sim 2R_E$,与通常的 FTE 通量管相当.(4)起源于磁层的强能离子大体上沿着管轴方向由磁层向磁鞘运动;起源于太阳风的热等离子体沿管轴向磁层传输. 通量管为太阳风等离子体向磁层运输和磁层粒子向行星际空间逃逸提供了通道.(5)每个通量管事件都伴随有晨昏电场的反转,该电场为对流电场.

关键词 磁重联 磁通量管 磁层顶边界层 磁通量管主轴分析 HT 分析

文章编号 0001-5733(2004)02-0181-09 **中图分类号** P353 **收稿日期** 2003-01-27,2003-11-02收修定稿

MULTIPLE FLUX ROPE EVENTS AT THE HIGH-LATITUDE MAGNETOPAUSE: CLUSTER/RAPID OBSERVATIONS ON JANUARY 26, 2001

HUANG Zong-Ying¹ PU Zu-Yin¹ XIAO Chi-Jie¹ ZONG Qiu-Gang² FU Sui-Yan¹ XIE Lun¹
SHI Quan-Qi¹ CAO Jin-Bin³ LIU Zhen-Xing³ SHEN Chao³ SHI Jian-Kui³ LU Li³
WANG Nai-Quan³ CHEN Tao³ T Fritz² K-H Gassmeier⁴ P Daly⁵ H Rème⁶

1 Institute of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Center for Space Physics, Boston University, 725 Commonwealth Avenue, Boston MA 02215, USA

3 Center for Space Science and Application Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

4 IGM, Technische University Braunschweig, Germany

5 Max-Planck-Institute für Aeronomie, Katlenburg-Lindau, Germany

6 CESR, Toulouse, France

Abstract From 11:10 to 11:40UT on January 26, 2001 four Cluster-II spacecrafts were located in the dusk-

基金项目 国家自然科学基金委重点项目(49834040)、重大项目(40390150)和国家重大基础科学项目(G200000784).

作者简介 黄宗英,男,1977年生,1999年于北京大学获空间物理专业学士学位,博士研究生. E-mail: huangzy@pku.edu.cn

通讯作者 濮祖荫,男,1937年生,教授,博士生导师. 主要从事磁层物理,包括磁重联、磁层亚暴和磁层不稳定性研究. E-mail: zypu@pku.edu.cn

side high latitude regions of the magnetosheath and the magnetosheath boundary layer. During this time interval the interplanetary magnetic field (IMF) had a negative B_z component. A detailed study on the multiple flux ropes (MFRs) observed in this time period is conducted in this paper. It is found that the MFRs in the high latitude magnetosheath boundary appeared quasi-periodically with a repeated time period of about 78s, which is much shorter than the averaged occurrence period (about 8-11 minutes) of the flux transfer events (FTEs) at the dayside magnetopause. All the flux ropes observed in this event had a strong core magnetic field. The principal axis of the most flux ropes are found to lie in the direction of the minimum magnetic field variation. A few flux ropes had their axes lying in the direction of the middle magnetic field variation; while for the remainders their principle axes could not be determined by the method of Principal Axis Analysis (PAA). The reason that causes this complexity relies on the different trajectories of the spacecraft passing through the flux ropes. Each flux rope had a good corresponding HT frame of reference in which it was in a quasi-steady state. All flux ropes moved along the surface of the magnetopause in a similar direction indicating that these flux ropes were coming from the dawnside low latitude. Their radial scale is found to be $1-2 R_E$, comparable to the normal diameter of FTEs. The energetic ions originated from the magnetosphere were flowing out to the magnetosheath on the whole, while the solar wind plasma was seen to flow into the magnetosphere along the axis of the flux ropes. The flux ropes offered channels for the transport of the solar wind plasma into the magnetosphere and the escape of the magnetospheric plasma into the interplanetary space. Each event was accompanied by an enhanced reversal of the dusk-dawn electric field, which could be identified to be the convective electric field in nature.

Key words Magnetic reconnection, Flux rope, Magnetopause boundary layer, Maximum/Minimum variation analysis, DeHoffmann-Teller analysis.

1 引言

磁层顶是磁层和磁鞘之间的过渡区,是太阳风与磁层相互作用的主要区域.太阳风和磁层发生在磁层顶的相互作用导致磁鞘不断向磁层运输能量、动量和质量,形成磁层边界层(位于磁层顶电流片内侧)、磁鞘边界层(位于磁层顶电流片外侧),并产生多种不同尺度的结构.在向阳面高纬磁层区域,卫星不仅能够探测到发生于本地附近的磁重联及相关的通量传输事件(FTEs),也能够探测到从低纬向高纬运动的磁重联结构,同时还经常可以观测到磁鞘等离子体直接进入磁层.因此,高纬磁层顶及其边界层一直是磁层探测中重要的内容.此外,高纬磁层顶边界层与极隙区相邻.极隙区磁场呈漏斗形,太阳风等离子体可以沿磁力线直接进入磁层;极区磁层粒子也可以经过极隙区向行星际空间逃逸或向等离子体幔和尾瓣传输.极隙区磁重联以及极隙区与高纬磁层顶的关联是太阳风-磁层耦合研究中的一个有待揭示的新课题^[1].

磁重联是磁场冻结效应失效时磁场的拓扑形态发生变化、磁力线断开并重新连接的过程,是磁场能量转化为等离子体动能和热能的有效途径^[2].磁层

顶发生磁重联时,行星际磁场(IMF)和磁层磁场相连接,磁鞘等离子体可以携带着能量和动量沿着开放的磁通量管进入磁层.20多年前HEOS 2卫星发现,向阳面高纬磁层顶两侧等离子体密度与温度十分相近,磁层顶内侧磁场和等离子体处于湍动状态,参数接近于 $1^{[3]}$.最近Cluster的观测进一步确认了上述特征^[1].这些观测特征是太阳风等离子体直接进入磁层的证据,是太阳风-磁层耦合的一个重要环节.至今已提出若干机制来解释这些观测现象,但具体的磁重联过程还很不清楚^[3].欧空局发射的Cluster卫星簇每年有大约3个月的时间不断穿越向阳面高纬磁层顶,为观测研究这一区域的磁重联过程提供了极好的机会^[4].

Cluster卫星簇由4颗卫星组成,近地点距地心4个地球半径(R_E),远地点距地心 $19.6 R_E$,卫星之间的距离依据轨道位置和研究目标的需要可以在 $200 \sim 2000 \text{ km}$ 之间调整.Cluster首次实现了对空间小尺度结构的多点协同观测,是空间探测史上的一个重要里程碑,为观测研究磁重联及其产生的重联层、通量管等不同尺度的结构提供了极好的机会^[4].2001年1月26日Cluster卫星簇由极隙区经过午后高纬磁层顶进入磁鞘.卫星在磁层顶边界层附近滞留了约两小时,在此时段中4颗卫星构成规则

的四面体,卫星彼此间的距离约为 600 km. 卫星数次穿越磁层顶,观测到多次阵发性的高速流、FTE 事件和准周期的通量管与强能离子突增事件^[5]. Bosqued 等^[5]对 10:10~11:10UT 时段磁层顶的厚度、法线方向、整体运动和磁重联特征及 11:30~11:33UT 期间的 FTE 事件做了详细研究,但是对 11:10~11:40UT 的准周期通量管事件没有进行分析. 本文将对 11:10~11:40UT 期间的准周期通量管与强能离子突增事件进行分析,并对 FTE 事件作进一步的探讨.

2 Cluster 观测结果

本文所采用的数据取自 Cluster 携带的强能粒子探测器 (RAPID)、磁通门磁强计 (FGM) 和热等离子体探测器 (CIS). RAPID 的测量范围为:电子 20~400 keV/e,质子 30~1500 KeV/e,重离子 10~1500 keV/e. 探测极角范围 0~180°,结合卫星自转可以测量全方位的粒子分布. 关于 Cluster 的轨道及上述几种仪器的性能的介绍,可参阅文献 [6~8].

2001 年 1 月 26 日 11:10~11:40UT, Cluster 离开极隙区后,位于高纬磁鞘过渡区(磁层顶外侧). 图 1a 给出了此段时间卫星的大致位置: $X = 8 R_E$, $Y = 5.5 R_E$, $Z = 9 R_E$. 对 10:10~11:40 的磁场数据所做的最小变化量分析 (MVA) 表明,在此时段内卫星所在位置处平均磁层顶外法线方向在 GSE 坐标系中的单位向量为 {0.6296, 0.3294, 0.7037}. 图 1b

给出了卫星 12h 的运动轨迹. 图 2 是 ACE 卫星观测到的 IMF,太阳风等离子态密度 N_{sw} 和速度 V . 此时 ACE 卫星位于磁层顶前方拉格朗日点 (L1) 附近. 由图可知,此期间太阳风速度大约为 350km/s,经过 ACE 卫星的结构大约经过 70min 传播到地球. 事件发生一小时前及其相近的时段内,IMF 持续南向和地球方向 (B_z 约为 -3nT, B_x 约为 -0.5nT),并具有较大的东向分量 (B_y 约为 -6nT). IMF 的这种拓扑形态很容易导致磁层顶磁场分量重联^[9]. 图 3(图版) 是该日 Cluster 测量到的 08:00~12:00UT 时段数据, B 为磁场测量值. 由图可以看出卫星依次经过等离子体幔、极隙区、磁层边界层和磁鞘边界层,最后进入磁鞘. 由图看出,邻近极隙区的磁层顶内外边界层充满强能离子,但强能电子通量却很低.

图 4(图版) 示出了 11:10~11:40UT 期间的磁场、热等离子体速度、密度和温度以及 RAPID 观测到的强能质子 (>30keV) 通量,其中磁场和速度矢量给出的是在平均磁层顶局地坐标系内的投影,图中 1,2..8 和 , 分别表示离子突增和通量传输事件. 由图可知,这段时间内磁场的 B_N 分量多次出现具有双极性特性的变化,同时 B_N 的每次反转都对应于一次强能离子突增,磁场增强,等离子体温度增加,密度减小,速度偏转. 这说明卫星在磁层顶外磁鞘边界层观测到了磁重联产生的磁通量管^[10],通量管中强能离子通量远高于管外. 这些事件都具有 FTE 通量管事件的特征,本文称之为多重通量管事件(以竖虚线及数字标识各个事件). 其中 11:10~

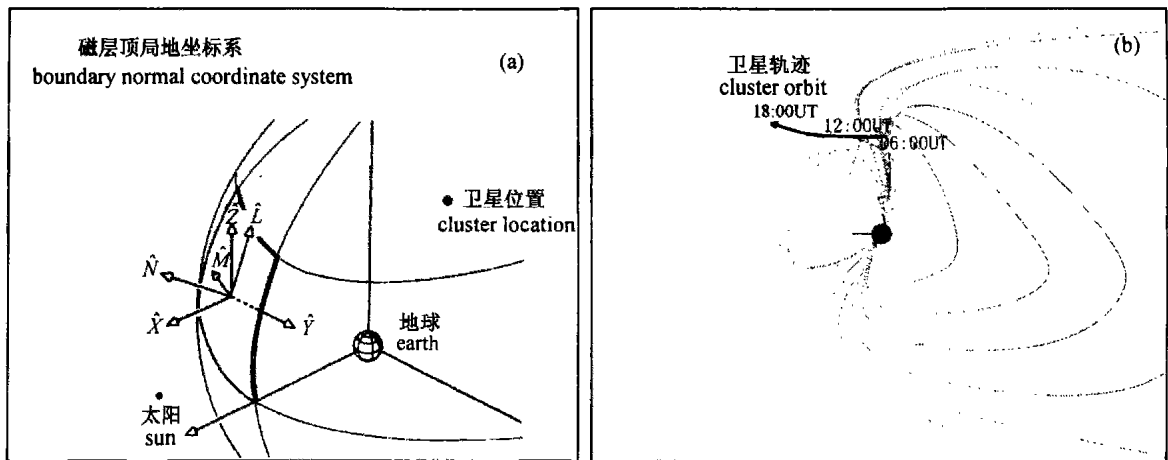


图 1 2001-1-26 11:10~11:40UT 期间 Cluster 卫星簇的位置及运动轨迹

(a) 卫星的位置 ($X: 4 \sim 7 R_E, Y: 7 \sim 9 R_E, Z: 9 R_E$); 卫星附近的平均磁层顶局地坐标系的坐标方向为 (-0.7626, 0.0887, 0.6408; 0.1486, -0.9400, 0.3070; 0.6296, 0.3294, 0.7037); (b) 卫星的运动轨迹: 由高纬磁层顶向磁鞘运动; 图中 X, Y, Z 为自然地理 GSE 坐标系, L, M, N 表示 3 个变化方向.

Fig. 1 The location and trajectory of Cluster during 11:10~11:40UT on January 26, 2001

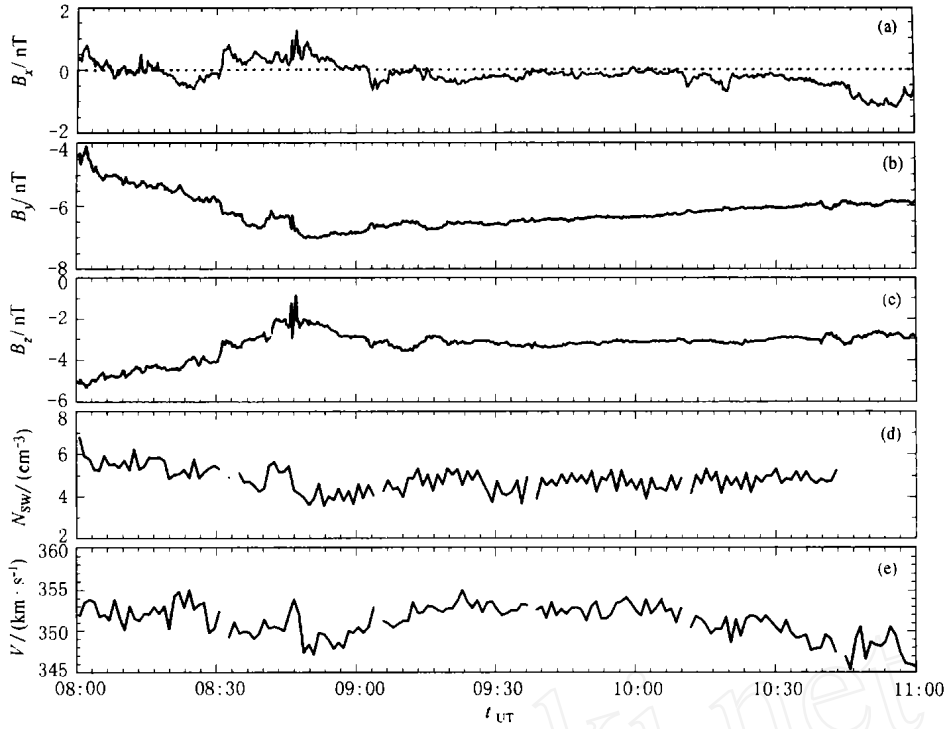


图 2 ACE 卫星观测到的 2001 年 1 月 26 日的行星际条件
(a)、(b)、(c) 为行星际磁场 (IMF); (d) 太阳风等粒子体密度; (e) 太阳风速度。

Fig. 2 The interplanetary conditions observed by ACE satellite on January 26, 2001

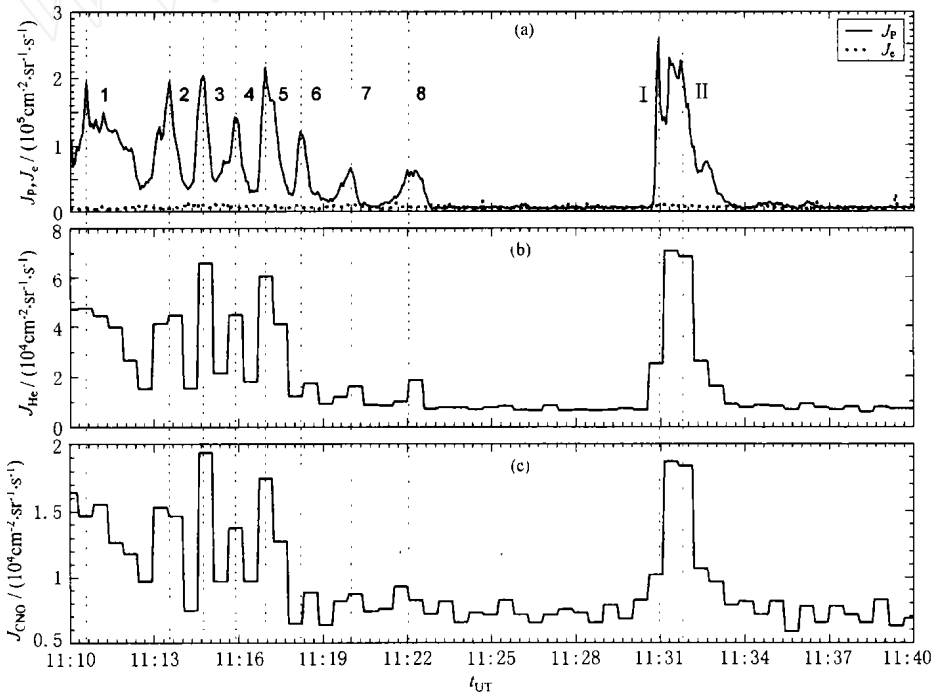


图 5 SC3 强能粒子探测器 (RAPID) 观测到的强能粒子通量
(a) 强能质子和电子通量 (>30keV); (b) 强能氦离子通量 (>50keV); (c) 强能重离子通量 (>100keV 主要为氧)。

Fig. 5 The energetic particles observed by RAPID onboard SC3

11:23UT 期间通量管的出现具有准周期性。由频谱分析可以得出,其重复周期约为 78s,比向阳面磁层

顶 FTEs 的平均周期 (8~11min) 短得多^[10]。11:30~11:33UT 期间 FTE 事件比较强, Bosqued 等^[5]认为

是一个 FTE 事件,但细致分析表明,它们实际是(部分)重叠的两个 FTE 事件^[11,12].

图 5 为 11:10~11:40UT 期间 Cluster 第三颗卫星(SC3)观测到的强能离子数据,图 5(a~c)分别为强能质子和电子通量、强能氦离子通量和强能重离子(主要为氧)通量.由图可知,每次强能质子突增均对应强能氦离子和氧离子的突增;质子通量峰值达到 $2.5 \times 10^5 \text{ (cm}^2 \text{ sr}^{-1} \text{ s}^{-1})$,比本底(磁鞘)高了一个数量级.强能氦离子和氧离子通量的峰值也比本底高出一倍.值得注意的是,强能氦离子与强能质子通量之比 $J_{\text{He}}/J_p \approx 20\%$;强能氧离子与强能质子通量之比

$J_o/J_p \approx 10\%$.如此之高的比率表明,这些强能离子成份仅能起源于磁层,而非太阳风(太阳风中 $J_o/J_p \sim 0.04\%$)^[13].图 6(图版)给出了 RAPID 探测到的强能粒子谱图.由图中极角(6d)和方位角分布(6e)可以看出,这些来自磁层的强能离子向黄昏方向运动,极角方向总体向上,有时接近平行于赤道面.图 7 给出了 SC3 测得的晨昏向电场 E_D .由图看出,通量管到来时除了磁场 B_N 反转和强能离子通量增高外,电场发生负-正翻转, B_N 和 E_D 的变化有反位相关系.显然两者之间在物理上存在必然联系.

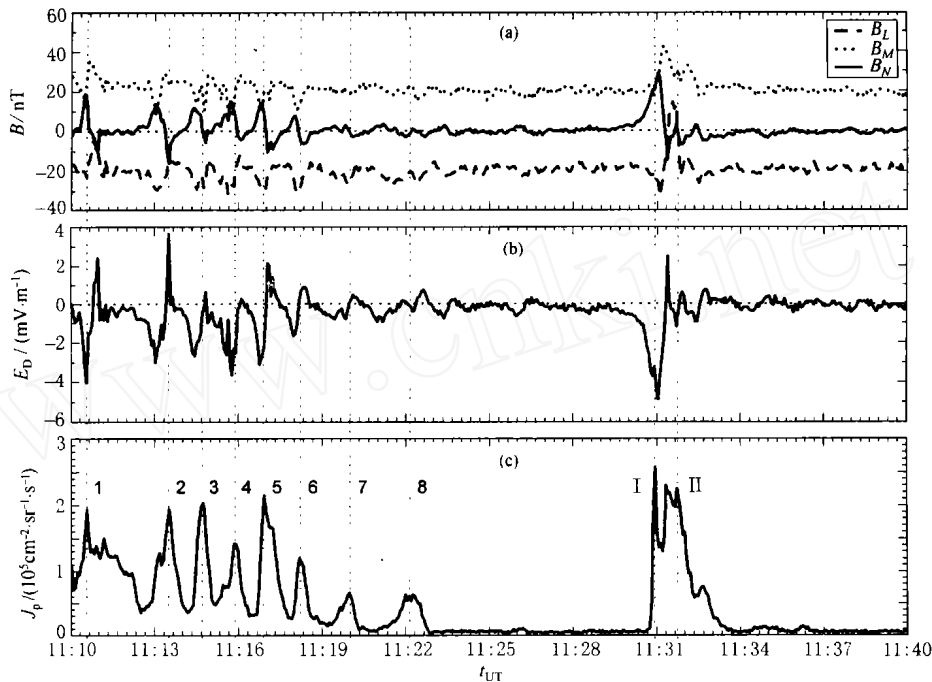


图 7 SC3 观测数据

(a) LMN 参考系下磁场各分量;(b) 黄昏方向的电场分量 E_D ;(c) 强能质子通量($>30\text{keV}$).

Fig. 7 Measurements obtained by SC3 from top to bottom

3 通量管轴线方向分析

3.1 最小变化分析(MVA)和主轴分析法(PAA)

1967 年 Sonnerup 和 Cahill 等^[14]提出了 MVA 法.该方法利用单颗卫星数据近似估计一维电流片、激波面或其他等离子体间断面的法线方向.后来 MVA 分析被推广用于确定磁通量管的轴线方向,此时称之为主轴分析(PAA)法^[15].

本文用 PAA 确定通量管的主轴方向时必须与适当的物理模型相结合.根据卫星穿越通量管的路径,迄今已提出了两个模型.(1)Farrugia-Southwood-Elphic(FSE)模型:当卫星与通量管擦边而过时,管外

磁场和流场的扰动与不可压缩近似的结果相差不远,此时磁场 MVA 分析得到的最小变化方向(即 N 方向)近似为管轴方向^[16,17], B_N 分量值较大.

(2)Russell-Elphic(RE)模型:如果通量管内有强的核心磁场,则当卫星穿过通量管内部时,管轴方向为中间变化方向,即 M 方向^[18], B_N 分量值很小.必须指出,近年来在分析磁层顶磁重联事件时,不少工作简单地采用 FSE 模型,认为 N 方向就是通量管的主轴方向.显然,这很容易导致错误结论,从下节的分析中可以看到这一点.

3.2 通量管主轴分析结果

对 2001 年 1 月 26 日 11:10~11:23UT 8 个通量

管事件和 11:30 ~ 11:33UT 的两个连续 FTE 事件进行了 PAA 分析,结果见表 1. 表中 α 和 β 分别表示在 GSE 坐标系中通量管轴线方向的方位角和极角. 由表可见,10 个通量管事件可分成三类: 1. 符合 FSE 模型, 主轴在 N 方向; 2. 符合 RE 模型, 以 M 方向为主轴方向; 3. PAA 判断失效, 主轴方向不清楚. 由表 2 可知, 大多数事件属于第一类. 这些通量管都有一个很强的核心场, 即 B_N 值大, 扰动较小. FTE-I 属于第二类, B_M 大约为 -40nT, B_N 平均不到 10nT, M 为主轴方向. 事件 1 和 FTE-II 属于第

三类, M 和 N 方向的变化量相当, PAA 分析无法判断通量管的轴向. 要确定这一类事件的主轴方向, 需要借助通量管电流分析 (见文献 [11] 和本文后续文章 [12]). 我们从以上三种类型中选定代表性事件, 分别画出它们的磁场分量的矢端曲线, 如图 8 所示. 图中 B_L , B_M 和 B_N 代表磁场在 L , M 和 N 三个方向上的投影. 不难从上述矢端曲线中看到这三类事件的不同特征.

上述 PAA 分析给出了一个十分重要的结果: 所有 10 个通量管的轴线方向都指向早晨, 极角向下, 或

表 1 通量管 PAA 分析结果 (SC3)

Table 1 PAA results for the observed events (SC3)

事件	t_{UT}	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	主轴方向 (GSE)	α/β
1	~ 11:10	-46	-42	0.4665, -0.4835, -0.7407 (N?)	1.9
2	~ 11:13	-41	-20	0.2595, -0.2216, -0.9400 (N)	2.5
3	~ 11:14	-54	-65	0.5290, -0.7326, -0.4283 (N)	39.0
4	~ 11:15	-34	-74	0.7983, -0.5365, -0.2737 (N)	13.4
5	~ 11:17	-48	-65	0.6038, -0.6722, -0.4284 (N)	6.7
6	~ 11:18	-53	-78	0.5916, -0.7800, -0.2040 (N)	36.8
7	~ 11:19	-80	-79	0.1643, -0.9679, -0.1903 (N)	4.7
8	~ 11:22	-43	-72	0.6980, -0.6425, -0.3614 (N)	7.8
	~ 11:30	-72	-87	0.3004, -0.9522, -0.0564 (M)	1.7
	~ 11:31	-147	-61	-0.7391, -0.4744, -0.4782 (N?)	4.3

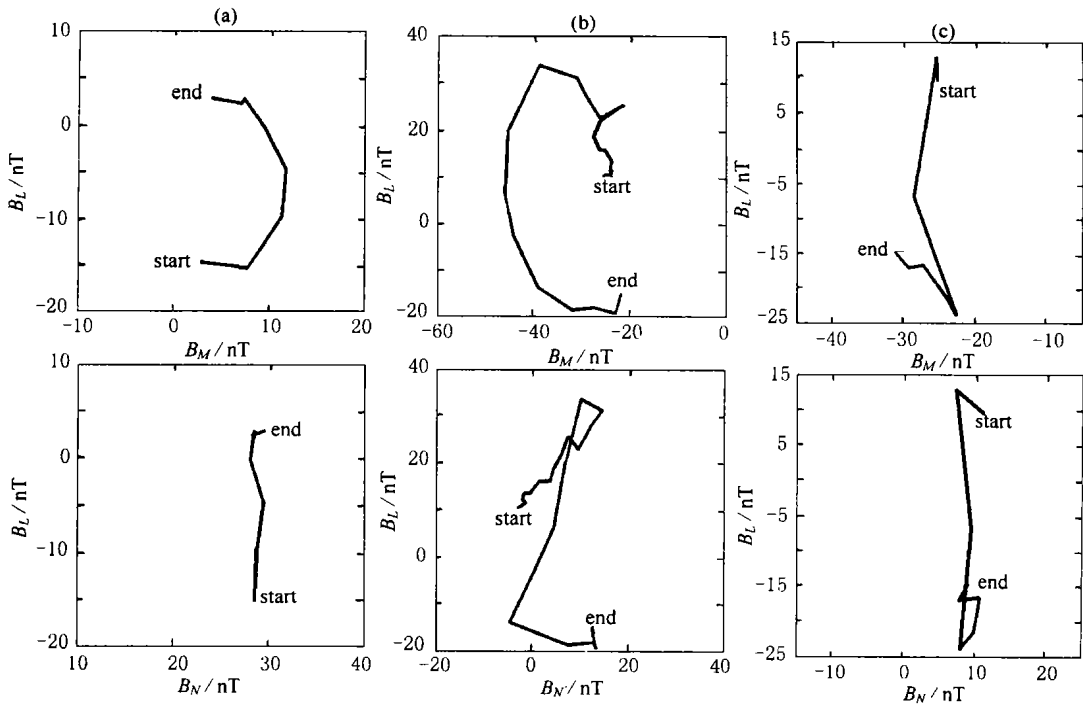


图 8 三个典型事件的磁场矢端图

(a) 事件 6, N 为主轴方向; (b) 事件 8, M 为主轴方向; (c) 事件 1, PAA 主轴方向判定失效.

Fig. 8 The hodogram of three representative events

接近平行于赤道面,与起源于磁层的强能离子的运动方向相反. 值得注意的是,这些管轴方向都与本底磁场方向大体一致.

4 通量管结构和整体运动特性分析

4.1 De Hoffmann-Teller (HT) 分析

为了研究通量管的运动特性,我们对表 1 所列的 10 个通量管事件进行了 HT 分析,分析结果见表 2,其中 θ_{HT} 和 ϕ_{HT} 分别表示 V_{HT} 的方位角和极角. 分析表明对于每个通量管都存在一个较好的 HT 参考系 ($E_c - E_{HT}$ 比例系数接近于 1),说明这些通量管都是准定常态结构,都以 V_{HT} 速度运动. 由表 2 还可以

看出,各个通量管运动的方向大致相同,说明它们来自同一个方向;通量管的运动速度与平均磁层顶的法线方向近似垂直,即通量管沿着磁层顶向黄昏向和北极方向运动. 据此可以推知,磁重联的发生地点应该处于卫星的东下方. 根据卫星穿越通量管的时间和垂直于通量管轴的 HT 速度分量的大小,可以估算出通量管的径向尺度大约为 $1 \sim 2 R_E$,与通常观测到的 FTE 通量管的径向尺度相符^[10].

4.2 Walén 检验

本文计算了 HT 参照系内的等离子体运动速度 $V^* = V - V_{HT}$,并进行了 Walén 检验^[19]. Walén 检验就是画出以 Alfvén 速度 V_A 各分量的时间序列为横坐标和 $V^* = V - V_{HT}$ 各分量的时间序列为纵坐标

表 2 各个通量管事件对应的速度 V_{HT} 和 Walén 系数 V^*/V_A ($V^* = V - V_{HT}$)

Table 2 V_{HT} and Walén coefficient (the last column) for all events ($V^* = V - V_{HT}$)

事件	t_{UT}	$\theta_{HT}/(^{\circ})$	$\phi_{HT}/(^{\circ})$	$ V_{HT} /(km \cdot s^{-1})$	V^*/V_A	事件	t_{UT}	$\theta_{HT}/(^{\circ})$	$\phi_{HT}/(^{\circ})$	$ V_{HT} /(km \cdot s^{-1})$	V^*/V_A
1	~ 11:10	150	57	282.3	0.4948	6	~ 11:18	149	57	284.0	0.7622
2	~ 11:13	149	58	301.6	0.6649	7	~ 11:19	145	61	322.9	1.0099
3	~ 11:14	151	56	273.2	0.6026	8	~ 11:22	145	61	317.7	1.0081
4	~ 11:15	148	60	314.5	0.8081		~ 11:30	150	58	290.6	0.2284
5	~ 11:17	147	59	304.8	0.7138		~ 11:31	155	54	275.0	0.5362

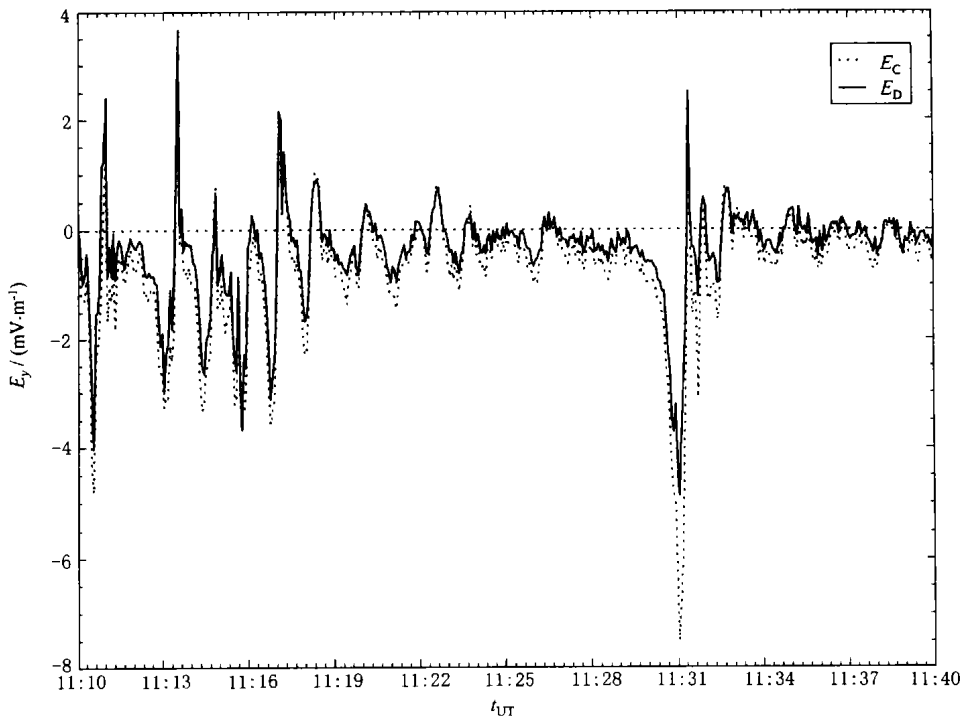


图 9 SC3 测量的晨昏向电场 E_D 和对流电场 E_C 的对比

实线表示实测电场 $D(y)$ 分量,虚线表示计算得到的对流电场 y 分量.

Fig.9 Comparison of the measured dawn-dusk electric field (the solid line) and the y-component of the calculated convection electric field (dotted line)

的点分布图. 按磁流体力学理论,若发生磁重联时磁层顶电流片为旋转间断面,上述点分布与高度相关,且拟合曲线应为斜率为 1 的直线,直线的斜率为 W_{al} 系数. 表 2 最后一列给出了本文 10 个通量管事件的 W_{al} 系数. 尽管 W_{al} 系数大小不等,但都是正的. 这说明在 HT 参考系内,磁鞘热等离子体沿着本底磁场方向运动,也就是说总体上向南和向早晨方向运动. 前节已经指出,起源于磁层的强能粒子的运动方向为黄昏向和北向. 两者相结合可以构造这样一个图像:通量管内强能粒子由磁层沿磁力线向外逃逸,而磁鞘的等离子体则沿着磁力线向磁层运输;通量管内既有来自磁层的强能等离子体,也有来自磁鞘的热等离子体.

上述结果表明,磁层顶磁重联及重联产生的通量管不仅提供了太阳风等离子体向磁层运输的通道,同时也使得磁层强能粒子向行星际空间逃逸成为可能.

4.3 电场分析

图 9 给出了 SC3 对晨昏方向电场分量 E_D (相当于 GSE 坐标系中的 y 分量)的观测结果与对流电场 $E_c = -v \times B$ 的晨昏分量的比较,其中 v 为热等离子体的宏观速度. 图 9 清晰地表明,两者数值与变化均相符甚好,说明观测到的 E_D 本质上是对流电场. E_D 的负-正翻转与 B_N 正-负翻转相对应. 通量管内部及其附近的电场主要是对流电场,这可能对每个通量管事件都可以找到一个比较好的 HT 参考系的原因.

5 结论和讨论

本文对 2001 年 1 月 26 日 11:10~11:40UT 期间的磁重联通量管事件进行了研究,并做了 PAA 和 HT 分析.

5.1 Cluster 4 颗卫星在磁层顶外侧磁鞘边界层和磁鞘内观测到了磁层顶法线方向磁场分量多次的正负反转,磁场数值增加;磁鞘等离子体密度减小,温度增大,速度发生偏转;起源于磁层的强能质子、氦离子和重离子(主要是氧离子)通量增加. 综合这些观测数据可以得出结论:Cluster 在磁层顶磁鞘一侧观测到了多次磁重联通量管.

5.2 在磁层顶外侧磁鞘边界层共观测到 8 次通量管事件. 对这些事件进行频谱分析后可知,它们是“准周期”地出现的,周期约为 78s,比过去在向阳面观测到的 FTE 事件的平均周期(8~11min)小很多.

如此起伏频繁的瞬时磁重联事件在向阳面磁层顶被发现尚属首次;现有的瞬时磁重联数值模拟还无法给以解释. 这为磁层顶磁重联研究提出了新的问题.

5.3 对上述准周期通量管事件进行主轴分析表明,它们都带有强的核心磁场,多数符合 FSE 模型,主轴在磁场最小变化 N 方向;少数符合 RE 模型,主轴在中间变化的方向(M 方向);另外一些事件 PAA 判断失效,要最终确定这一类事件的主轴方向,需要借助通量管电流分析^[11,12]. 所有 10 个通量管的轴线方向都指向早晨,极角向下或接近平行于赤道面,与本底磁场方向大体一致.

5.4 HT 分析表明,这些通量管都存在一个很好的 HT 参考系,在这些参考系中它们都是准定常态结构. 所有 10 个通量管的整体运动速度 V_{HT} 的方向和大小大体相同,沿磁层顶表面,向北(或大致在赤道面内)和黄昏方向运动. 说明这些重联结构都来自于卫星的晨侧下方. 通量管的径向尺度可估计为 $1 \sim 2 R_E$,与通常的 FTE 通量管相当.

5.5 将管轴方向与强能离子运动方向比较后发现,起源于磁层的强能离子大体上沿着管轴方向由磁层向磁鞘运动. 另一方面,在 HT 参考系中,起源于太阳风的热等离子体沿管轴方向向磁层传输. 这一结果说明,磁层顶磁重联及开放通量管为太阳风等离子体向磁层运输提供了通道,同时也使磁层强能粒子向行星际空间逃逸成为可能.

5.6 通量管都伴随有晨昏向电场的偏转,该电场为对流电场.

磁层顶磁鞘边界层中发现的短周期的重联通量管比通常在向阳面磁层顶观测到的周期要小很多,其原因需要进一步进行分析. 从 HT 分析得到的通量管的整体运动速度来判断,这些事件是卫星晨侧低纬某处的分量重联造成的. 因为单纯的 Alfvén 波不可能使磁层的强能粒子沿某一特定方向流出磁层,因此这些事件不可能用 Alfvén 波来解释. 磁重联通量管内的电流大小和方向将在文献[11,12]中详细研究. 当 PAA 分析法失效时,如何判定一个通量管的轴向? 导致此次多重通量管事件的重联点位于何处? 其重联条件和重联过程有何特点? 这些问题将在后续的文章和工作中作进一步探索.

本文得到美国 Boston 大学空间物理中心的支持. 所用数据由中国 Cluster 数据与研究中心、Cluster 计划 RAPID、FGM、CIS 和 EFW 项目组提供. 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

- [1] Zong Q G, Wilken B, Fu S Y, et al. Energetic oxygen ions in the magnetosheath in the negative Bz phase of the CME on January 10, 1997. *Adv. Space Res.*, 2000, **25**(12): 2421 ~ 2424
- [2] 王 水,李罗权. 磁场重联. 合肥:安徽教育出版社,1998
Wang S, Li L Q. Magnetic Reconnection. Hefei: Anhui Education Press, 1998
- [3] Galeev A, Sato T, Nishida A, et al. Magnetospheric plasma physics. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 1982. 49 ~ 143
- [4] Escoubet C P, Schmidt R, Goldstein M L. Cluster science and mission overview. In: Escoubet C P, et al. eds. The Cluster and Phoenix Missions, Belgium: Kluwer Academic Publishers, 1997. 11 ~ 32
- [5] Bosqued J M, Phan T D, et al. Cluster observation of high-latitude magnetopause and cusp: initial results from the CIS ion instruments. *Annales Geophysical*, 2001, **19**:1545 ~ 1566
- [6] Balogh A, Dunlop M W, Cowley S W H, et al. The Cluster magnetic field investigation. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt ed. The Cluster and Phoenix Missions. Belgium: Kluwer Academic Publishers, 1997. 65 ~ 92
- [7] Rème H, Bosqued J M, Sauvaud J A, et al. The Cluster ion spectrometry (CIS) experiment. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt ed. The Cluster and Phoenix Missions. Belgium: Kluwer Academic Publishers, 1997. 303 ~ 350
- [8] Wilken B, Axford W I, Daglis I, et al. RAPID-the imaging energetic particle spectrometer on Cluster. In: Escoubet C P, Russell C T, Schmidt ed. The Cluster and Phoenix Missions. Belgium: Kluwer Academic Publishers, 1997. 399 ~ 473
- [9] Crooker N U. Dayside merging and cusp geometry. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**: 951 ~ 959
- [10] Russell C T, Elphic R C. Initial ISEE magnetometer results: Magnetopause observation. *Space Sci. Rev.* 1978, **22**: 681 ~ 715
- [11] Pu Zuyin, Zong Qiugang, Xiao Chijie, et al. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/rapid observation on January 26, 2001. *Surveys in Geophys.*, 2003, accept
- [12] 肖池阶,濮祖荫,黄宗英等. 2001 年 1 月 26 日磁层顶多重通量管事件的观测研究 (II) —空间电流密度计算及分析. 地球物理学报,待刊
Xiao C J, Pu Z Y, Huang Z Y, et al. Multiple flux rope events at the high-latitude magnetopause: Cluster/RAPID observations on January 26, 2001 (II)-the calculation and analysis of space current-density. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), submitted.
- [13] Zong Q G. Energetic oxygen ions in geospace observed by GEOTAIL spacecraft-An indicator of magnetospheric dynamics [Ph. D. thesis]. Lindau: Max-Planck-Institute Fur Aeronomie, 1999
- [14] Sonnerup B U Ö, Cahill Jr L J. Magnetopause structure and attitude from Explore 12 observations. *J. G. Res.*, 1967, **72**(1): 171 ~ 183
- [15] Sonnerup B U Ö, Maureen Scheible. Minimum and maximum variance analysis. In: Götz Paschmann, Patrick W Daly ed. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. Noordwijk: ESA Publications Division, 1998. 185 ~ 220
- [16] Farrugia C J, Elphic R C, Southwood D J, et al. Field and flow perturbations outside the reconnected field region in flux transfer events: theory. *Planet space sci.*, 1987, **35**(2): 227 ~ 240
- [17] Elphic R C, Southwood D J. Simultaneous measurements of the magnetopause and flux transfer events at widely separated sites by AMPTE UKS and ISEE 1 and 2. *J. G. Res.*, 1987, **92**(12): 13666 ~ 13672
- [18] Russell C T. Magnetic flux ropes in the ionosphere of Venus. *Geophysical Monograph*, 1990, **58**: 413 ~ 213
- [19] Alexander V. Khrabrov, Sonnerup BENG T U Ö DeHoffmanr-Teller Analysis. In: Götz Paschmann, Patrick W Daly ed. Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. Noordwijk: ESA Publications Division, 1998. 221 ~ 248

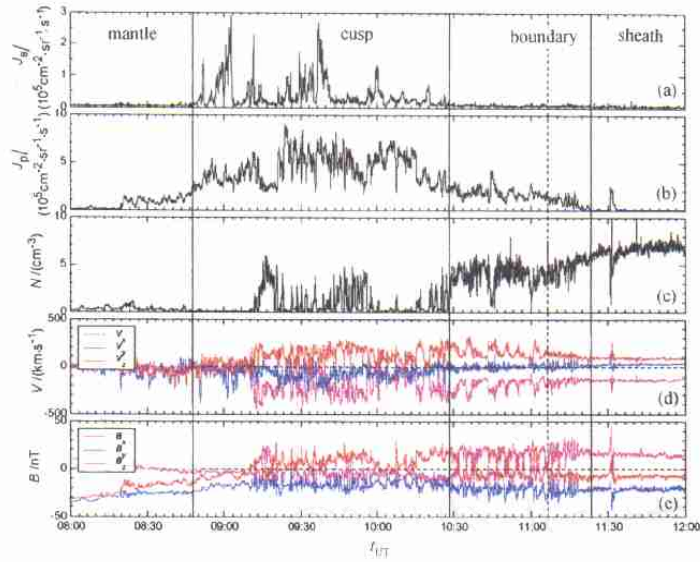


图3 2001年1月26日8:00~12:00UT期间Cluster/SC3的观测结果

(a)电子通量；(b)质子通量；(c)等离子体密度；(d)等离子体速度；(e)磁场测量值。

Fig.3 Cluster II/SC3 measurements during 8:00~12:00UT on January 26, 2001

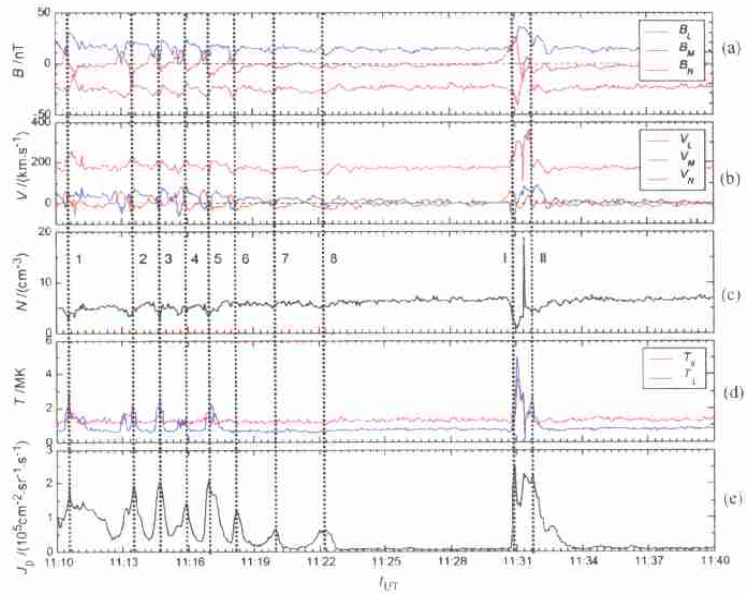


图4 11:10~11:40UT期间Cluster/SC3的观测结果

(a)磁层顶正交坐标系下的磁场；(b)等离子体速度；(c)等粒子体密度；(d)温度；(e)质子通量。

Fig.4 The detailed observation by SC3 during 11:10~11:40UT

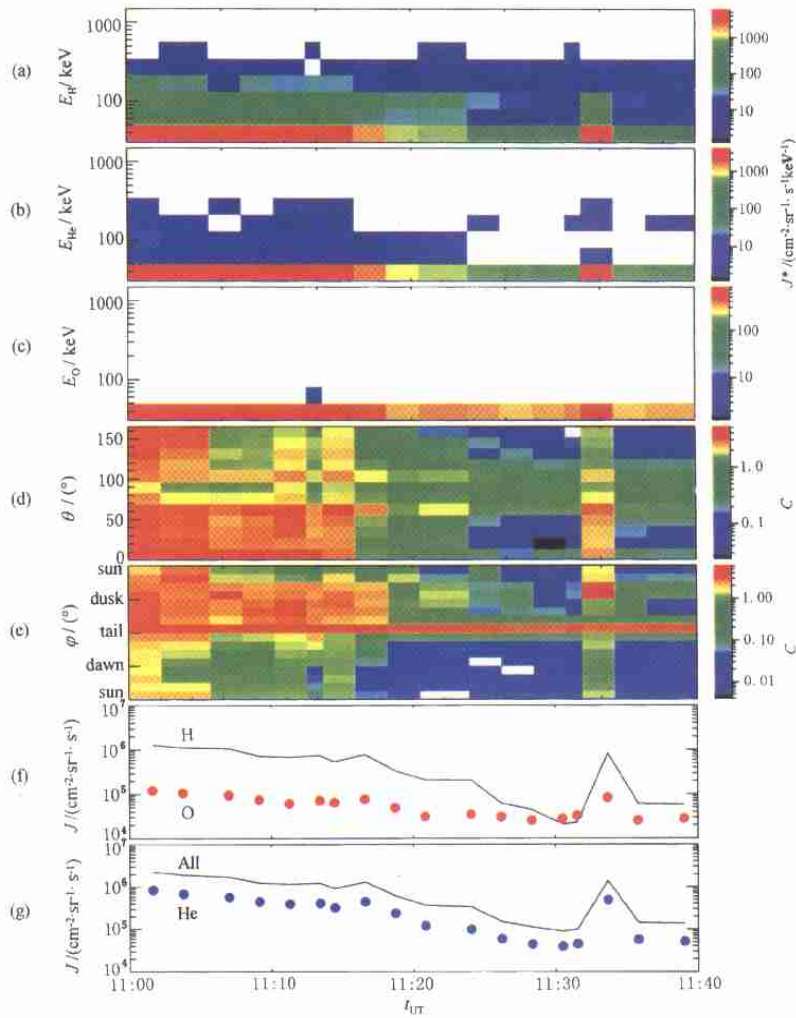


图6 SC3 RAPID探测到的强能粒子分布

(a)、(b)、(c)分别表示质子、氦离子和氧离子能通量（纵坐标表示能量高低，颜色表示粒子的微分通量 J^d 的大小）；
 (d)、(e).表示能量离子的极角和方位角分布（ C 表示每秒测量到的粒子个数）；
 (f)、(g)表示质子、氧离子、氦离子和所有离子的积分通量。

Fig.6 The energetic particles observed by Rapid/SC3