科学通报 2011 年 第 56 卷 第 7 期：457 ~ 463
专题：空间物理和空间天气学 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

等离子体片中高速流相关问题研究综述

傅绥燕[①②], 史全岐[③], 王赤[②], 郑玲[①], 郑昊[①], 孙为杰[③]

① 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
② 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;
③ 山东大学威海分校空间科学与物理学院, 威海 264209
E-mail: suiyanfu@pku.edu.cn

2010-11-11 收稿, 2010-12-22 接受
国家自然科学基金(40874086, 41031065)和国家重点实验室专项基金(08262DAA4S)资助

摘要 等离子体片中的高速流自从被提出以来, 由于其经常出现在磁层剧烈扰动期间而备受重视, 然而有关其形成机制和在磁层扰动过程中的作用, 特别是在整个磁层对流中的作用以及磁层亚暴触发过程中的作用并不十分清楚. 本文简单回顾了高速流研究的历史, 介绍了高速流的成因以及与极光的关联, 探讨其与等离子体磁结构的异同及其与背景等离子体的相互作用, 讨论了现有对高速流在磁层亚暴过程中作用的认识以及存在的问题, 并提出了高速流研究中应当关注的几个关键科学问题.

关键词
等离子体片
高速流
磁结构
磁层亚暴
偶极化

1 等离子体片中的高速流

地球磁层是太阳风与地球磁场相互作用而形成的, 发生在磁层顶和远磁尾的重联形成了一个拉长的磁尾位形, 其中闭合磁力线所包含的区域是等离子体片. 当两处的重联造成磁通量的传输不能平衡时, 会在磁尾聚集大量的能量, 这些能量将以亚暴的形式予以释放, 在此过程中磁场结构发生变化, 粒子被加速, 出现增强的电流等等. 伴随这些能量聚集和释放过程, 在等离子体片中常常会出现所谓的高速流.

20 世纪 70 年代初, 有研究发现在磁尾等离子体边界层存在有所谓的高速流动的事件(速度大于几百 km/s)[1], 这一类的高速流常常主要具有平行于磁场的分量, 或称为场向高速流. 之后, Baumjohann 等人[2]利用 AMPTE/IRM 的观测资料, 提出在中心等离子体片中也有高速流的存在, 并指出中心等离子体中的高速流出现的频率甚至可以高于等离子体片边界层以及外等离子体片区域, 同时给出了等离子体片中高速流的发生率和 AE 指数的统计相关性. 这一类的高速流, 常常具有较大的垂直于磁场方向的分量, 有时也称为对流高速流. Angelopoulos 等人[3,4]发现高速流经常以 10 min 左右为时间尺度出现, 进而提出了所谓爆发性的整体流(bursty bulk flow, BBF)的概念, 并从观测中证实了 AE 指数越大, BBF 事件的发生率就越高, BBF 的发生也与太阳风条件相关. 目前对于高速流没有统一的定义标准, 研究者常常根据工作的需要, 划定自己的高速流事件标准. 一般情况下, 以质子流速大于 300~400 km/s 为界, 有时也将流速标准定义为垂直于磁场的速度分量. 对流高速流与场向高速流在研究中都有涉及[5], 与亚暴相关的研究更多关注对流性质的高速流. 如果从时间上区分, 则是将发生在 10 min 以上的事件定义为一个 BBF 事件, 几分钟甚至于几十秒钟的事件常常被称为爆发性流动(bursty flow 或 flow burst).

由于在观测上, 粒子流速并不是直接测量, 而是通过测量粒子的分布再经过拟合计算得到的, 对于研究中的高速流事件, 也有一些不同的看法. 例如 Chen 等人[6]发现, 如果单纯以离子速度为标准, 当离子分布函数偏离麦氏分布时, 可能会将一阶矩函数积分效应造成的速度升高归于高速流. Lee 等人[7]也证实, 当粒子靠近边界层运动时, 即使没有整体流

英文版见: Fu S Y, Shi Q Q, Wang C, et al. High-speed flowing plasmas in the Earth's plasma sheet. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4361-y

动, 也有可能造成某些方向速度积分偏离零点. 因此对于高速流的研究尚需深入和仔细考虑离子分布函数的影响.

1.1 高速流在磁层对流、亚暴中的作用

虽然高速流发生的频率并不高[4,8], 在中心等离子体片里只持续大约 10%~15%的时间, 高速流传输的能量占亚暴能量的 10%左右, 且高速流的出现并不意味着亚暴的发生[9,10], 但因为一般情况下等离子体片中的对流是非常缓慢的[11,12], 因此人们普遍认为这些高速流在等离子片对流中起着非常重要作用. 对于高速流的研究也常常与亚暴研究紧密联系在一起.

传统的对流理论中存在的一个重要的问题就是所谓的"压力危机"[13], 也就是在考虑等离子体流动的同时, 也要考虑是否能将足够的磁通量带到内磁层, 并形成观测中出现的偶极化的现象. 因此研究高速流的尺度及其携带磁通量将有助于进一步明确高速流在磁层对流中的贡献. 有研究认为高速流可能是一些小尺度的空间结构, 在等离子体片中以类似束状的形式存在[14], 如图 1 所示. Angelopoulos 等人[15]认为单个 BBF 在 *Y-Z* 平面上的尺度小于 3 R_E, 而 Slavin 等人[16]则提出在亚暴膨胀相期间 BBF 的尺度可以达到 5~10 R_E. Nakamura 等人[17]利用 CLUSTER 多颗卫星数据, 根据卫星观测到的高速流的速度梯度, 计算得出 BBF 在晨昏方向和南北方向的平均空间尺度大约分别为 2 ~ 3 和 1 ~ 2 R_E.

Cao 等人[18]通过利用 CLUSTER 多颗卫星观测数据研究, 并与单颗卫星观测相比较, 得出了很有意义的结论: (1) 单颗卫星观测表明 BBF 的持续时间约为 10 min, 而 3 颗卫星联合观测则指出 BBF 的持续时间约 18 min. 这表明 BBF 的持续时间比以往研究上所认为的约 10 min 的持续时间要长. (2) 单颗卫星的观测表明 22%的亚暴过程中没有高速流出现, 而 3 颗卫星的联合观测指出只有 4.5%的亚暴没有出现高速流. 研究提出由于单颗卫星观测的局限使得高速流在传输能量方面的贡献可能被大大地低估了.

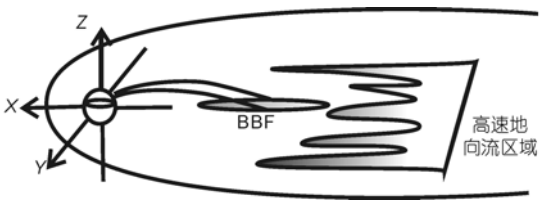

图 1 等离子体片高速流示意图
据 Sergeev 等人[14]修改

在对高速流与磁层亚暴关联的研究中, 高速流在亚暴膨胀相触发中的作用也是关注的热点. 有研究认为[19~21], 地向流动的高速流, 将大量的磁通带入, 引起磁场的堆积. Baumjohann 等人[22]认为磁尾偶极化及其尾向传播的原因正是因为高速流在近地受到压强梯度力作用减速并停止, 因而其携带的磁通量堆积在停止的锋面上, 形成偶极化锋面, 随着堆积的进行, 堆积锋面不断后撤. Shiokawa 等人[23]利用 AMPTE/IRM 的数据分析了亚暴高速流在近地等离子体片内的分布, 结果显示磁尾 13 R_E <|*X*|<15 R_E 内高速流出现概率明显减小. 据此认为在减速过程中产生的惯性电流引发了电流中断, 该电流与越尾电流方向相反, 从而导致亚暴膨胀相突发. 然而高速流减速虽然可以建立类似亚暴的电流楔, 却似乎难以建立相当的亚暴发生所需要的西向电急流[24]. 近来, Pu 等人[25]在根据 THEMIS 对一个亚暴事件的详细观测研究中提出, 中磁尾重联产生的地向高速流到达近地等离子体片后, 可能引起当地等离子体不稳定性, 在近磁尾触发亚暴的发生.

由于高速流常常与亚暴过程联系在一起, 有不少研究工作将高速流与极光动力学结合起来, 着眼于高速流在极光区中的响应. Fairfield 等人[26]研究了在 *X*>−15 R_E 中发生的亚暴与尾向高速流的关联. Ieda 等人[27]研究发现当 GEOTAIL 位于 *X*<−20 R_E 处观测到高速流时, 卫星的足点恰好映射到极区增亮的地区或靠近极区增亮的极向一侧. Nakamura 等人[28]认为发生在 10~30 R_E 的短时间的高速流与局地极光活动相关, 局地极光的活动被解释为高速流边界上的流剪切造成电流楔引起的[29] (图 2). 近来 Yahnin 等人[30]研究了 15 个等离子体片中高速流反转事件, 证实当高速流由尾向反转为地向时, 对应的极光向卫星足点极向扩展. 此外越来越多的观测表明了等离子体片高速流与南北向极光存在着密切的关联[31~34].

然而有关高速流是否与极光活动相关联目前仍然存在争议. Shue 等人[35]利用 POLAR 卫星的观测研究表明有近一半的地向高速流期间对应的极光是减弱的, 还有一些高速流发生在地磁非常平静的条件下. 也有研究表明高速流在地磁活动较强和较为平静的条件下, 发生的频率在统计上没有大的区

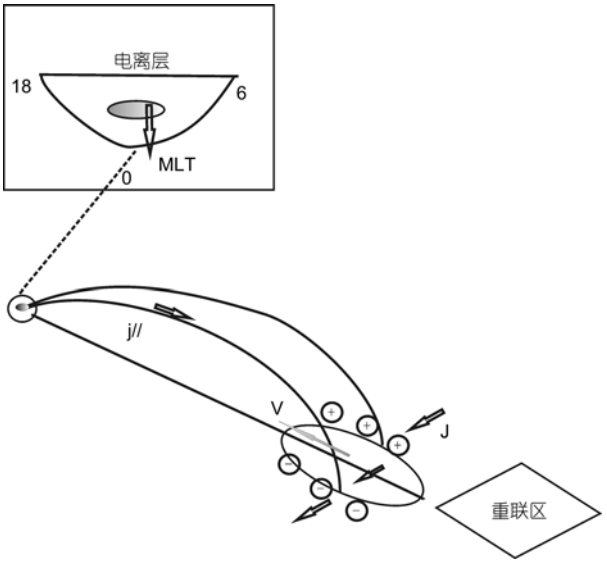

图 2　与高速流相关的场向电流及其相关的极光现象

据 Nakamura 等人[32]修改

别[36]. Shue 等人[37]的研究提出地向高速流应当被分为两类, 因为两类高速流在极区的响应是不同的. 发生在 X= −10 R_E 附近的高速流期间, 极光能量变化率很大, 表明这一类高速流极大地增强了夜侧的极光强度, 相应地在夜侧出现类似极光亚暴的典型变化; 而另一类发生在 X<−15 R_E 的高速流对应的极光能量变化率较低, 但在极光成像中可以看到明显的极向扩张和类似伪暴(pseudobreakups)的特征, 一些第二类的高速流也会继续向地向运动, 最终在极区造成亚暴的特征.

1.2　高速流的形成机制及与磁结构的关联

磁重联是将磁能转化为动能的有效机制, 因而高速流也常常被认为是与发生在等离子体片中爆发性的局地的磁重联相关. Angelopoulos 等人[4]使用 AMPTE/IRM 和 ISEE2 卫星数据, 分析了等离子体片中的爆发性整体高速流. 他们发现地向流主要出现在 X= −19 R_E 左右. Nagai 等人[38]根据 GEOTAIL 的观测到的高速流流动方向以及相伴随的磁场特性, 推测亚暴期间近地中性线的位置一般认为大约距地球 20~30 R_E. 事实上对于高速流是否由于磁重联形成依然存在争议. Lui 等人[39]提出电流中断发生时造成的力学不平衡也可以形成地向的高速流. 由于高速流的出现, 常常伴随磁场的偶极化, 也有观点认为在近地观测到的高速流可能是磁场偶极化的伴随效应. 地向高速流的出现还可以用“等离子体泡”理论来解释, Chen 和 Wolf[40]认为磁尾中因为某些原因形成“等离子体泡”. 这些“等离子体泡”常表现为低密度的区域, 由于极化电场的作用而高速向地球方向运动, 形成观测中的高速流.

早在 20 世纪 80 年代中期人们就利用 ISEE-3 的观测数据开展了对尾向传输的磁结构与等离子体团的研究, 这些研究随着 GEOTAIL 的成功得到加强. 与此同时, 人们还发现了地向流动的等离子团和(或)磁结构[41,42]. 在观测上等离子体团(或磁结构)或者是单个、成对、或者是成群地出现[41,43]. 频繁出现的通量绳被认为是近地磁尾多重 X 线重联的证据, 因为这些重联将会导致多个磁结构(磁岛、磁绳)同时存在于等离子体片内. 这些磁结构的演化结果与它们的运动方向似乎也有某种关联, 也就是说, 重联发生时所对应的尾瓣区重联点的位置, 影响形成的磁结构的运动方向[28,44]. 近来有报道利用 CLUSTER 与双星的观测研究同时出现在等离子体片中的多个磁绳结构[45], 其观测结果也证实了这样的多重重联发生的可能性.

虽然对高速流与磁结构分别都有不少的工作, 但目前对于高速流与磁结构的相关关系的研究还开展较少, 磁结构是否一定与高速流相关联并不清楚. 有些研究表明高速流中等离子体参数的变化统计上与磁场变化同步, 进而认为高速流就是磁绳结构[24]. Slavin 等人[41]认为磁绳结构是与高速流紧密相关的, 他们将磁尾通量绳分为两类, 分别称为“BBF 型”和“等离子体团型” (图 3). 他们发现尺度大约在 2~5 R_E 直径的通量绳在近地磁尾是很普遍的现象, 大约每 5 小时就会在中心等离子片中出现 1 次. 和通量绳关联的磁场扰动往往紧跟着高速流或者和高速流同时出现. 同时发现大约 60%的通量绳可以用无力场的模型很好的解释. 根据这个模型估算的 BBF 型通量绳的尺度和核心场分别为 1.4 R_E, 20 nT; 等离子体团型的通量绳分别为 4.4 R_E, 14 nT.

Slavin 等人[41]还通过 CLUSTER 四颗卫星分析了一个尺度为 1 R_E 的 BBF 型磁通量绳, 但多卫星研究发现该结构并不符合无力场模型, 这可能是由于 BBF 在地向运动过程中和内磁层碰撞造成的. 尾向运动的磁结构由于没有阻碍, 当重联发展到一定程度就会与地球磁场分离, 形成经常在亚暴期间在远磁尾观测到的等离子体团结构[46]. 也有研究认为上

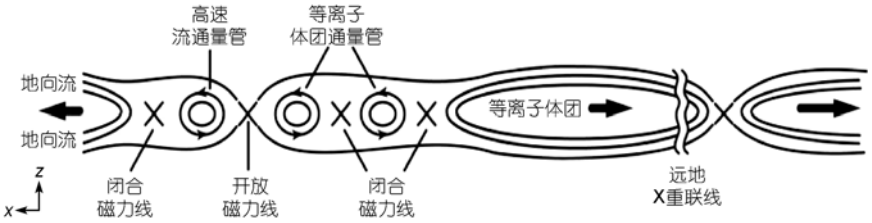

图 3 等离子体片中的磁结构与高速流示意图

据 Slavin 等人[44]修改

述研究的统计方法值得商榷，认为与高速流相关联的磁场变化是高速流与背景等离子体和磁场条件共同作用的结果，而不一定是高速流本身所携带的磁结构.

1.3 高速流与背景等离子体的相互作用

近来的研究更为关注高速流与背景等离子体的相互作用，包括在高速流两侧出现的回流，以及在高速流停滞区常常可以观测到的磁通量的堆积过程和磁场偶极化的过程. 有研究认为，一些高速流的前端有较大的 B_y 分量，表明在高速流的边缘有类似涡旋的结构[47]. 也有研究认为，高速流可能成为等离子体片中的扰动源，进而引起等离子体片的大尺度的波动扰动[48]. Ohtani 等人[49]分别研究了地向流和尾向流. 他们发现地向流经常伴随磁场的偶极化，在偶极化之前往往有短暂的 B_z 减小，类似于亚暴爆发性增长相. B_z 减小和高速流一起开始，并伴随有密度上升. 而在偶极化开始同时密度下降，温度上升. 地向高速流期间离子压强和总压强减小，尾向流除了温度下降外，其他和地向流一样，只是所有物理参数变化都不像地向流中那么突然. 他们推断这可能是因为地向流被阻塞，形成一个很陡峭的边界，而尾向流没有这个障碍. 观测表明地向流动高速流受到阻碍时形成的界面尚存在大量波动过程(图 4)，具有粒子回旋尺度的结构[50]. 偶极化锋面的出现和传播，也是近年来一个研究的热点，在相应的偶极化锋面上观测到从低混杂频率至电子回旋频率的丰富的波动过程[51]，偶极化锋面是否与高速流的刹车效应相对应目前并不十分明确.

1.4 高速流中的离子成分

在地磁活动剧烈的条件下，等离子片中常常会出现含有大量来源于电离层的氧离子[52]，Kistler 等人[53]研究证实在磁暴期间等离子体片中氧离子的密度和压强是非磁暴期间的 5 倍，但他们没有观测到想象中的亚暴期间增强的氧离子. 他们提出磁暴期间的亚暴表现出更多的装载和更强烈的卸载过程，同时也观测到氧离子与质子在亚暴触发时的不同表现，并认为这可能与两种粒子不同的回旋半径引起重联区不同的动力学过程有关. 在对高速流中能量离子的研究中还发现相对于背景等离子体成分，地向流动的高速流中常常含有较低的 O^+/H^+ 比例，而尾向流动的高速流中往往含有较高的 O^+/H^+ 比例[54]. 富氧等离子体片的存在对于重联的发生起到什么样的作用目前也还不很清楚. Shay 等人[55]通过理论研究和数值模拟计算了存在氧的条件下磁重联的特征，他们提出在含氧离子的 3 种成分等离子体中，由于氧的存在而出现的新尺度，即与“重离子哨声”相关联

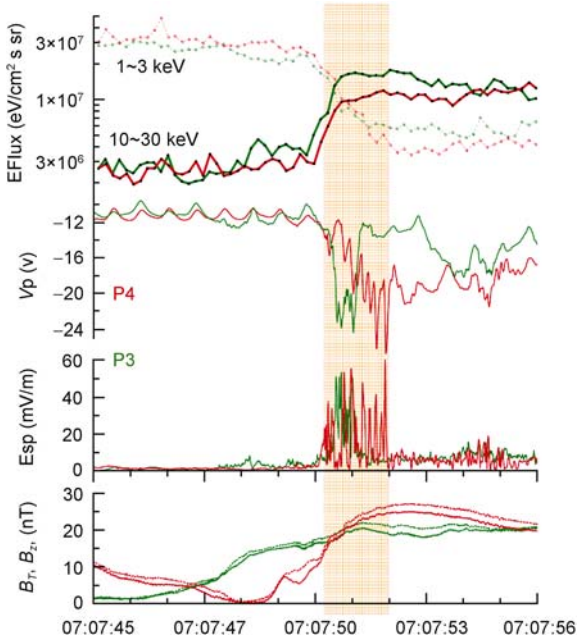

图 4 高速流前端观测到的电场扰动

据 Sergeev 等人[50]修改

的磁场扰动尺度和与“重离子阿尔芬”相关联的速度尺度, 理论预测在这样的情况下, 重联的出流速度将会减慢, 重联会缓慢进行, 如果磁层的亚暴膨胀相与重联相关, 则可以预期出现一个慢速的亚暴膨胀相, 这些理论上的预言是否可能得到观测的支持也有待对观测资料进一步的分析研究.

2 关键科学问题及结语

高速流虽然提出有 20 年左右的时间, 期间也有许多研究工作, 但对于其形成机制以及在磁层对流、磁层亚暴过程中的作用并不完全清楚, 依然有许多物理问题等待解决. 例如在其产生的机制方面, 高速流是否都是由重联产生的? 在其演化与相互作用方面, 地向流动的高速流是否都对应一定的磁绳结构? 高速流向地球的运动过程中, 其特征如速度、大小尺度、等离子体的特性等等方面是否会有变化? 背景等离子体与磁场如何影响高速流的传输? 高速流在近地空间的“刹车效应”是否等同于偶极化的过程? 在高速流在地磁活动中的作用方面, 是否地磁活动剧烈的情况下高速流更为频繁? 发生的位置是否更为靠近地球? 高速流与磁结构在极光区中是否有类似的反应? 氧离子对磁重联过程以及亚暴触发过程的影响是什么? 等等.

CLUSTER 卫星的远地点在 20 R_E 附近, 在 CLUSTER 的运行期间, 卫星有相当长的时间是运行在等离子体片中, 4 颗卫星分布在较近的空间范围内, 有利于研究较小尺度的结构与动力学过程, 配合以双星可以同时得到较大尺度的观测. THEMIS 卫星是专门设计用来研究亚暴模型的, 5 颗卫星被设计成为连成一线, 这样的位形同样非常适合于研究具有多重尺度的高速流与磁结构的演化与发展. 同时完备的 THEMIS 地面台站能够提供丰富的极光观测. 对近地等离子体片区域丰富的观测资料的分析, 可望对这个区域发生的物理过程有更深入的理解.

参考文献

1 Lui A T Y, Eastman T E, Williams D J, et al. Observations of ion streaming during substorms. J Geophys Res, 1983, 88: 7753–7764
2 Baumjohann W, Paschmann G, Lühr H. Characteristics of high-speed ion flows in the plasma sheet. J Geophys Res, 1990, 95: 3801–3809
3 Angelopoulos V, Baumjohann W, Kennel C F, et al. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet. J Geophys Res, 1992, 97: 4027–4039
4 Angelopoulos V, Kennel C F, Coroniti F V, et al. Statistical characteristics of bursty bulk flow events. J Geophys Res, 1994, 99: 21257–21280
5 张灵倩, 刘振兴, 马志为, 等. TC-1 卫星在近地磁尾(9~13 R_E)探测到的对流型高速流和场向高速流. 科学通报, 2008, 53: 1719–1723
6 Chen L J, Parks G K, McCarthy M, et al. Kinetic properties of bursty bulk flow events. Geophys Res Lett, 2000, 27: 1847–1850
7 Lee E, Wilber M, Parks G K, et al. Modeling of remote sensing of thin current sheet. Geophys Res Lett, 2004, 31: L21806, doi: 10.1029/2004GL020331
8 Angelopoulos V, Mozer F S, Mukai T, et al. On the relationship between bursty flows, current disruption and substorms. Geophys Res Lett, 1999, 26: 2841–2844
9 Lyons L R, Nagai T, Blanchard G T, et al. Association between Geotail plasma flows and auroral poleward boundary intensifications observed by CANOPUS photometers. J Geophys Res, 1999, 104: 4485–4500
10 Ohtani S, Yamaguchi R, Kawano H, et al. Does the braking of the fast plasma flow trigger a substorm? A study of the August 14, 1996, event. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1721–1724
11 Huang C Y, Frank L A. A statistical study of the central plasma sheet: Implications for substorm models. Geophys Res Lett, 1986, 13: 652–655
12 Baumjohann W, Paschmann G, Sckopke N, et al. Average ion moments in the plasma sheet boundary layer. J Geophys Res, 1988, 93: 11507–11520
13 Erickson G M, Wolf R A. Is steady convection possible in the Earth’s magnetotail? Geophys Res Lett, 1980, 7: 897–900
14 Sergeev V A, Sauvaud J A, Popescu D, et al. Multiple-spacecraft observation of a narrow transient plasma jet in the Earth’s plasma sheet. Geophys Res Lett, 2000, 27: 851–854
15 Angelopoulos V, Phan T D, Larson D E, et al. Magnetotail flow bursts: Association to global magnetospheric circulation, relationship to ionospheric activity, and direct evidence for localization. Geophys Res Lett,1997, 24: 2271–2274
16 Slavin J A, Fairfield D H, Lepping R P, et al. WIND, GEOTAIL, and GOES 9 observations of magnetic field dipolarization and bursty bulk flows in the near-tail. Geophys Res Lett,1997, 24: 971–974

17 Nakamura R, Baumjohann W, Mouikis C, et al. Spatial scale of high-speed flows in the plasma sheet observed by Cluster. Geophys Res Lett, 2004, 31: L09804, doi: 10.1029/2004GL019558
18 Cao J B, Ma Y D, Parks G, et al. Joint observations by Cluster satellites of bursty bulk flows in the magnetotail. J Geophys Res, 2006, 111: A04206, doi: 10.1029/2005JA011322
19 Zhang H, Pu Z Y, Cao X, et al. TC-1 observations of flux pileup and dipolarization-associated expansion in the near-Earth magnetotail during substorms. Geophys Res Lett, 2007, 34: L03104, doi: 10.1029/2006GL028326
20 Cao X, Pu Z Y, Zhang H, et al. Multi-spacecraft and ground-based observations of substorm timing and activations: Two case studies. J Geophys Res, 2008, 113, doi: 10.1029/2007JA012761
21 曹馨, 濮祖荫, 张辉, 等. Cluster 星簇对中磁尾尾瓣持续磁重联观测研究. 科学通报, 2005, 50: 2015–2021
22 Baumjohann W, Hesse M, Kokubun S, et al. Substorm dipolarization and recovery. J Geophys Res,1999, 104: 24995–25000
23 Shiokawa K, Baumjohann W, Haerendel G. Braking of high-speed flows in the near Earth tail. Geophys Res Lett, 1997, 24: 1179–1182
24 Cao J B, Yan C, Dunlop M, et al. Geomagnetic signatures of current wedge produced by fast flows in a plasma sheet. J Geophys Res, 2010, 115: A08205, doi: 10.1029/2009JA014891
25 Pu Z Y, Chu X N, Cao X, et al. THEMIS observations of substorms on 26 February 2008 initiated by magnetotail reconnection. J Geophys Res, 2010, 115: A02212, doi: 10.1029/ 2009JA014217
26 Fairfield D H, Mukai T, Brittnacher M, et al. Earthward flow bursts in the inner magnetotail and their relation to auroral brightenings, AKR intensifications, geosynchronous particle injections and magnetic activity. J Geophys Res, 1999, 104: 355–370
27 Ieda A, Shue J-H, Liou K, et al. Quiet time magnetotail plasma flow: Coordinated Polar ultraviolet images and Geotail observations. J Geophys Res, 2003, 108, doi: 10.1029/2002JA009739
28 Nakamura R, Baumjohann W, Brittnacher M, et al. Flow bursts and auroral activations: Onset timing and foot point location. J Geophys Res, 2001, 106: 10777–10789
29 Birn J, Hesse M. Details of current disruption and diversion in simulations of magnetotail dynamics. J Geophys Res, 1996, 101: 15345–15358
30 Yahnin A G, Despirak I V, Lubchich A A, et al. Relationship between substorm auroras and processes in the near-earth magnetotail. Space Sci Rev, 2006, 122: 97–106
31 Nakamura R, Oguti T, Yamamoto T, et al. Equatorward and poleward expansion of the auroras during auroral substorms. J Geophys Res, 1993, 98: 5743–5759
32 Nakamura R, Baumjohann W, Schödel R, et al. Earthward flow bursts, auroral streamers, and small expansions. J Geophys Res, 2001, 106: 10791–107802
33 Amm O, Kauristie K. Ionospheric signatures of bursty bulk flows. Surveys Geophys, 2002, 23: 1–32
34 Frey H U, Amm O, Chaston C C, et al. Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc. J Geophys Res, 2010, 115: A10209, doi: 10.1029/2010JA015537
35 Shue J-H, Ohtani S, Newell P T, et al. Quantitative relationship between plasmasheet fast flow and nightside auroral power. J Geophys Res, 2003, 108: 1231, doi: 10.1029/2002JA009794
36 Ohtani S, Mukai T. Statistical characteristics of storm time plasma sheet. J Geophys Res, 2008, 113: A01221, doi: 10.1029/2007JA012547
37 Shue J-H, Ieda A, Lui A T Y, et al. Two classes of earthward fast flows in the plasmasheet. J Geophys Res, 2008, 113: A02205, doi: 10.1029/2007JA012456
38 Nagai T, Fujimoto M, Saito Y, et al. Structure and dynamics of magnetic reconnection for substorm onsets with Geotail observations. J Geophys Res, 1998, 103: 4419–4440
39 Lui A T Y, Yoon P H, Chang C L. Quasi-linear analysis of ion Weibel instability in the Earth's neutral sheet. J Geophys Res, 1993, 98: 153–163
40 Chen C X, Wolf R A. Interpretation of high-speed flows in the plasma sheet. J Geophys Res, 1993, 98: 21409–21419
41 Slavin J A, Lepping R P, Gjerloev J, et al. Geotail observations of magnetic flux ropes in the plasma sheet. J Geophys Res, 2003, 108: 1015, doi: 10.1029/2002JA009557
42 Zong Q G, Fritz T A, Pu Z Y, et al. Cluster observations of earthward flowing plasmoid in the tail. Geophys Res Lett, 2004, 31: L18803, doi: 10.1029/2004GL020692
43 Slavin J A, Smith M F, Mazur E L, et al. ISEE-3 observations of traveling compression regions in the Earth's magnetotail. J Geophys Res, 1993, 98: 15425–15446
44 Slavin J A, Tanskanen E I, Hesse M, et al. Cluster observations of traveling compression regions in the near-tail. J Geophys Res, 2005, 110: A06207, doi:10.1029/2004JA010878

45 Walsh A P, Fazakerley A N, Wilson R J, et al. Near-simultaneous magnetotail flux rope observations with Cluster and Double Star. Ann Geophys, 2007, 25: 1887–1897
46 Hones E W. Substorm processes in the magnetotail: Comments on “On hot tenuous plasma, fireballs, and boundary layers in the Earth’s magnetotail” by L.A. Frank et al. J Geophys Res, 1977, 82: 5633–5640
47 Dmitrieva N P. Cross-tail velocity component in the plasma sheet fast flows. Ann Geophys, 2008, 26: 1597–1604
48 Zhang T L, Nakamura R, Volwerk M, et al. Double Star/Cluster Observation of neutral sheet oscillations on 5 August 2004. Ann Geophys, 2005, 23: 2909–2914
49 Ohtani S, Shay M A, Mukai T. Temporal structure of the fast convective flow in the plasma sheet: Comparison between observations and two-fluid simulations. J Geophys Res, 2004, 109: A03210, doi: 10.1029/2003JA010002
50 Sergeev V, Angelopoulos V, Apatenkov S, et al. Kinetic structure of the sharp injection/dipolarization front in the flow-braking region. Geophys Res Lett, 2009, 36: L21105, doi: 10.1029/2009GL040658
51 Zhou M, Ashour-Abdalla M, Deng X H, et al. THEMIS observation of multiple dipolarization fronts and associated wave characteristics in the near-Earth magnetotail. Geophys Res Lett, 2009, 36: L20107, doi: 10.1029/2009GL040663
52 Nose M, Ohtani S, Takahashi K, et al. Ion composition of the near-Earth plasma sheet in storm and quiet intervals: Geotail/EPIC measurements. J Geophys Res, 2001, 106: 8391–8403
53 Kistler L M, Mouikis C G, Cao X, et al. Ion composition and pressure changes in storm time and nonstorm substorms in the vicinity of the near-Earth neutral line. J Geophys Res, 2006, 111: A11222, doi: 10.1029/2006JA011939
54 Ruan P, Fu S Y, Zong Q G, et al. Ion composition variations in the plasma sheet observed by Cluster/RAPID. Geophys Res Lett, 2005, 32: L01105, doi: 10.1029/2004GL021266
55 Shay M A, Swisdak M. Three-species collisionless reconnection: Effect of O^+ on magnetotail reconnection. Phys Rev Lett, 2004, 93, doi:10.1103/PhysRevLett.93.175001